

西安理工大学

博士学位论文

流域水环境承载力理论及应用——以永定河上游为例

姓名：潘军峰

申请学位级别：博士

专业：水力学及河流动力学

指导教师：周孝德

20050901

流域水环境承载力理论及应用 ——以永定河上游为例

学科：水力学及河流动力学

作者姓名：潘军峰

签名：潘军峰

导师姓名：周孝德 教授

签名：周孝德

答辩日期： 年 月

摘要

由于我国经济快速发展,对河流的干扰程度大大超过了世界上同类自然条件的国家和地区,许多河流面临水体污染、断流、生态系统恶化等严重的水问题,为衡量人类经济社会与河流生态环境的协调程度,提出了河流水环境承载力的概念。河流水环境承载力是河流流域持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分,研究水环境承载力,对于优化水环境、水资源的配置,协调区域生态建设、人民生活、工农业生产与水资源、水环境的关系,实现区域可持续发展,具有重要的意义。

本文从水生态、水环境出发,以环境与经济协调发展为目标,对永定河上游水环境承载力进行研究。首先将水环境承载力与河流的生态环境需水量、河流的纳污能力即水环境容量相结合,建立了河流水环境承载力研究的理论基础,其次从河流水环境承载力的承载媒介(水资源量和水体质量)入手,以河流水环境承载力的承载对象(人口、污染物质、人类活动等)为基础建立了河流水环境承载力指标体系,最后以系统动力学为手段,建立了永定河上游——桑干河流域水环境承载力量化模型,并以桑干河流域为实例研究了河流水环境承载力。本研究取得的主要成果如下:

(1) 对河流水环境的关键影响因子进行分析,建立河流水环境承载力概念模

型,进而建立水环境承载力评价指标体系,包括工业、农业、人口、水资源、水污染 5 个子系统,共 12 个指标,采用层次分析法确定了各个指标及子系统的权重。

(2) 从河流生态功能出发,指出生态需水量由生态基流、水面蒸发、入渗需水量组成,环境需水量由水沙平衡需水量、污染物自净需水量组成,具体计算生态需水量时对水质不做要求,只对水量有要求,而污染物稀释自净需水量不仅对水量有要求,计算中必须计及自净水量的水质背景值。

(3) 建立了河流水环境承载力系统动力学模型,综合考虑了经济发展、人口增长、污染物环境容量、生态与环境需水量、水污染控制措施、水环境保护规划等诸多方面的因素,对水环境承载力指标体系中的指标进行模拟,水环境承载力系统动力学的建立与模型模拟能够对水环境控制措施进行量化,对改善桑干河流域的生态与人类生存环境具有实际的指导意义。

关键词: 水环境承载力 生态需水量 环境需水量 系统动力学

**THE THEORY AND APPLICATION ON WATER
ENVIRONMENT CARRYING CAPACITY——TAKING
UPSTREAM OF YONGDING RIVER AS AN EXAMPLE**

Subject: Hydraulic and River Dynamics

Author: Pan Junfeng

Signature: Pan Junfeng

Advisor: Professor Zhou Xiaode

Signature: Zhou Xiaode

Date:

Abstract

With the rapid economical development in our country, many rivers have faced serious problems such as pollution, dry river, and deteriorate ecological system. These problems are more serious in our country than others. For weighing the harmony degree between human economy society and ecological environment of river, the concept of water environment carrying capacity (simplified as WECC) of river is put forward. The WECC of river is the important part of natural resources carrying capacity during the development procedure in river basin. Through studying the WECC of river, we can optimize arrangement of water environment and water resource, and harmonize the relationship between ecological construction, people's life and water resource environment. It is very important meaning for sustainable development district.

Based on water zoology and water environment, this paper studies the WECC of Sanggan River, in order to assort with the development of environment and economy. Firstly this paper combines the WECC of river with the ecological and environmental water demand, the water environment capacity, and builds some basic theory system of WECC of river. Secondly it builds the index system of WECC by means of the

carrying object(such as population, pollutants, human activities), starting from the carrying media of WECC (water resources quantity and water quality) . Finally it builds the WECC model by system dynamics, taking Sanggan River as an example to study the WECC of river. The main achievements obtained are as follows:

(1) This paper builds the concept model of WECC of river, analysing the critical effect factors of WECC of river. It builds the evaluation index system of WECC of river. The index system includes five subsystems of industry, agriculture, population, water resources, water ecology, and water pollution altogether 12 indexes. It decides the weight of each index and subsystem by the method AHP.

(2) This paper indicates that the ecological water demand consists of ecological basic flow, water evaporation, inleakage water demand, the environmental water demand consists of the balance of water and sand demand and against-pollution water, starting from the ecological function of river. The ecological water doesn't have request for water quality at computing, while the against- pollution water not only requires to be inflow fresh water, but also calculate background value of water quality for self-clean water.

(3) This paper builds the WECC system dynamics model of river, comprehensively considering many factors including economic development, population growth, environmental capacity of pollutant, the river ecological and environmental water demand, the control measures of water pollution and the protective plan of water environment, simulating the indexes in WECC index system. The setup and simulation of system dynamics model of WECC can quantify the control measure of water environment protection, which has practical significance for improving the ecological and human survival environment.

Key words: water environment carrying capacity, ecological water demand, environmental water demand, system dynamics

独创性申明

秉承祖国优良道德传统和学校的严谨学风郑重申明：本人所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本文所论述的工作的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 张军峰 05年 9月 6日

保护知识产权申明

本人完全了解西安理工大学有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间所取得的所有研究成果的知识产权属西安理工大学所有。本人保证：发表或使用与本论文相关的成果时署名单位仍然为西安理工大学，无论何时何地，未经学校许可，决不转移或扩散与之相关的任何技术或成果。学校有权保留本人所提交论文的原件或复印件，允许论文被查阅或借阅；学校可以公布本论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他手段复制保存本论文。

(加密学位论文解密之前后，以上申明同样适用)

论文作者签名： 张军峰 导师签名： 吕若佳 05年 9月 6日

1 综述

1.1 研究背景和意义

随着人口增长和社会经济的发展,水资源短缺和水环境破坏已成为全球性的严峻问题。1997年联合国人类环境和水会议向世界发出警告:“水不久将成为一项严重的社会危机,石油危机之后下一个危机是水”。水不仅是最宝贵的自然环境,而且又是区域内重要的环境因素^[1]。水资源是基础自然资源,是生态环境的控制性因素之一,同时又是战略性经济资源,是一个国家综合国力的有机组成部分,水资源正日益影响全球的环境和发展^[2]。

水环境承载力是在人们对社会可持续发展与水环境相互关系有了较深刻认识的基础上被提出来的。人类社会初期,生产力水平低下,人类生产活动对水环境破坏程度轻微,水环境并没有对社会发展带来制约作用,直至工业革命以前,水环境问题一直没有成为社会的突出问题。随着工业革命的发展,人类开发利用和改造自然的能力空前增强,人类从自然界获取的资源越来越多的同时,排放的污染物也迅速增加,其排放量已远远超出水环境的自净能力,水环境质量日益恶化,人们开始注重水环境问题的研究。少量污染物进入水环境并不会引起环境质量的明显变化,但水环境的纳污量是有限的,污染物的排放量超过一定限度之后,水环境质量就会发生恶化。随着污染物种类和数量的增多,水环境构成的制约作用越来越明显,人们不得不考虑水环境与社会经济协调发展的问题。尤其当人类社会进入二十世纪后,生产力飞速发展,环境污染日趋严重,在某些地区资源的掠夺性开发及环境污染已威胁着人类自身的生存,人们开始思考一个问题:这种生活模式能够维持多久?什么是健康的经济发展模式,因而出现了可持续发展的观点。1987年,世界环境与发展委员会及挪威首相布伦特兰(Brundtland)提出了《我们共同的未

来》这份著名的纲领性报告，可持续发展的概念被定义为“既满足当代人的需要，又不对后人满足其自身需要的能力构成危害的发展”。为了实现可持续发展人们很自然地提出了环境承载能力的问题，即人们寻求的资源开发程度和污染水平，不应超过环境承载能力。各国在自己的发展战略中都作了有法律约束的规定。如我国科委发布的《环境保护技术政策》中指出：“区域的开发建设，要进行经济、社会发展、资源、环境承载能力的综合平衡，并按“三同步”的原则加以实施。在编制区域规划和城市总体规划时，必须编制环境规划。”

我国是人均水资源短缺的国家，加之水资源时空分布不均匀，水土资源的布局不相匹配^[1]，年际变化较大，尤其是干旱与半干旱地区，水资源开发利用与生态、环境的矛盾日益突出。水利部汪恕诚部长在《水环境承载能力分析 with 调控》的报告中，论述了我国当前水利面临的三大课题即：洪涝灾害，干旱缺水，水环境恶化，并着重指出“我国水污染的问题不仅会越来越严重，而且治理的难度也最大，造成的严重后果不亚于洪灾和旱灾，已经到了迫在眉睫，非解决不可的时候了”^[4]。因此研究水环境承载力，对优化水环境、水资源的配置，协调区域生态建设、人民生活、工农业生产与水资源、水环境的关系，实现区域可持续发展，具有重要的意义^[2]。

我国水资源和水环境承载力的最低要求是满足生活和河流生态用水前提下，对经济用水实行以供需，以保证水环境不在进一步恶化。水环境承载力的生态极限是水环境存在承载极限的根本原因，也是水环境承载力的一个基本构成部分，水环境承载力的认识与分析都应以此为起点。

“忽视水资源与生态环境系统之间的关系”是 20 世纪水资源管理的失误，直接导致生态环境的退化，引发森林退化、生物多样性减少、河道断流和地下水位下降等诸多问题。面临困境，人类重新审视水资源管理策略，发现水资源管理的思维模式存在偏差，需要进行彻底转变。

新的思维模式，放弃了以人类需求为核心的水资源管理观念，强调

水资源、生态系统和人类社会的相互协调，重视生态环境和水资源的内在关系，并将此作为水资源管理的基础。在 20 世纪 70 年代和 80 年代，水资源管理和规划很少考虑维持自然生态环境的需水，直到 90 年代人类才逐渐认识到自然生态环境需水的重要性，21 世纪实现生态环境需水和人类需水的协调配置将是人类的追求目标。生态环境需水理论是在水资源新思维模式指导下产生的，其强调以合理保护自然环境为前提，进行水资源的合理开发，充分考虑生态环境用水和水资源的永续利用，保护水资源和水环境，遏止生态环境的进一步恶化，实现水资源的可持续利用。

过去的 20 年，国民经济高速增长对水资源的需求，靠挤占农业及生态环境用水，以牺牲生态环境为代价。不仅影响我国的粮食安全，更产生了水环境、水域生态系统严重破坏的普遍现象，在北方地区出现了天然绿洲和湖泊萎缩、土壤沙化、草场退化、荒漠化面积扩大、黄河断流、华北平原地区地下水严重超采和水质恶化等生态环境问题。同时随着经济、城市的高速发展，人口的不断增加，废污水排放量快速增长，其中 80% 左右未经处理直接排入水域，造成水体污染和水环境质量恶化。全国范围内“三江三湖”的污染最为严重，三江“淮河、海河、辽河”中淮河的污染最重，70% 以上的河段受到污染。加强污染防治及水环境容量的研究十分重要。

根据由水利部北京市政府联合编制的《21 世纪初期首都水资源可持续利用规划》，统筹考虑北京及周边地区社会、经济、生态、环境等因素，提出了保障首都及周边地区共同发展的水资源规划和对策，并为海河流域上游地区制定了水资源保护、开发、节约、利用、治理等一系列方案及措施。

山西省依据《21 世纪初期首都水资源可持续利用规划》的工作安排，结合山西省“十五”规划，编制了《永定河上游山西省水资源利用及治理工程项目建议书》，提出对山西省境内永定河上游地区的综合治理方案力求通过工农业节水、污水处理、水土流失治理，使出省水量平水年达

到 1.0 亿 m^3 ，出境水质达到国家水环境Ⅲ类标准以上。

就永定河上游而言，人均水资源量 260 立方米，还不足全国人均水平的十分之一，远低于国际公认的人均 1700 立方米水资源紧缺标准。水环境恶化在永定河上游问题十分突出。从上个世纪七十年代中期开始，严重的水质污染使下游的官厅水库失去了饮水功能。从上个世纪八十年代初以来，随着人口的增加，经济的发展和城市规模的不断扩大，用水量增加，水资源矛盾日趋尖锐，不得不靠大量的超采地下水，来维持城市的生产和生活，来保障城市功能的运行。由于长期过量的超采地下水，导致地下水位大幅度下降，还引发了地面沉降，地裂缝等环境质量问题。由于缺水，生产、生活几乎全部挤占了生态用水，导致生态环境日益恶化。缺水造成的直接、间接损失无法估算。如何才能实现水资源的合理开发、配置和利用、促进水资源的可持续利用、保证水资源的良性循环，恢复和重建生态环境。为了适应时代的发展，保证永定河上游的可持续发展，缓解水环境的日益恶化，必须研究永定河上游的水环境承载力。将水环境承载力与流域的社会经济发展联系起来，制定水环境承载力与社会经济协调发展的经济战略，以使人类在不破坏生态环境的基础上最大规模的来发展社会经济。因此，永定河上游水环境承载力的研究具有十分重要和迫切的现实意义。

1.2 国内外研究动态和趋势

1.2.1 水环境承载力的研究进展

早期的承载力研究首先与生态学的发展密切相关，1921 年，帕克和伯吉斯就在有关的人类生态学杂志中，提出了承载力的概念。即“某一特定环境条件下（主要指生存空间、营养物质、阳光等生态因子的组合），某种个体存在数量的最高极限”。19 世纪末期开始在畜牧场管理中得到应用，后来逐渐被写入生态学教材。20 世纪 60 年代以后，随着人口、资源和环境问题日趋严重，人口和环境承载力得到了较多的研究和探讨，

承载力成了一个探讨可持续发展问题所不可避免的概念, 目前已在生态规划与管理等多个领域得到广泛的应用。后来这一术语被应用于土地、资源、环境等各个领域, 产生了不同的承载力概念和相应的承载力理论, 如土地承载力、资源承载力、环境承载力等等。水环境承载力 (Water Environmental Carrying Capacity, WECC) 是承载力概念与水环境领域的自然结合, 目前有关研究主要集中在我国, 国外专门的研究较少, 一般仅在可持续发展文献中简单的涉及。其中北美湖泊协会曾对湖泊承载力进行定义^[5]; 此外, 也有一些学者的研究涉及到水资源的承载限度。

我国对水资源承载力研究始于 20 世纪 80 年代后期, 1992 年施雅风等采用常规趋势法对新疆乌鲁木齐河流域的水资源承载力进行研究^[6], 次年许有鹏等采用模糊分析法对田河流域的水资源承载力进行研究^[7], 1995-2000 年其研究达到了空前鼎盛, 多个“九五”攻关项目和自然科学基金课题都涉及这一领域。如王建华等采用系统动力学方法对乌鲁木齐市^[8]、徐中民采用情景基础的多目标分析方法对黑河流域^[9]、贾嵘等^[10]及蒋晓辉等^[2]采用多目标模型及修改的契比雪夫算法对陕西关中地区、中国水利水电科学研究院以水循环、水资源合理配置和生态需水理论为基础对西北地区^[11]、阮本青等采用水资源适度承载能力计算模型对黄河下游地区^[12]、高彦春和刘昌明^[13]、傅湘和纪昌明^[14]分别采用模糊综合和主成分分析法对陕西关中地区的水资源承载力进行研究。同期其它有关研究也不断开展^[15, 16]。上述研究大都基于水资源的优化配置和评价理论, 具有水利或自然资源学科的背景, 1990 年后环境承载力概念在我国得以提出, 在环境科学方向又独立发展起了水环境承载力这一研究方向^[17-23], 不过其概念和量化方法与水资源承载力大抵相同。2001 年以来, 汪恕诚多次对其进行论述^[4], 引起了新的研讨热潮。总体上看, 我国大陆地区的研究一般偏重于应用和量化方法的研究而对概念的系统探讨较少。我国台湾地区的一些学者立足于水污染控制系统最优化规划方法, 也开展了水环境承载力的研究。

1.2.2 水环境承载力的概念与内涵

国内对水环境承载力的概念与内涵,表述从不同角度有下列三种,第一种表述是站在单纯的水体角度,不考虑作用于水体的人类行为,以水体的纳污能力作为水环境的承载力。如汪恕诚提出的“在一定的水域,其水体能够被继续使用并仍保持良好的生态系统时,所能够容纳污水及污染物的最大能力”,这一定义的特点是其承载对象为污染物,指标体系容易表达,指标能够量化,便于和其它水体流域进行比较。该定义下水环境承载力和水资源承载力联合使用。可以较好地表达流域水体对经济社会的支撑作用以及经济社会对流域水体的反作用。

第二种表述是在第一种的基础上加入了水体环境所能承载的人口规模和人口数量,如高占喜在环境承载力中讲述的在一定生活水平和环境质量要求下,在不超出生态系统弹性限度条件下环境子系统所能容纳的污染物数量,以及可支撑的人口规模与相应人口数量。如朱一中在水环境承载力中讲述的某一区域在特定历史阶段的特定技术和社会经济发展水平条件下,以维持生态良性循环和可持续发展为前提,当地水资源系统可支撑的社会经济活动规模和具有一定生活水平的人口数量。这一定义的特点是将水环境对人类社会的“承载”内涵表述出来,把水环境承载力具体到人口数量和污染物。

第三种表述是在第二种的基础上加入了水体所能承载的经济规模。将人类行为(经济行为)对水环境承载力的影响概括在,如崔风军在城市水环境承载力中讲述的某一城市、某一时期、某种状态下的水环境条件对该城市的经济发展和生活需求的支持能力。如区域在一定时期和一定的区域范围内,在维持区域环境系统结构不朝恶性方向转变的条件下,区域环境系统所能承受的人类各种社会经济活动的的能力。如何希吾在水环境承载力中讲述的一个流域、一个地区、一个国家在不同阶段的社会经济和技术条件下,在水资源合理开发利用的前提下,当地水资源能够维持和支撑的人口、经济和环境规模总量。如唐剑武在环境承载力中讲述的某一时刻环境

系统所能承受的人类社会、经济活动的能力值。如惠泱河在水环境承载力中讲述的某一地区的水资源在某一具体历史发展条件下,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维持生态环境良性循环发展为条件,经济合理优化配置,对该地区社会经济发展的最大支撑能力。

这一表述的特点是将水环境承载力的研究拓宽到经济领域、经济行为。便于从提高水环境承载力的角度来研究区域经济社会行为。也和目前认可的承载力的概念(如土地承载力)相一致。但不足之处是其指标体系要涉及社会各个层面,很难建立起便于相互比较,客观准确的单一评价指标。目前国内对水环境承载力的概念与内涵尚没有统一的说法,以上述的二、三种表述方法为多。单以第三种方法而论,各家表达方法也不一致。

环境承载力是环境系统固有功能的表现,它不仅与环境系统本身的结构有关,还与外界(人类社会经济活动)输入输出有关。若将水环境承载力看成一个函数,可以表示为: $EC = f(T, S, B)$, 其中: T 表示时间, S 表示空间, B 表示人类作用于水环境具体措施的规模与方向。具体来说, B 可以表示为科技进步、开发水资源、治理污水、采取节水措施、加强灌溉管理、提高全民节水意识、引进清洁生产工艺,推广生态农业、保证生态环境用水等等,在研究问题中,空间维往往是确定的,水环境承载力仅与时间维和人类活动的规模与方向维有关,人类作用于环境的规模与方向是多方面的,水环境承载力与人类社会经济活动的关系。人类社会经济活动的行为和方向决定了对水环境承载力的作用,但人类活动对水环境承载力的改变不是无限的,还受到水环境系统固有因素的制约,因此,在人类社会经济活动达到一定规模后,水环境承载力趋于稳定。由于人类社会已经认识到水环境是具有承载力的理论,因此现代人类社会必然会从增加水环境承载力的方向去发展,即人类社会经济活动在正坐标轴上。由于人类可以能动地改造环境,突破制约因子的束缚,通过技术进步、调整结构等措施,水环境容量被加大,水环境系统出现新的

S 型曲线, 因此, 从整个时间轴来看, 水环境承载力呈现出分段增长的现象。人类系统与环境系统的相互作用表现为人类系统从环境系统获取资源并向其排放废弃物, 而水环境承载力就是这一相互作用的外在体现, 反映了环境系统接受人类系统干扰的能力阈值, 即环境系统依靠物流、能流和负熵流来维持自身的稳态, 抵抗人类系统的干扰并重新调整自组织形式的功能。

1.2.3 水环境承载力的量化评价方法

针对第三种表述的概念和内涵的水环境承载力量化评价方法, 目前主要有以下三种。

(1) 水环境承载力的指标体系评价方法

指标体系评价方法是目前应用较为广泛的一种量化模式, 主要有向量模法^[17-20]、模糊综合评价法^[8, 13]和主成分分析法^[14]等方法。

向量模法是将水环境承载力视为一个由 n 个指标构成的向量, 设有 m 个发展方案或 m 个时期 (地区) 的城市发展状态, 分别对应着 m 个水环境承载力, 对 m 个水环境承载力的 n 个指标进行归一化, 则归一化后向量的模即是相应方案、时期或地区的水环境承载力。

模糊综合评价法是将水环境承载力的评价视为一个模糊综合评价过程, 其模型为: 设给定两个有限论域 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 其中 U 代表评价因素 (即评价指标) 集合; V 代表评语集合, 则模糊综合评价为下面的模糊变换: $B=A \cdot R$, 其中 A 为模糊权向量, 即各评价因素 (指标) 的相对重要程度; B 为 V 上的模糊子集, 表示评价对象对于特定评语的总隶属度, R 为由各评价因素 u_n 对评语 V 的隶属度 v_j 构成的模糊关系矩阵, 其中的第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 表示某个被评价对象从因素 u_i 来看对 v_j 等级模糊子集的隶属度。通过上面的合成运算, 可得出评价对象从整体上来看对于各评语等级的隶属度。再对上面的隶属度向量 B 的元素取大或取小, 就可确定评价对象的最终评语。由于这种方法取大或取小的运算法则会使大量有用信息遗失, 文献^[14]采用主成分分析法

来克服这一缺陷,它通过对原有变量进行线性变换和舍弃一小部分信息,将高维变量系统进行综合与简化,同时客观地确定各个综合变量的权重。

可以看出,指标体系评价方法依赖人为的评价,以及不同承载力的指标数值之间或指标数值与标准值之间的对比,得出的结果都是无量纲的数值,因而实际上是社会经济系统与水系统的协调程度而非严格概念意义上水环境承载力。

(2) 多目标模型和单目标最优化方法^[8, 9, 2, 22, 23]

多目标模型最优化方法是另一种常用的量化方法,它采用分解—协调的系统分析思路,将特定地区的水资源、人类社会系统划分成若干个子系统,并采用数学模型对其进行刻画,各子系统模型之间通过多目标核心模型的协调关联变量相连接。若事先确定需要达到的优化目标(文献^[2]中包括国内生产总值、人口、粮食产量和污染负荷量等方面)和约束条件,结合模型模拟和对决策变量在不同水平年上的预测结果,就可解出同时满足多个目标整体最优的发展方案,其所对应的人口或社会经济发展规模即为这一城市或地区的水环境承载力。目前多目标核心模型通常采用契比雪夫算法进行求解,对于权重叠代收敛,有时采用融合了决策者对邻近点和 trade off 矢量的意见的 Z-W 算法进行。可以看出,方案的拟定和筛选对于优化求解结果的准确性具有决定意义,为了避免方案确定太早而产生次优解,可采用情景分析法来筛选备选方案^[9],这种方法开始只粗略提供一些可行的情景给决策者,设定出后台情景,然后根据决策者意见采用多目标模型方法筛选出前台情景作为规划方向。

(3) 系统动力学方法

系统动力学是由美国麻省理工学院教授福雷斯特于 1956 年创立的一门分析和模拟动态复杂系统的学科,对于认识和处理高阶次、非线性、多重反馈的时变系统是一种极为有效的认识工具和模拟方法。系统动力学在对问题进行定性分析时,强调系统、动态和反馈,并使三者有机结合起来,同时强调系统的结构决定系统的功能。这种方法的重要特点是

通过一阶微分方程组来反映系统各个模块的变量之间的因果反馈关系。在实用中,对不同的发展方案采用系统动力学模型进行模拟,并对决策变量进行预测,然后将这些决策变量视为水环境承载力的指标体系,再运用综合评价方法进行比较,得到最佳的发展方案及相应的承载能力。但用该方法对长期发展情况进行模拟时由于参变量不好掌握,易导致不合理的结论,因而系统动力学方法大多应用于中短期发展情况模拟。

1.2.4 水环境承载力的研究趋势

水环境承载力研究在我国目前还处于初期阶段,还没有形成水环境承载力研究的成熟的理论、内容和方法体系。为使水环境承载力研究进一步深入,取得更精确和实用的成果,主要研究方向应包括以下方面:

(1) 加强学科交叉融合的研究

水环境承载力研究涵盖了从理论到实证;从水-生态-社会经济复合系统下的二元模式水文循环和水量平衡等宏观领域到水环境容量、植被耗水机理等微观领域;从水文水资源科学到社会经济科学、规划科学等不同层次、不同学科的研究范围,并以多目标决策分析方法、系统动力学方法、遥感与地理信息系统方法等作为技术手段,属于典型的交叉学科研究领域。迫切需要加强学科交叉融合的研究^[24, 25]。

(2) 技术方法的创新

目前制约水环境承载力研究的一个重要因素就是数据的获取与分析处理。GIS 在支持与水文和水环境有关的地理空间数据的获取、管理、分析、模拟和显示,以解决复杂的水资源、水环境规划和管理问题方面显示了其强大的功能^[26]。水环境承载力研究必须突破陈旧的数据获取与分析手段,充分利用现代先进技术,将地面水文观测与空中遥感信息相结合,利用地理信息系统进行数值计算和模拟,并将现有水环境承载力数学模型方法与 GIS 集成,这是水资源承载力研究取得突破性进展的一个关键所在。

(3) 研究领域的拓展

地域分异和空间配置历来是地理学最重要的优势研究领域。现有的水环境承载力研究着重研究了水环境可承载人口和社会经济发展总量规模和结构，这只是表征水环境承载力大小的一个面上的宏观指标，事实上水土资源与社会经济活动的空间配置状况对水环境承载力有着极为重要的影响，因此有必要加强空间差异与区域组合研究，以进一步增强水环境承载力研究成果的适应性。与水环境承载力密切相关的区域合理配置研究内容包括水土资源空间配置，上、中、下游的城市与产业合理布局，水源保护区区域范围内的人口、产业布局等，在水资源承载力研究中考虑区域分异与空间配置问题，不但是水资源承载力研究的一个重要方面—水环境承载力区域差异研究的需要，也必将使水资源承载力研究成果对社会实践具有更明确的指导作用。

1.3 河流生态环境需水量的研究进展

1.3.1 国内外研究进展

20世纪40年代美国鱼类和野生动物保护协会开始对河道内流量进行研究，并于1971年出台河道内流量法确定自然和景观河流的基本流量以来，在此期间（20世纪60年代至70年代）开始的按照系统理论对历史上著名的印度、孟加拉的布拉马普特拉河流域（1960），巴基斯坦的印度河流域（1968），埃及尼罗河工程（1972）等重新评价和规划以来，一直到20世纪80年代初期美国全面调整对流域的开发和管理目标，可以说是生态和环境需水分配研究的雏形，特别是在河道内流量方面已形成了较为完善的计算方法，但那时并没有明确提出生态需水量和环境需水量。英国、澳大利亚、新西兰等国在80年代便开始了对河流生态环境需水量的研究。直到90年代以来，水资源和生态环境的相关研究，特别是生态系统需水量研究才正式成为全球关注的焦点。

在河流生态环境需水领域，国际上早期的研究是关于河道低流量（low flow）研究^[26]。随后，由于河流污染问题的出现，开始对最小可接受

流量 (minimum acceptable flows, MAFs) 的研究^{[27][28]}。随着河流受人为因素影响和控制的加强, 河流生态系统结构和功能遭到破坏, 生态可接受流量范围的研究逐渐展开^[29]。近 10 年来, 为了促进水文水资源研究, 国际之间加强了合作, 其中包括河流生态环境需水量的研究, 其中最主要的是由国际间共同努力而建立起来的 FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data) 组织所倡导的行动计划^[30-14]。目前, FRIEND 组织很快扩展到欧洲、西非、中非、北非、地中海地区、中亚、印度及南亚等地区和国家^[31-33]。为这些地区和国家的生态环境需水做了大量研究工作。这种通过国际的合作研究, 使得大流域的河流生态环境需水量研究不受国家边界的限制, 从而对流域生态环境需水量的研究起到了显著的推动作用。

1.3.2 国内外的主要研究方法

到目前为止, 国外有关河道生态需水量的研究内容和方法可以概括为以下几个方面: 河道流量与鱼类生息环境关系的研究^[26]; 河流流量、水生生物与溶解氧三者之间的关系研究^{[29]、[34]、[35]}; 水生生物指示物与流量之间的关系研究; 水库调度考虑生态、生态水量的优化分配的研究; 环境生态用水与经济用水关系的研究等^[36、27、28]。其研究方法主要有

(1) 7Q10 法采用 90% 保证率最枯连续 7 天的平均水量作为河流最小流量设计值。该方法在 20 实际 70 年代传入我国, 主要用于计算污染物允许排放量, 在许多大型水利工程建设的环境影响评价中得到广泛应用。

(2) Tennant 法也叫 Montana 法, 是非现场测定类型的标准设定法。河流流量推荐以预先确定的年平均流量的百分数为基础。该方法通常在研究优先不高的河段中作为河流流量推荐值时使用, 或作为其他方法的一种检验。该法在美国 16 个州已经厉行使用。

(3) 河道湿周法的根据是基于这样的一种假设, 即保护好临界区域的水生物的湿周, 也将对非临界的栖息地提供足够的保护。该方法利用湿周 (指水面以下河床的线性长度) 作为栖息地的质量指标来估算期望的河道

内流量值。通过在临界的栖息地区域（如浅滩）现场搜集渠道的几何尺寸和流量数据，并以临界的栖息地类型作为河流的其余部分的栖息地指标。

（4）河道内流量增加法（IFIM）是应用比较广泛的计算生态环境需水量的方法。IFIM 根据现场数据如水深、河流基质类型、流速等，采用 PHABSIM 模型模拟流速变化和栖息地类型的关系，通过水力学数据和生物学信息的结合，决定适合于一定流量的主要的水生生物及栖息地。该法在美国 24 个州例行使用。

（5）R2CROSS 法适用于一般浅滩式的河流栖息地类型。该方法的河流流量推荐值是基于这样的假设，即浅滩是临界的河流栖息地类型，而保护浅滩栖息地也将保护其他的水生栖息地，如水塘和水道。

（6）CASIMIR 法，基于现场数据—流量在空间和时间上的变化，建立水力学模型、流量变化、被选定的生物类型之间的关系，估算主要水生生物的数量、规模，并可模拟水电站的经济损失。

在我国生态环境需水量的研究处于起步阶段，对生态环境需水量的概念、内涵与外延等没有统一的定义，对其研究方法也并不深入和完善，多以定性分析和宏观定量相结合的方法为主。

汤奇成^[37]计算了新疆地区绿洲的生态用水，即绿洲生态环境维系所需水量，其中包括天然生态系统和人工生态系统。90 年代后期，生态需水在中国得到了进一步研究，主要表现为生态用水方面的研究，取得一些研究成果。贾宝全等^[38、39]以新疆为例探讨了生态用水的概念和分类，根据这个概念和分类，对新疆生态用水进行了初步估算。在柴达木盆地研究中，贺东辰^[40]则根据河流径流的 25% 留给生态用水来计算柴达木盆地多年平均生态需水量。Zhang 和 Shen^[41]则根据景观生态学原理研究了柴达木盆地的生态用水。其生态用水的分类基础是景观类别，但每个景观区生态用水的计算方法与贾宝全的方法相同。李丽娟等^[42]以海滦河为例研究了河道生态环境需水，认为河道生态环境需水包括河流天然和人工植被耗水量、维持水生生物栖息地、维持河流地区生态平衡、维持河

流水沙平衡的输沙入海、维持河流水盐平衡、保持河流稀释净化能力、美化景观、调节气候以及地下水入渗补给量。文章综合计算了河流基本生态环境需水量、河流输沙排盐需水量和湖泊洼地生态环境需水量。海河流域水资源管理局也计算了海河流域生态环境用水。刘昌明和何希吾^[43]、刘昌明^[44]提出了“四大平衡”[水热(能)平衡、水盐平衡、水沙平衡、水量平衡与供需平衡]与生态需水之间的共享性。王西琴等^[45、46]从水污染问题出发,探讨了河道环境需水的内涵,指出河道最小环境需水量是维持河流的最基本环境功能不受破坏,必须在河道内常年流动的最小水量。并以渭河为例,概算了4个断面及其干流现状年及不同水文年的河道最小环境需水量。

总之,国内尽管在生态环境需水量研究方面起步较晚,但研究进展较快,包括从水量平衡角度和生态系统角度等都有不同程度的进展,特别从生态系统整体性角度出发,针对不同类型系统进行需水量计算,按照生态系统的功能分类,包括生态功能、环境功能的设定等,采用的计算方法有直接计算法、间接推求法等。综上所述,从国内外研究的概况来看,流域生态需水的研究对社会经济的可持续发展具有重要的战略意义。

2 水环境承载力理论基础

2.1 水环境承载力的内涵与研究目的

2.1.1 水环境承载力的内涵

综合近年来的研究成果，按照国内各家对水环境承载力内涵的不同定义，本文将水环境承载力表达为：在一定时期和某一确定的水域内，水体在满足用水功能的前提下所能容纳的各种污染物的阈值，在该水体所对应的区域内，人类社会及其经济行为所排放的污染物排放总量不超过该阈值；这里所提的用水功能既包括人类社会对水体质量的要求，也包括维系生态与环境对水质要求。

按照上述表述，水环境承载力包括以下三个方面内容：

- I. 水体能够容纳各种污染物的量
- II. 经济社会的发展规模与发展方式对水环境不产生趋势性下降，以致于不能满足经济社会对水体质量的要求的能力
- III. 水环境维系良好生态系统的能力

其中，水体能够容纳各种污染量的量是水环境承载力的直接（狭义）定义。它是水体的客观评价指标，与河流、湖泊的自身特性密切相关；但同时也受到人类对水功能区的划分影响，人类对水功能区划分愈严格，对水体的质量要求愈高，则水体的纳污能力愈低。

水环境支撑经济社会发展的能力是一种广义的水环境承载力。如前所述，承载力的概念最早来自于上世纪二十年代土地畜牧业方面。表达的是某一块土地能承载多少牲畜；毫无疑问，这是有明确答案的。以此类推，某一水域能承载多大的经济与人口规模，即为水资源承载力；如果限定生产和生活方式，水资源承载力也是可以定量表达的。但某一水域的水体能承载多大的经济与人口规模所排放的污水量却是很难定量表达的。这与经济结构、生产方式、污水处理程度都有直接关系。以数学

概念讲，这是一个有多个解的答案。

但另一方面，经济规模、人口规模与生产方式又确实作用于水环境，通过优化经济结构，确定合理的生产方式与人口经济规模可以减少排污量，减少水污染，提高水体质量。因此水环境承载力的研究又是实实在在的，对国民经济的发展具有意义的。

2.1.2 水环境承载力的特性

水环境承载力具有以下主要特征^[10, 20]：①客观性或固有性。一定地区的水资源不但具有可利用水量和水环境容量方面的自然限度，而且有社会经济方面的限度，表现为水资源管理技术和社会生产力的水平是有限的，在一定的历史时期，水资源系统对社会经济发展总有一个客观存在的承载阈值，水环境承载力是一个地区水资源系统的固有特征；②主观性、动态性和可调控性。水环境承载力涉及到人们有怎样的生活期望和判断标准，因而具有主观性，同时它也与特定历史时期的水资源开发利用水平、产业结构形式和生产力水平有关，这些因素是不断发展变化和可以调节的，所以水环境承载力的具体承载方式、内容及大小也是动态变化和可以调节的；③相对极限性。水环境承载力不是任何时间、任何技术水平和任何管理水平下的绝对极限，而是一个有条件的、可能发生跳跃式变化的相对极限；④区域性和时间性。由于水资源或水环境有较强的地区性，它对社会经济发展的支撑形式也有较强的地区性，水环境承载力只有相对于某一区域才有意义；水环境承载力是人类活动与自然水资源之间长期作用关系的综合体现，具有长期性和时间性；⑤模糊性。由于水资源系统的复杂性、影响因素的不确定性和人类认识自然能力的局限性，水环境承载力的承载指标和数量大小会有一定的模糊性。

2.1.3 水环境承载力的研究目的

水环境承载力的研究，实际上是寻求某一特定时段在一特定区域内经济社会与相应区域的水体质量及水体赖以生存的自然生态环境之间的

关系。经济社会体系通过污染物的排放及相应区域内水量增加与减少改变区域内水体质量及相应的水环境，而水体质量的变化又反作用于经济社会。影响区域的经济发展和社会正常运行。经济社会对水体的各项要求用水功能区划加以表达和要求。某一特定水体（如河流、湖泊）在满足用水功能的前提下所能容纳的污染物阈值称为该水体的纳污能力。纳污能力和背景水体（如现状水体或者基准年水体、上游来水水体）污染物含量之间的差值称为水环境容量。如纳污能力大于水体污染物含量为正值，表明尚有承载更大污水的能力。反之为负值，表明已不满足水功能的要求。水环境容量与水体的纳污能力是水体的自然特征，只与水域自身的各种条件有关。

水环境的承载对象是特定区域内作用于水体的经济与社会体系，在水环境承载力的研究中我们难以用某一指标对这一体系进行定量描述。到现在为止，人类尚未找出一个衡量经济体系的评价指标。很多国家用GDP表达当年的国内生产总值，但对于环境污染、资源损失、生态破坏却无法反映。对于经济——社会综合评价的指标更是无从谈起，对某一地区的经济社会的评价方法目前多用横向（与邻近地区或相同条件地区）比较或纵向（历史状况）比较。

水环境承载力的研究目的是寻找合理的生产、生活及经济建设（如引水、污水处理）方式，以便在经济增长、社会发展的同时，使河道或湖库水质不恶化，继续向社会提供水资源的支持；使水环境水生态不恶化，继续给人类提供适宜的生活和生产环境。因此，水环境承载力的研究不是用绝对指标或绝对数值来评价反映。而是对各种不同的人类行为进行比较，从中寻找最优的和最好的人类行为。而在这种比较中，采用承载度来作为相互比较的指标。

水环境承载力 and 水资源承载力是相互联系、难以分割的两个部分。水资源承载力是研究水体能够给经济社会提供多少水量，经济结构方式如何调整。这是水环境承载力研究的基础。

2.2 水环境承载力研究内容

2.2.1 河流纳污能力与水环境容量计算

河流水环境承载力其狭义的概念是推求水体在满足用水功能前提下,所能容纳的各种污染物的阈值,从狭义概念上讲,水环境承载力的研究内容仅限于河流自身,是对水体自身净化与稀释污染物的客观评价,具体计算是结合河流的一维水流模型,分别得到不同河段、不同频率下的水环境容量,通过河段的容量叠加得到整个河段的水环境容量。本文在第4章中对桑干河在不同水文年的纳污能力、水环境容量进行了分析计算。并推求了今后一个时期的污染物变化情况。

2.2.2 河流水环境承载力计算

对于水环境承载经济社会发展的能力这一广义的水环境承载力,由于涉及到经济社会、生态环境、河流水量水质三个方面,且研究的对象具有严格的时限和特定的区域。时间发生变化、经济社会的各项指标均会发生变化。结果的正确性就无从谈起。因此,广义的水环境承载力的研究须明确基准年和水文年,在桑干河水环境承载力的研究中,以首都水资源规划项目开始实施的2003年为基准年和起始年。以项目结束的2010年为水平年。

在广义的水资源承载力的研究中,探求的是经济社会人类活动对水体的影响趋势。由于两者是反馈的关系,其研究只能是探求一种包括生态环境在内的良性互动关系。这种互动是建立在经济社会对水体再地要求(水功能区划对水质要求的下限)的基础上,在此基础上追求经济社会或人类利益的最大值。

由于河流水环境承载力是建立在河流生态系统完整、水资源持续供给和水环境长期有容纳量的基础上,因此必须考虑河流的生态环境需水量。本文在第5章对生态环境需水量进行了计算。水环境承载力的研究内容与计算步骤如图2-1所示:

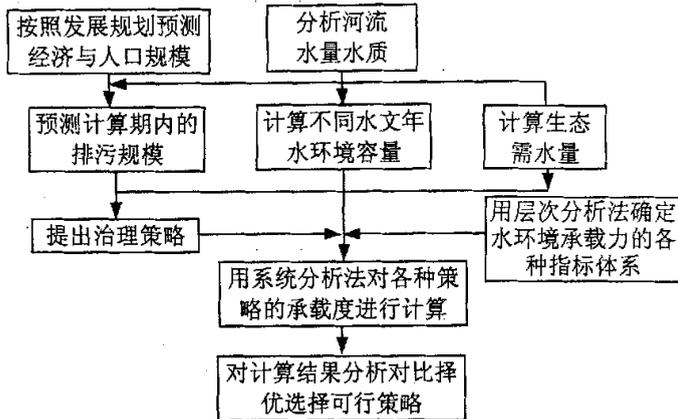


图 2-1 水环境承载力的研究内容与计算步骤

2.3 水环境承载力研究方法

2.3.1 水环境承载力的影响因素

影响水环境承载力的因素是多种多样的，涉及到水体的自身特性，也涉及到经济社会与人类活动所有的涉水事务。

② 水资源的数量、质量及开发利用程度，水资源受污染的程度、水生态系统健康程度、水生生物多样性的保护程度等等。

② 科学技术水平因素：不同阶段的水污染治理技术的发展水平不同，决定了水环境承载力的控制程度。

③ 社会经济发展水平因素：不同历史时期或同一历史时期的不同地区的社会经济发展水平不同决定了水环境承载力的差异。

④ 人类活动方式：水环境承载力的承载对象是人，因此，人口的数量、活动方式对水环境承载力有很大影响。

⑤ 水环境质量要求：水环境质量要求的标准不同决定了水环境承载力的差异。同一地区的同一时期，对水环境质量的要求不同，水环境承载力的大小也不相同。

⑥ 政策、法规等政府干预措施：一方面，政府的政策法规可以对水环境承载力产生极大影响；另一方面，水环境承载力的研究成果及改善效果对政府的经济政策、发展措施的制定具有推动作用。各影响因素之间的关系如图 2-2

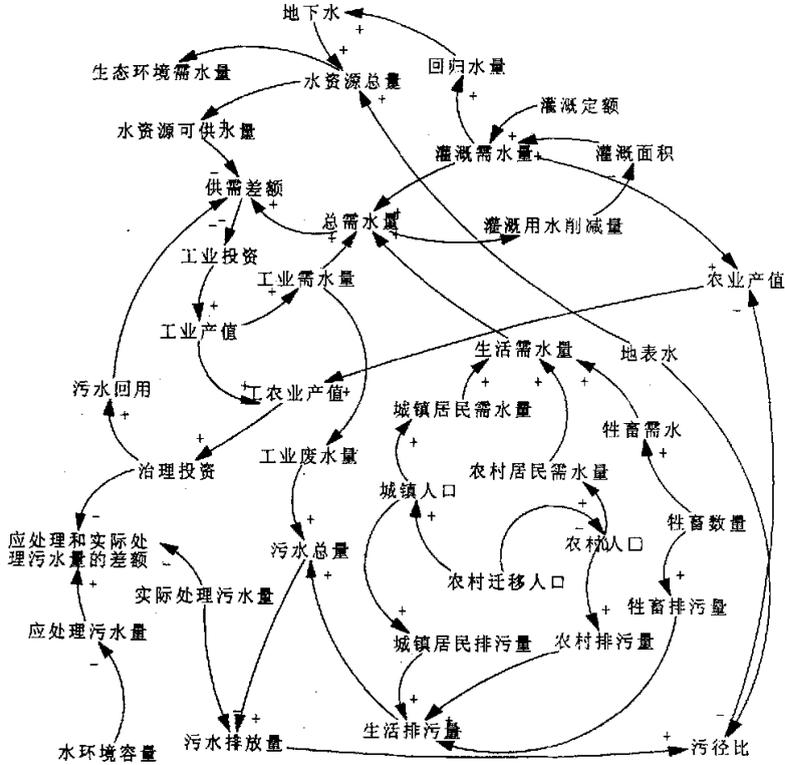


图 2-2 水环境承载力因果关系图

2.3.2 河流水环境承载力评价的指标体系^[47]：

对于如此繁多的影响因素，必须进行分类并根据实际情况采用恰当的方法建立表达各种影响因素的指标体系并确定其对水环境的影响大小，指标体系的确定遵循下列原则

1) 科学性：即指标体系既能反映水环境承载力的内涵，又能较好地度量水环境承载力。

2) 全面性: 即指标体系既能全面反映系统的总体特征, 又要避免指标之间的重叠。

3) 可操作性: 即体系中的指标应具有可测性和可比性, 并尽可能简化, 数据易于获得。

4) 层次性: 基于研究系统的层次性, 指标体系应分为若干层次结构, 使指标体系合理、清晰。

依照上述原则, 水环境承载力的指标体系应包括以下部分

(1) 水资源量指标:

1) 水资源量可供社会经济发展的指标:

如当地水资源量、人均水资源占有量、地表水开发利用程度、地下水开发利用程度、单方供水费用、水资源利用率等等;

2) 社会经济发展对水资源的需求量指标:

如工业用水水平(包括工业总产值、工业用水定额工业重复利用率、工业节水、工业用水损失率等等)、农业用水水平(包括农业灌溉面积、农业灌溉定额、农业用水定额、农业节水、农业用水保证率等等)、生活需水水平(包括生活水平、生活用水定额、人口总量等等)。

(2) 水环境容量指标:

如工业污水排放量(包括工业万元产值排污量、工业污水处理效率等等)、农业污水排放量(包括农业每亩施肥量、灌溉排水量等等)、生活污水排放量(包括人均排污量等等)、水体的污染物质指标(包括 BOD、COD、总氮、氯化物等)。

(3) 社会经济指标:

1) 工业 GDP 能力指标:

如工业投资、工业用水量、工业用水水平、工业用水保证率、工业投资产出率等等。

2) 农业 GDP 水平指标:

如农业投资、灌溉农业面积、农业投资产出率、农业平均产量等等。

3) 宏观社会经济指标:

如调水规模、发展水平、发展规划、生活生平、社会环境等等。

4) 人口指标:

如人均 GDP、人口增长率、人均粮食占有量、生活用水保证率等等。

2.3.3 指标体系的筛选与权重的确定

指标体系中罗列的指标众多,如果都将其作为指标体系中的指标则会出现指标冗余、指标重复计算等问题,应根据协调性、客观性、保序性准则对指标进行筛选,构成水环境承载力指标体系见下图 2-3。

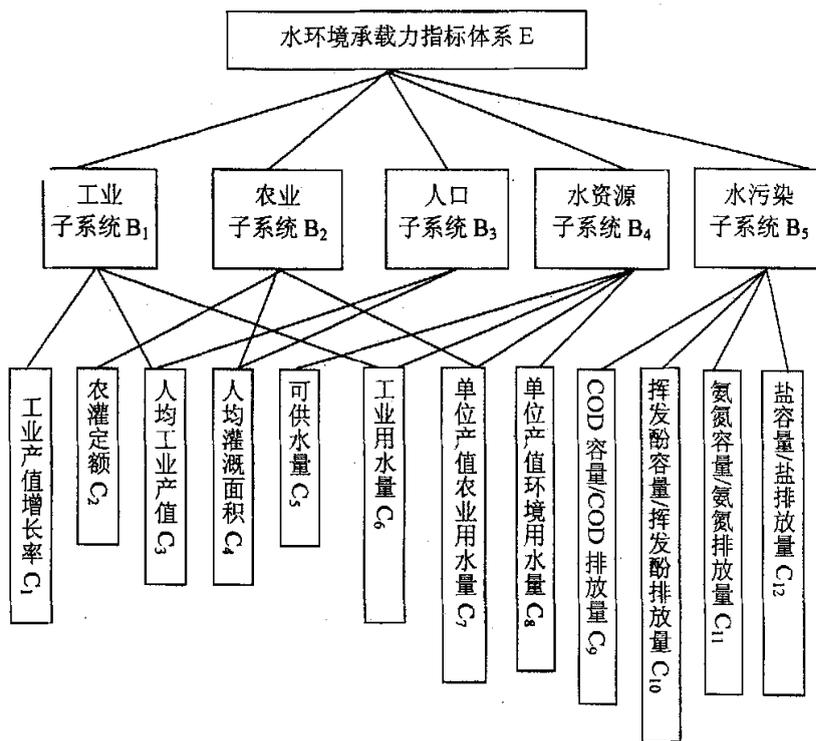


图 2-3 水环境承载力指标体系

水环境承载力指标体系中各个指标的权重采用层次分析法确定,层次分析法是 20 世纪 70 年代美国著名运筹学家、匹兹堡大学教授萨蒂提出的,层次分析法这是一种定性和定量相结合的、系统化的、层次化的

分析法。过去研究自然和社会现象主要有机理分析法和统计分析法两种方法，前者用经典的数学工具分析现象的因果关系，后者以随机数学为工具，通过大量的观察数据寻求统计规律。近年发展的系统分析是又一种方法，而层次分析法是系统分析的数学工具之一。

层次分析法的基本思路体现了先分解后综合的系统思想，整理和综合人们的主观判断，使定性分析与定量分析有机结合，实现定量决策。首先将所要分析的问题层次化，根据问题的性质和要达到的总目标，将问题分解成不同的组成因素，按照因素间的相互关系及隶属关系，将因素按不同层次聚集结合，形成一个多层分析结构模型，最终归结为最低层（方案、措施、指标等）相对于最高层（总目标）相对重要程度的权值或相对优劣次序的问题。

层次分析法在本文水环境承载力研究应用过程如下：首先采用如表 2-1 所示标度准则。

表 2-1 1-9 标度准则

标度	1	2	3	4	5
重要性	同样	同样/稍微	稍微	稍微/明显	明显
标度	6	7	8	9	—
重要性	明显/强烈	强烈	强烈/极端	极端	—

根据表 2-1, 需要建立判断矩阵 A , 所构造的判断矩阵必须通过一致性检验, 依据判断矩阵求解各层次指标子系统或指标项的相对权重问题, 在数学上就是计算判断矩阵最大特征根及其对应的特征向量问题。即由

$$AW = \lambda W \quad (2-1)$$

其中, W 为判断矩阵 A 的特征向量, λ 为判断矩阵 A 的特征根。将 λ_{\max} 对应的特征向量归一化, 得到相对重要性的权重 w 。

判断矩阵具有完全一致性通常采用以下方法: 采用下式计算 CI 及 CR , 当 $CR \leq 0.1$ 时, 就具有可接受的一致性, 否则, 必须对判断矩阵进行调整, 使之具有满意的一致性。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2-2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2-3)$$

RI 值是由于消除矩阵阶数影响所造成判断矩阵不一致的修正系数，具体取值见表 2-2

表 2-2 1-12 阶判断矩阵 RI 值

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48

2.3.4 指标分数的确定

(1) 对于越小越好的指标，采用下式计算：

$$S_{ij} = (g_{ij} - \max_{j=1}^m g_{ij}) / (\min_{j=1}^m g_{ij} - \max_{j=1}^m g_{ij}) \quad (2-4)$$

其中， S_{ij} 为 j 方案 i 指标的分数值， g_{ij} 为 j 方案 i 指标的值。

(2) 对于越大越好的指标，采用下式计算：

$$S_{ij} = (g_{ij} - \min_{j=1}^m g_{ij}) / (\max_{j=1}^m g_{ij} - \min_{j=1}^m g_{ij}) \quad (2-5)$$

2.3.5 环境承载力的量化

水环境承载力的量化就是确定水环境承载度，水环境承载度可以通过指标值和权重按下式计算： $EC = \sum_{i=1}^n w_i C_i$ ， w_i 为各子系统的权重， C_i 为各子系统的度量值， $C_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} S_{ij}$ ， w_{ij} 为 i 子系统 j 指标的权重， S_{ij} 为 i 子系统 j 指标的指标分数值。

2.4 水环境承载力量化模型

水环境承载力是涉及水环境、经济、社会、生态等子系统的多层次、多目标、群决策的复合大系统，受自然和社会两方面因素的制约和干预，

各子系统及其内部诸元素间都存在十分复杂的关系，从而构成一个错综复杂的关系网。任何个体研究或直觉判断都难以认识系统的全貌。水环境承载力研究具有以下特点：边界模糊、因素众多、具有多重反馈环、属于非线性系统等等，要了解其发展变化的趋势，用传统数学方法难以解决，首先是数学模型难以建立，其次是即使能够建立数学模型，也会因其高维高阶而难以求解，而借助于系统动力学建立的仿真模型能够有效地解决这类问题，它的优点在于对水环境系统中任何复杂的非线性系统所呈现的动态变化过程进行连续仿真，并能利用规范的计算机模型提供明确无误的假设，便于建模者与决策者交流信息，同时可在模型上进行模型试验——即仿真与政策分析，为弄清复杂问题提供了巨大潜力，还解决了数学模型对数据的依赖程度过高的难题，目前，系统动力学在经济、社会、资源、生态等众多领域得到了长足的进展。在本项研究中，采用美国斯坦福大学提出的vensim软件进行分析计算。

2.4.1 系统动力学模拟模型的建立

系统动力学的基本结构为反馈回路，反馈回路又可分为正反馈回路和负反馈回路，一个系统由这两种类型的反馈回路单独或组合而成。利用系统动力学方法分析现实问题的流程框图见图 2-4。

水环境承载力系统动力学模型由 100 多个变量组成的变量集，按照本所列的指标体系共分为 5 个子系统：工业、农业、人口、水资源、水污染。其中，工业、农业、人口、子系统是发展系统，水资源、水污染子系统对发展系统起到制约作用，是限制系统。工业子系统主要研究工业产值、工业废水排放量、污水治理投资与水污染之间的关系；农业子系统主要研究农业灌溉面积、农业灌溉定额与水污染之间的关系；人口子系统主要研究人口的出生率、死亡率、人均排污量与水污染的关系；经济子系统主要研究污水治理投资、节水灌溉投资与水污染的关系；水资源子系统主要研究地表水、地下水开发程度、可利用水量和工业、农业、生活、生态环境用水之间的供需矛盾；水污染子系统主要研究工业、

农业、生活子系统的污染物排放量与水环境容量之间的关系。系统动力学模型是在生态环境需水量、水环境容量的基础上建立起来的，水环境承载力仿真模型流程图见图 2-5。

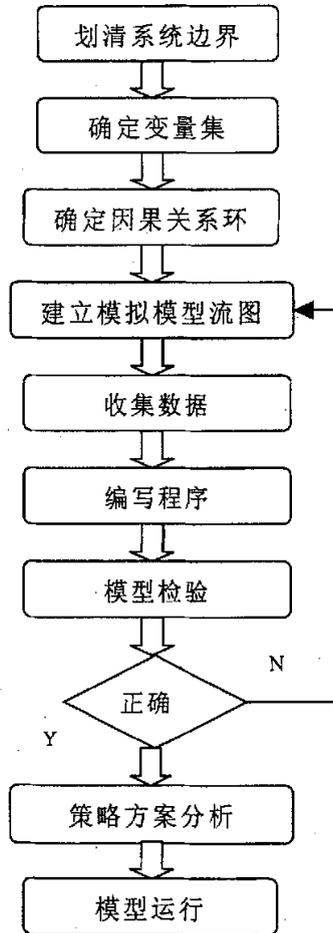


图 2-4 系统动力学分析流程图

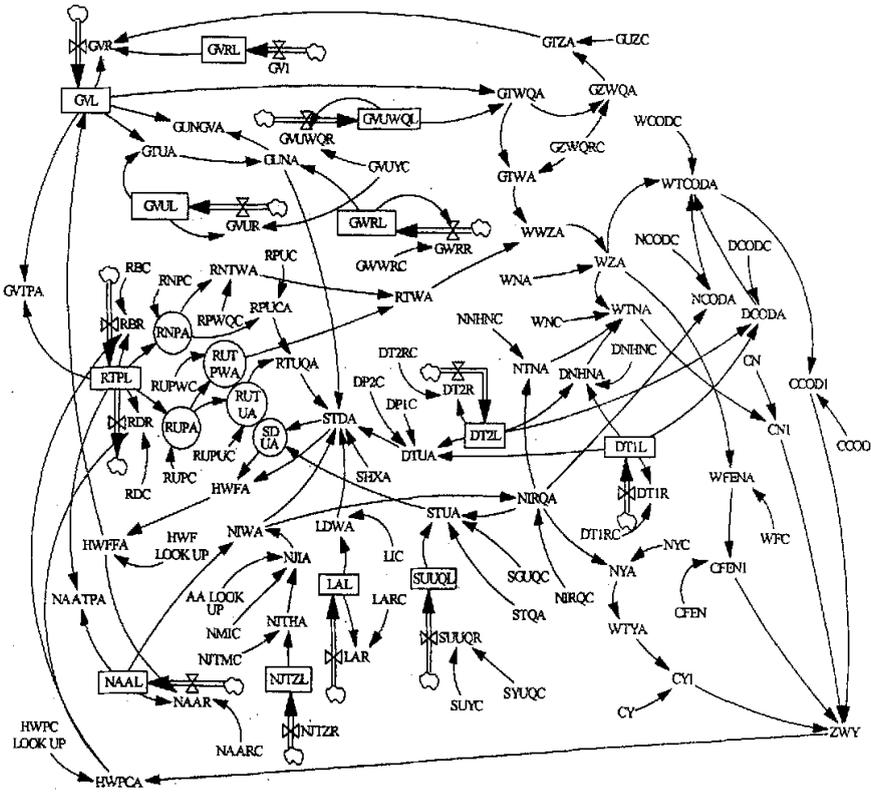


图 2-5 水环境承载力仿真模型流程图

2.4.2 模型中的参数

模型设计参数众多，分为状态变量、决策变量，辅助变量、常数变量以及表函数。见表 2-7 模型参数一览表：

表 2-7 模型参数一览表

	参数符号	参数名称	单位
状态 变 量	GVL	工业产值	万元
	GVUL	工业万元产值用水量	m ³ /万元
	GWRL	重复利用率	1
	GVRL	工业发展速度	1/年
	GVUWQL	工业万元产值废水排放量	m ³ /万元
	RTPL	总人口	人
	NAAL	农灌面积	亩
	NJTZL	节水投资比例	1
	LAL	林草面积	亩
	SUUQL	地下水可开采量	m ³
	DT1L	大牲畜存栏数	头
	DT2L	小牲畜存栏数	只
决 策 变 量	GVR	工业产值增速	万元/年
	GV1	工业发展速度变化率	1
	GWRR	重复利用率变化率	1/年
	GVUWQR	工业万元产值废水排放变化量	m ³ /万元/年
	RBR	自然增长率	人/年
	NAAR	农灌面积年递增率	亩/年
	NJTZR	节水投资增长率	1/年
	SUUQR	地下水开采增长率	1
	LAR	林草面积变化率	亩/年
DT1R	牲畜存栏数增长率	头/年	

续表 2-7

	参数符号	参数名称	单位
辅助 变量	GTZA	治理工业废水所需总投资	万元/年
	HWFFA	缺水限制因子函数	
	HWFA	缺水限制因子	1
	SDUA	需水量和用水量的差额	m^3
	STDA	工业、农业、生活、生态、环境需水量的总量	m^3
	GTUA	工业用水量	m^3
	GUNGVA	工业万元产值用新水量	m^3 /万元
	GUNA	工业用新水量	m^3
	GTWQA	工业废水产生量	m^3
	GZWQA	工业废水治理量	m^3
	NAATPA	人均灌溉面积	亩/人
	HWPCA	污染对出生率和死亡率的影响因子	1
	NIWA	农业灌溉用水量	m^3
	NJIA	采取节水措施后的灌溉定额	m^3 /亩
	NJTHA	节水投资比例函数	
	NMIA	目前农灌定额	m^3 /亩
	RUPRA	城镇人口占总人口的比例	
	RNPR	农村人口占总人口的比例	
	RNPA	农村人口	人
	RUPA	城镇人口	人
	RNTWA	农村人口总排污量	m^3
	RPUCA	农村人口生活用水量	m^3
	RTPUA	总生活用水量	m^3
	RTWA	总生活污水量	m^3

辅助变量	RUPWA	城镇人口人均排污量	m ³ /人
	RUTPWA	城镇人口排污量	m ³
	RUTUA	城镇人口生活用水量	m ³
	STUA	可利用的总水量	m ³
	GVRTPA	人均工业产值	万元/人
	STQA	区域外调水量	m ³
	SHXA	河流生态环境需水量	m ³
	SGUQA	地表水可利用量	m ³ /人
	NIRQA	农业灌溉回归水量	m ³
	GTWA	工业废水排放量	m ³
	CY	盐环境容量	t
	CCOD	COD 环境容量	t
	CFEN	挥发酚环境容量	t
	CN	氨氮环境容量	t
	CY1	盐环境容量/排放量	1
	CN1	氨氮环境容量/排放量	1
	CCOD1	COD 环境容量/排放量	1
	CFEN1	挥发酚环境容量/排放量	1
	LDWA	林草需水量	m ³
	WWZA	入河废污水总量	m ³ /年
	ZWY	污染总因子	1
	WZA	入河污染物总量	t/年
	WNA	入河污染物浓度	t/立方米
	WTCODA	所有污染源入河 COD 量	t/年
	WFENA	所有污染源入河挥发酚量	t/年
	WTNA	所有污染源入河氨氮量	t/年

2 水环境承载力理论基础

	WCODC	入河 COD 百分比	1
	WNC	入河氨氮百分比	1
	WFC	入河挥发酚百分比	1
常数 变量	GVRC	工业产值增长率	1/年
	GUZC	单位工业废水治理投资	万元/m ³
	GVUVC	工业万元产值用水量年递减率	
	GWRRC	重复利用率变化常数	
	GZWQRC	工业废水治理率	
	RBC	出生系数	1/年
	RDC	死亡系数	1/年
	NJTMC	节水投资最大比例	
	RPUC	农村人口生活用水定额	m ³ /人
	RPWQC	农村人口人均排污量	m ³ /人
	RUPUC	城镇人口生活用水定额	m ³ /人
	NIRQC	农业回归水系数	
	STUQC	可开采的地下水总量	m ³
	SURC	地下水的年开采率	
	CODC	污染因子	
	LARC	林草面积年递增率	1/年
	LIC	林草需水定额	m ³ /亩
	DTIRC	大牲畜存栏数年增长系数	1/年
	DPIC	每头大牲畜用水量	m ³ /天
	表 函 数	AA LOOK UP	节水投资和农灌定额的表函数
HWPC LOOK UP		污染因子对出生率和死亡率的表函数	
HWF		缺水对工业产值增速影响的表函数	

2.4.3 模型的计算

通过系统动力学模型模拟即可求出水环境承载力指标体系中的指标值,根据本章所述的计算方法,按照指标的性质(越小越优型、越大越优型)确定各策略下的指标分数值,指标分数值确定后计算各指标权重并最终计算出各个策略的水环境承载度,通过水环境承载度的变化,分析不同措施或策略对水环境造成的影响程度。

2.5 本章小结

本章通过对水环境承载力的理论分析,确立了水环境承载力的研究流程,建立了水环境承载力指标体系,确定采用系统动力学方法计算水环境承载力的指标,采用层次分析法确定各个指标的权重,从理论上确立了水环境承载力研究的一整套方法。

3 永定河的环境概况

3.1 永定河基本情况

永定河属海河水系，其正源为发源于山西省宁武县管涔山北麓庙儿沟的恢河，恢河与源子河在朔州市马邑镇汇合以后称为桑干河，桑干河在阳高县南徐庄流出山西省境，在河北省怀来县朱官屯与洋河汇合后称永定河，此后流经河北省和北京市，在天津市汇入海河流入渤海。永定河地跨山西、内蒙古、河北、北京、天津 5 个省、市、自治区，流域总面积 47016km²，是华北地区一条重要河流。

永定河上游山西省部分地处山西北部，地理座标在东径 119° 58' ~114° 30'，北纬 38° 55' ~40° 46' 之间，流经的行政区划主要包括大同市大部分（14017km²）、朔州市大部分（7569km²），以及忻州市宁武、神池、繁峙县的各一部分（795km²）。

在海河流域中，山西省永定河流域属于海河北系永定河上游山区部分。永定河上游的主要支流有桑干河、洋河，此外还有壶流河出山西省以后在河北省汇入桑干河，在省内为一独立河流。永定河在山西省流域面积 19400km²，其中桑干河流域 15464km²，洋河流域 2633km²，壶流河流域 1303km²。

桑干河发源于忻州市宁武县，在阳方口镇入朔州市，于朔城区神头镇马邑附近同源子河汇流后称为桑干河，相传系因每年桑葚成熟时河水干涸而得名。此后接纳黄水河、浑河、御河等支流，由西南向东北流经山阴县、应县、怀仁、大同县，在阳高县流出省境。

洋河在山西境内分南洋河、西洋河等支流。南洋河为洋河的一级支流，发源于阳高县朱家窑头乡的随士营，从源头到天镇县刘家庄下游 5km 处河段称为白登河，以下河段称为南洋河。该河沿东北方向经天镇县城、宣家塔、逯家湾镇、至永嘉堡村东出境入河北省，到怀安县与西洋河汇

合后注入洋河，在山西境内流域面积 2239km²。西洋河也是洋河的一级支流，位于天镇县最北端，俗称后川，也叫北洋河。发源于内蒙古兴和县石咀子村附近，由新平堡镇的马市口村进入大同市天镇县境内，流经新平、大营盘、曹家湾村出境，到河北省怀安县刘家夭村北汇入洋河，在山西境内流域面积 192km²。洪塘河是一条跨省河流，亦为洋河一级支流，发源于天镇县南高崖乡，从西南向东北于董家沟水库下游蔓菁沟进入河北省注入洋河，该河在在山西境内流域面积 165km²。

壶流河是桑干河一级支流，发源于大同市浑源、广灵两县交界处的石人山东麓，大致由西向东流经广灵县全境，于洗马庄出省境，在河北省蔚县汇入桑干河。该河在在山西境内流域面积 1259.77km²。

桑干河在省界以上干流总长 260.6km，河道平均纵坡 3.3%，河床糙率 0.03，河型为宽浅式的游荡型河道。河床土质为粉沙土，稳定性差。南洋河在大同境内干流（下游）长 32.5km，河道平均纵坡 3%，糙率 0.03，河型为宽浅式的游荡型河道。

西洋河在山西境内河长 10.4km，河道平均纵坡 10.9%，糙率 0.04，该段素有“十里澄沙河”之称，上游清泉水及小洪水从内蒙古交界渗入地下成为潜流，至河北省界平远堡出露。

壶流河境内干流全长 66km，河道平均纵坡 8.84%，糙率 0.025—0.03。河流由西到东上窄下阔，呈壶状，上白羊以上段为土石山区，河床为砂砾石，河道为“V”字型顺直河段，河床基本稳定；上白羊至贺窑段为黄土丘陵区，贺窑以下河段为冲积平原区，河道为“U”字型宽浅式游荡河段，易淤积，河床稳定性差。

表 3-1 永定河主要水文控制测站水沙统计表

站名: 雁翅

集水面积: 43674km²

项目	年平均 流量 (m ³ /s)	年径流量 (10 ⁸ m ³)	年平均 输沙率 (kg/s)	年平均 含沙量 (kg/m ³)	年输 沙量 (10 ⁴ t)	年平均中 值粒径 (mm)	备注
1952—2000 年 份内平均值	23.0	7.24	4.86	0.21	15.3	—	考虑官厅水库 对下游的影 响, 雁翅站多 年均值计算时 间为 1963—2000 年。
最大值	51.50	16.23	121	2.35	381	—	
最大值相 应年份	1967	1967	1967	1967	1967	—	
最小值	7.80	2.459	0.00	0.00	0.00	—	
最小值相 应年份	1994	1994	1980	1968	1977	—	

3.2 永定河河流水质

根据水利部颁布试行的《中国水功能区划》，永定河在山西省共划分 11 个水功能分区一级区。详见表 3-2。

桑干河流域东榆林以上段有神头电力工业区和七里河煤炭工业区，该段水质为超 V 类。东榆林以下至大同入境，由于受水库及沿程稀释自净，本段水质为 III 类。在大同境内接纳了御河来水，水质超 V 类。污染物主要为 COD、挥发酚、NH³-N、氯化物等。册田水库坝下至南徐段由于清泉水补给及坝基绕渗过滤，该段水质良好，达 III 类标准。

南洋河是天阳盆地的主要纳污河流，除接纳了上游白登河的废污水外，天镇县化肥厂、五金厂、酒厂等企业的废水以及县城居民的生活污水不经处理直接排入河道。南洋河年废污水入河量高达 435 万 t，属地面水 V 类水标准。主要污染物有：COD、NH³-N、挥发酚等。

表 3-2 永定河流域（山西省部分）水功能分区表

分区名称	河流	起始断面	终止断面	长度 (km)	现状水质
桑干河山西开发利用区	桑干河	东榆林水库	册田水库	162.1	劣V
恢河山西保护区	恢 河	河 源	东榆林水库	101	IV
浑河山西保护区	浑 河	河 源	浑 源	29.7	劣V
御河内蒙山西缓冲区	御 河	饮马河	堡子湾	8.7	劣V
御河山西开发利用区	御 河	堡子湾	利仁皂	57	劣V
饮马河内蒙山西缓冲区	饮马河	大科庄	御 河	20	—
南洋河山西开发利用区	南洋河	河 源	宣家塔	84	劣V
南洋河山西河北缓冲区	南洋河	宣家塔	水闸屯	30	III
桑干河山西内蒙缓冲区	桑干河	册田水库	阳 原	36	IV
壶流河山西开发利用区	壶流河	河 源	下河湾水库	46.6	—
壶流河山西河北缓冲区	壶流河	下河湾水库	壶流河水库	20	—

3.3 洋河的自然环境概况

洋河是永定河的一级支流，位于永定河上游，流域地跨内蒙古自治区、山西省、河北省，流域总面积 16933km²，总河长 238km。洋河上源分为东洋河、西洋河及南洋河三支。三条支流在河北怀安县柴沟堡以下汇合。洋河在山西境内只有南洋河、西洋河两条支流，在山西境内流域面积 2633km²，所在行政区划为大同市的天镇、阳高两县。其中南洋河发源于大同市阳高县朱家窑头乡的随土营，从源头到天镇县刘家庄下游 5km 处河段称为白登河，以下河段称为南洋河。该河沿东北方向经天镇县城、宣家塔、遼家湾镇、至永嘉堡村东出境入河北省，到怀安县与西洋河汇合后注入洋河，在山西境内流域面积 2197.92km²。西洋河在山西境内流域面积 201.6km²。洪塘河是一条跨省河流，亦为洋河的一级支流，发源于天镇县南高崖乡，从西南向东北于董家沟水库下游蔓菁沟进入河北省注入洋河，该河在山西境

内流域面积 174.06km²。

根据全省第二次水资源评价成果,山西省洋河流域 1956—2000 年水文系列多年平均水资源总量为 2.03 亿 m³, 其中河川径流量 0.90 亿 m³, 地下水资源量 1.36 亿 m³, 重复量 0.23 亿 m³。

西洋河是洋河的一级支流。位于天镇县最北端, 俗称后川, 也叫北洋河。发源于内蒙古兴和县石咀子村附近, 由西向东流经内蒙古的二道营子乡东拐流至新平堡镇的马市口村进入天镇县境内, 流经新平、大营盘、曹家湾村出境, 到河北省怀安县刘家夭村北汇入洋河。全长 60km。其中在天镇县境内长达 10.4km, 河道平均纵坡 10.9‰, 河床糙率 0.04, 该段素有“十里澄沙河”之称, 上游清泉及小洪水从内蒙古交界渗入地下成为潜流, 至河北省界平远堡出露, 流域总面积 617km², 境内面积为 201.6km², 地理位置介于东经 114°04′—114°10′, 北纬 40°35′—40°44′之间。河流主要特征是: 河型为宽浅式“U”字形河段, 河床稳定性差。

南洋河是洋河的一级支流, 南洋河大同境内干流(下游)长 32.5km, 河道平均纵坡 3‰, 河床糙率 0.03, 河型为宽浅式的游荡型河道。河床为砂质土, 稳定性差。南洋河流域面积为 2197.92km², 地理位置介于东经 113°32′—114°16′, 北纬 40°16′—40°35′之间。

表 3-3 洋河主要水文控制测站水沙统计表

站名: 响水堡

集水面积: 14507km²

项目	年平均 流量 (m ³ /s)	年径流 量 (10 ⁸ m ³)	年平均 输沙率 (kg/s)	年平均 含沙量 (kg/m ³)	年输沙 量 (10 ⁴ t)	年平均中 值粒径 (mm)	备注
1952—2000 年份内平均值	12.7	4.002	237	18.7	748	0.037	输沙率、含 沙量、输沙 量统计未包 括 1996 年
最大值	31.3	9.867	969	47.7	3060	0.084	
最大值相应年份	1959	1959	1956	1974	1956	2000	
最小值	3.36	1.062	1.03	0.307	3.26	0.020	
最小值相应年份	2000	2000	2000	2000	2000	1991	

3.4 桑干河的自然环境概况

桑干河为海河流域永定河水系一级支流。发源于宁武管涔山庙儿沟，始称恢河。流经忻州市宁武县城，在阳方口入朔州市，于朔城区神头镇马邑附近同源子河汇流后称为桑干河。东北—西南走向的山脉构成了桑干河流域的地貌骨架，山川相间，断层发育，沟壑纵横，群山绵亘。大同盆地将流域分为东南、西北两部分。东南部属恒山山脉，山脉呈东北—西南走向，北坡陡峻，南坡平缓，地形起伏较大，其表面上覆薄层黄土。西北部属吕梁山北端余脉——洪涛山支脉和阴山南支，近似于平行，大致呈东北西南走向。中部为断陷盆地，地形平坦，土层深厚。盆地低洼处多有积水、沼泽和盐碱地。海拔高程在 900—2375m 之间。地貌类型多样，土石山区主要分布在大同盆地西北部和东南部的流域分水岭周边地带，约占总面积的 37%；黄土丘陵沟壑区为土石山区的延伸部分，约占总面积的 29%；黄土丘陵缓坡风沙区主要集中在大同盆地的西北部，为黄土丘陵的延伸地域，约占总面积的 12%；中部为平原区约占总面积的 22%。东南部恒山山脉野生植被为暖温带针阔叶混交林。天然林以云杉、桦树、华北落叶松、油松和辽东栎为主。灌丛以绣线菊、胡枝子、虎榛子等为主。草种主要为天然野生草类。人工林分布在黄土丘陵沟壑区。西北部野生植被为温带半干旱灌丛草原带，除河滩有沙棘、乌柳等灌木外，其余基本上为野生草类。森林资源基本上为人工林，主要分布在黄土丘陵沟壑区和缓坡风沙区。中部平川地区乔木林主要为人工林。灌丛为天然野生残林。草种主要为野生草类。总的林草面积 2032.9km²，覆盖率为 24%。

桑干河流域是典型的温带大陆性季风气候区。气温、降水分配很不平衡。东南部和中部盆地气温高，山地丘陵气温低，气温随高度增加而降低。降水是由东南部和西北部山地向中部盆地递减，东南部多于西北部，山地多于盆地，迎风坡多于背风坡。年均降水量 384—465mm 之间，70%集中在 7、8、9 三个月，年蒸发量为 1152.1mm，年均气温 5.1—7.1

℃, 最高气温 39℃, 最低气温 -29.1℃, 无霜期 90—130 天。流域内平均风速 2.5m/s, 最大可达 29m/s, 年均 8 级以上的大风 29—65 天, 多在春季发生, 大于 4.5m/s 起沙风速的频率为 25%。

表 3-4 桑干河主要水文控制测站水沙统计表

站名: 石匣里

集水面积: 23944km²

项目	年平均 流量 (m ³ /s)	年径 流量 (10 ⁸ m ³)	年平均 输沙率 (kg/s)	年平均 含沙量 (kg/m ³)	年输 沙量 (10 ⁴ t)	年平均中值 粒径(mm)
1952—2000 年 份内平均值	16.7	5.270	346	20.7	1091	0.030
最大值	55.0	17.35	3400	64.1	10700	0.066
最大值相应年份	1954	1954	1954	1952	1954	1964
最小值	2.35	0.743	2.19	0.606	6.94	0.016
最小值相应年份	2000	2000	2000	1979	2000	1999

桑干河流域自然资源主要有: 矿产资源、光热资源、风力资源、地热资源、旅游资源等, 矿产资源目前已发现的矿种有 42 种, 已探明储量的矿产资源 28 种。在全国和全省占优势的矿产有煤、铝土、花岗岩、石灰岩、白云岩、磷等, 特别是煤炭资源储量最大, 已探明储量达 451.5 亿 t。光热资源丰富, 年日照时数 2696.7—3011.9 小时, 太阳辐射总量达 5630—6135J/m²。风力资源主要集中在西北部, 每年 10 月到次年 6 月, 风速 ≥ 3m/s 的风速频率为 60%, 平均风能密度 125W/m²。

3.5 桑干河的水系特征

桑干河在朔州境内受到神头泉的补给, 为常年性河流。多年平均清泉水量 1.17 亿 m³。径流量主要集中在汛期, 河流一般在 11 月中旬封冻, 次年 4 月中旬消融, 冰层厚度在 0.5~0.8m 之间。

神头泉出露于山西省朔州市东北部神头镇境内, 是我国北方著名的

岩溶大泉。该泉出露于洪涛山前源子河两岸及河谷中，泉群分布面积近 5km^2 ，大小泉水 100 余处，呈散流排泄，其多年平均流量为 $6.86\text{m}^3/\text{s}$ (1958-1999)，最大流量为 $9.28\text{m}^3/\text{s}$ (1964 年)，最小流量为 $4.50\text{m}^3/\text{s}$ (1993 年)。水温 $12^\circ\text{C}\sim 16^\circ\text{C}$ ，水质类型为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水，矿化度小于 0.4g/l 。神头泉域范围包括朔州市朔城区、平鲁区和山阴县、大同市的左云县、忻州市北部的宁武县、神池县部分地区。泉域总面积为 4756km^2 ，神头泉水是雁北最大的自流灌区—桑干河灌区的主要水源，1980 年以来，依托神头泉水建设了神头一、二电厂和平朔露天煤矿等大型工业企业，是当地工农业和人民生活用水的重要水源。

神头泉位于朔州市盆地区北部的神头、司马泊、新磨一带，沿源子河河道及两岸出露，是我国北方著名的岩溶大泉。泉群分布面积约 5km^2 ，大小泉水 100 余处，呈散流排泄，水位标高 $1052\sim 1065\text{m}$ ，地面标高 $1044\sim 1053\text{m}$ ，为构造上升泉。主要由神头泉组、司马泊泉组、河道泉组三个泉组组成。神头泉组：位于神头镇附近，包括东海子、西海子及二七泉；河道泉组：位于源子河谷中（毛道至小泊）包括神西泉及河道中大量的散泉；司马泊泉组：包括司马泊泉，三泉湾泉、五花泉、莲花泉等。

神头泉多年平均流量 $6.74\text{m}^3/\text{s}$ (1956~2003 年)，年际泉水流量不稳定系数为 1.99，动态稳定。80 年代以来由于降水量等自然因素及人类活动的影响，泉水实测流量已由 1956~1979 的 $7.96\text{m}^3/\text{s}$ ，减少为 1980~2003 的 $5.52\text{m}^3/\text{s}$ 。泉水为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水，溶解性总固体 $285\sim 360\text{mg/L}$ ，总硬度 $232\sim 277\text{mg/L}$ 。水温 $13\sim 15^\circ\text{C}$ 左右。岩溶水水质总体良好。

神头泉域范围包括朔州市的朔城区、平鲁区和山阴县、大同市的左云县、忻州地区北部的宁武县、神池县部分地区，总面积为 4756km^2 ，其中碳酸盐岩裸露区面积 1102.6km^2 。区域构造上处于大同—静乐复向斜中段，其中以马关向斜、朔州向斜和神池向斜形成的三个蓄水构造为泉域岩溶水的富集区。泉域北、西、南三面环山，决定了岩溶水由西北、南

向盆地径流汇集，在神头源子河谷一带岩溶水受阻于盆地第四系松散层覆盖较薄地段涌出地表成泉，属山前断裂非全排型溢流泉。泉域边界范围为：东部边界：南段：受马邑断层控制，断层呈阶梯状，埋深依次加大，断层以东埋深达 800~1000m，上覆新生界地层主要由砂质粘土和粘土组成，隔水性良好，构成了阻水边界。自北向南为朔县的大夫庄—福善庄—神武村—保全庄。北段：为马营河和大峪河之间分水岭，处于小京庄向斜东翼，由古老变质岩系和寒武系下统泥页岩构成隔水边界，自北向南为马道头—偏岭—甘庄—峪沟—大夫庄—线。北部边界：在小京庄—平鲁城—杨家窑—线，标高 1450—1700m，地表水向北汇入海河水系之十里河、黄河之三道河；向南汇入马营河，自西向东为败虎—团城—麻黄头村—何家庄—麻黄头—何庄—元堡子—李顶窑—潘家窑，基本上以马营河和十里河、三道河之分水岭即黄河水系与桑干河水系的分水岭划界。西部边界：北段：以断层及黑驼山地表分水岭为界。自北向南由二道梁—刘家窑—下水头—暖崖东。南段：由暖崖东—大严备—义井镇—油梁沟，与天桥泉域为界。沿边界地下水位较高，如朔州北东侧辛按庄孔水位标高为 1461.1m，白殿沟孔水位标高为 1443.87m，西侧白道沟孔水位标高为 1417.8m；神池东侧南辛庄水位 1243.48m，边界一带大黑庄水位 1246.14m，向西侧贺职的水位降至 1235.4m。总体构成与天桥泉域的地下水分水岭边界。南部边界：西段，以神池县南部两条北东东向断层及近南北向摩天岭断层与雷鸣寺泉域为界。自西向东由五寨大东沟—正掌沟，为隔水边界。东南段：以宁武向斜轴结合地表水分水岭的连线为界。自西向东由庙儿沟—黄土沟—薛家洼—盘道梁。

泉域多年平均降雨量 416.72mm，多年平均气温 6.9℃。是海河流域永定河水系主流桑干河的发源地，主要河流有马营河、马关河、恢河、七里河、黄水河。

神头泉岩溶水是朔州市目前最重要的供水水源，雁北最大自流灌区——桑干河灌区的水源主要来源于神头泉，1980 年以来，依托神头泉水

建设了神头一、二电厂和平朔露天煤矿等大型工业企业，成为当地工农业和人民生活用水的重要水源。

2003年神头泉水利用量 $7705.9 \times 10^4 \text{m}^3$ 。泉域内现有岩溶开采井共有79眼，总开采量 $1834 \times 10^4 \text{m}^3$ ，其中朔州的开采量是 $1504 \times 10^4 \text{m}^3$ ，外围忻州市各县的开采量 $330 \times 10^4 \text{m}^3$ ，此外，神头电厂还有13眼松散层开采井，总开采量 $450 \times 10^4 \text{m}^3$ ，也属岩溶地下水。

桑干河的一级支流主要有恢河、源子河、浑河、口泉河、御河、吴城河、坊城河、古城河、马家皂河等。

恢河发源于忻州宁武县管涔山，由阳防口出谷，流入朔城区梵王寺乡沙河村北成为潜流，一直到窑子头村南又钻出地面，恢复原流，故名恢河。该河横穿朔城区中部平原，在朔城区的神头镇太平窑村北有七里河汇入，然后经太平窑水库在朔城区神头镇的马邑村与源子河汇合注入桑干河。该河流域面积 3294.59km^2 ，河道全长77km。

源子河起源于大同市左云县马道头乡的截口山，经左云县东古城，从右玉县曾子坊进入朔州市境内，横穿右玉南部山区、从高家堡的大川村东出右玉县，经山阴吴马营乡进入平鲁，在平鲁过榆岭乡、下面高乡，从花圪坨乡的高阳坡村西南流入朔城区，最后在朔城区神头镇的马邑村与恢河汇合注入桑干河。源子河流域面积 2083.71km^2 ，河道全长110km。

浑河发源于浑源县东山乱岭关，由东向西流经浑源县，在西坊城乡的小辛庄西进入朔州应县境内，然后继续向西经镇子梁水库北折，最后于怀仁县新桥村西汇入桑干河。流域面积 1910.66km^2 ，境内干流长55km，河道平均纵坡5%，糙率为0.04。主要支流有王千庄峪、唐峪河、凌云口峪等。

口泉河发源于左云县水窑乡截口山，由西南向东北流经左云县水窑乡、南郊区鸦儿崖乡、口泉，然后转向东南，至南郊区堡子店入怀仁境内，最后于怀仁县智民庄汇入桑干河。干流全长57.5km，其中大同境内长40.5km，河道平均纵坡16.3%，糙率为0.025。流域总面积 501.89km^2 。

御河是桑干河的一级支流，发源于内蒙古丰镇西北阳坡子，由北向南经丰镇于新荣区堡子湾乡镇羌堡进入大同市境内，经孤山、大同城东、小南头，最后于大同县吉家庄汇入桑干河。内蒙古境内称作饮马河，进入大同市以后称作御河，干流全长 155km，大同市境内长 78.3km。河道平均纵坡 3‰，河床糙率 0.03。孤山以上为上游长 27km，以下为下游长 51.3km。流域总面积 5001.7km²，大同市境内 2529.37km²。流域（大同境内）平均长度 72km，平均宽度 32km，流域形状近似于扇形。桑干河流域水系分布见下图 3-1。

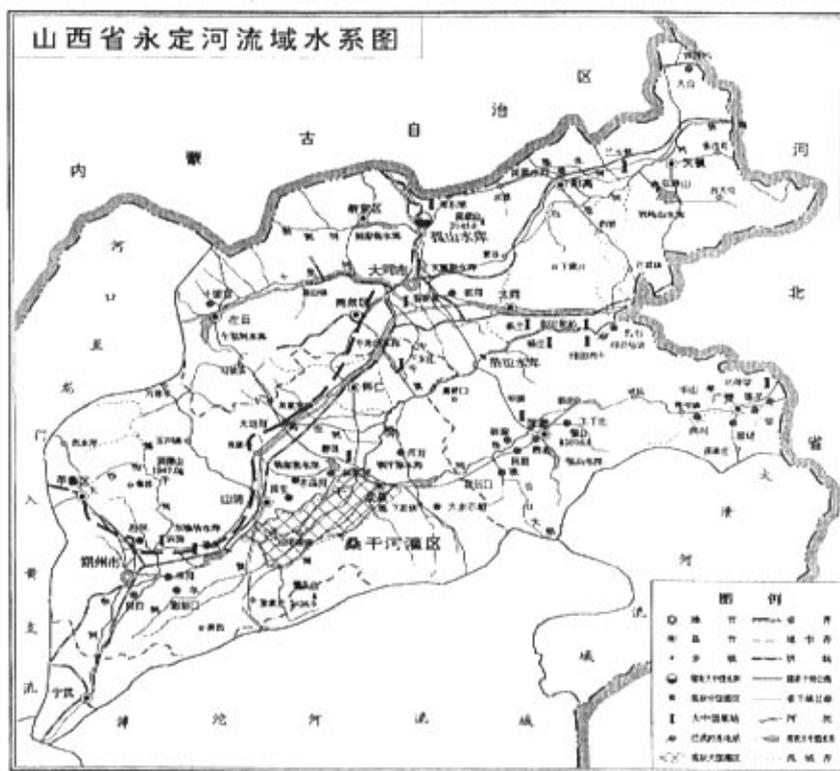


图 3-1 山西桑干河流域水系分布图

3.6 桑干河流域的社会经济发展

桑干河流域在行政区上涉及五县（左云，大同、阳高、浑源、广灵）四区（城区、矿区、南郊区、新荣区），除城区、矿区属于有地无村之外，其余五县二区皆有农业人口，境内农业总人口 111.8 万人，耕地面积 429.75 万亩。桑干河流域的社会经济发展分为大同市和朔州市两部分。大同市的社会经济发展以南郊区、新荣区、浑源县、左云县 3/4、大同县为主，2000 年底总人口 9300054 人，以农业人口为主，占 85.88%，达到 798766 人，非农业人口占 14.12%，人口数为 131288 人。人口自然增长率为 2.418%。桑干河流域是大同市主要工业区，也是全国能源重化工基地。主要产业有：采煤、电力、化工、建材、机械制造、化肥、酿造、皮革、制药、食品加工等。特别是煤炭资源最丰富，大同煤田、浑源煤田是境内两大煤海，已探明储量高达 451.5 亿 t。初步统计 2000 年大同市共完成国内生产总值 170.2 亿元，比上年增长 9.3%。其中，第一产业增加值 13.3 亿元，因上年遭灾，本年增幅高达 89.2%；第二产业增加值 86.3 亿元，比上年增长 7.2%；第三产业增加值 70.6 亿元，比上年增长 8.3%。人均国内生产总值 5995 元，比上年增长 4.6%。全面完成了“九五”计划的主要任务，综合实力有所增强。“九五”时期，全市国内生产总值平均每年增长 6.5%。“十五”期间经济和社会发展的主要预期指标是：a. 国内生产总值年均增长 8%—9%，到 2005 年，按 2000 年价格计算，达到 250--262 亿元；人均国内生产总值 5 年平均增长 7.2—8.2%，2005 年达 8620—9000 元；b. 财政总收入年均增长 7.5%，2005 年达到 21.53 亿元；一般预算收入年均增长 8.5%，2005 年达到 14.3 亿元。种植业生产喜获丰收。据抽样调查，全年粮食总产量达到 662555t，比上年增产 512047t，增长 3.4 倍；其中夏粮产量 6411t，比上年减产 7389t，下降 53.34%；秋粮产量 656144t，比上年增产 519436t，增长 3.8 倍。全市油料产量 34715t，比上年增长 4 倍；甜菜产量 22036t，比上年下降 15.21%。造林绿化工作基本稳定。全市全年共完成造林面积 29.62 千公顷，比上年下降 5.25%。

其中，营造经济林 5.14 千公顷，工程林 16.54 千公顷。幼林抚育作业面积 27.09 千公顷。四旁零星植树 281.60 万株。全市森林覆盖率达到 15.1%。

朔州市的社会经济发展以朔城区 $\frac{4}{5}$ 、平鲁区 $\frac{3}{5}$ 、山阴县、应县、怀仁县为主。2000 年底总人口 1178620 人，以农业人口为主，占 73.89%，达到 870720 人，非农业人口占 26.11%，人口数为 307900 人。人口自然增长率为 1.49%。工业总产值 36.58 亿元，年末耕地面积 328.90 千公顷，农林牧渔业总产值 277939 万元（当年价），粮食产量 656493t，油料产量 50363t，大牲畜年末存栏数 342078 头。城镇居民人均可支配收入 5055.26 元，农民人均纯收 2223.00 元。

由于桑干河的水环境状态（包括水资源量和河流的水质情况）都与大同和朔州的社会经济发展密切相关。大同和朔州的各行业用水部分从桑干河河流中取用，并把各行业产生的废污水排入桑干河中，大大损害了桑干河的水环境。因此研究桑干河的水环境承载力应结合大同和朔州的社会经济发展状况进行。

3.7 桑干河流域的生态环境

3.7.1 桑干河流域的历史生态环境

历史上的桑干河流域绿树成荫，河水清浅，商旅盈桥，确是一块盘龙卧凤的风水宝地。然而，不论朝代风云变幻，河流泛滥枯干，桑干河流经雁塞大地二百六十多公里，养育着沿河两岸及其支流御河、浑河、黄水河广大地区的人民，在这片河水土地上生生息息创造了也算辉煌的古代文化。元史就将桑干河称为“小黄河”。确实，像黄河养育了华夏儿女，养育了华夏文明一样，桑干河也养育了这座千年历史文化名城，称桑干河为大同的母亲河，确实受之无愧。

沿着变迁的河床，挖掘淤泥的层次，还是能寻到往昔曾有过的盛景来印证史书、传说的不谬。辽景宗皇帝于开泰二十三年十一月，曾移驾东行，专门前往烟雨飘渺的桑干河观鱼。可见那时的河流与如今不能同

日而语。时间正值初冬，河流尚未结冰，比之洪水暴溢的夏秋，水更清澈，鹰击长空，鱼翔浅底，正是观鱼的好时节。傍晚时分，夕阳西下，河水流光溢彩，航船随意漂去，炊烟袅袅，天水相连，那美景令多少游人留连忘返。

唐代著名诗人贾岛游毕北岳，途经桑干河，看着轻舟荡漾的客船，心有所感，遂赋诗《渡桑干》。到了明代，应州知府薛敬之专门游览桑干河，面对滚滚东逝的河水，岸旁伫立千年的村落，瞬间突破时空，穿越古今，一时感慨万千，诗泉奔涌，写下一首《桑干烟雨》。

大约清朝中叶，流淌千年的古桑干河依然轻舟荡漾，商船穿梭，风摆岸柳摇烟，一片江南水乡繁华盛景。沿河两岸的村庄，不论雨涝风旱，瓜果谷物照收不误，是百里乡间有名的塞北小江南，清朝应州知府薛敬之游桑干河，河水还汹涌澎湃，到下游六陵山下，河岸被大山和悬崖越挤越窄，水流急速，渡船摇摆不定，没有人敢冒险竟渡，酷似地处晋南河津县的龙门，因此有“小龙门”之说。天堑阻隔商旅汇通，制约了当地经济的发展。当地乡绅集资修建了一座铁索桥，几根铁索绳穿河而过，行人走在上面往上看，大山欲倾；往下瞧，急流飞瀑，铁索摇摇晃晃，着实胆战心惊。清朝时，诗人郭庭槐游罢，留下一首《铁索桥》诗。

这些历史文献印证了桑干河生态环境的巨大变化，那时候的桑干河，确是云中一大美景。几度风雨，几度春秋，时至今日，空留“桑干烟雨”、“御桥夜色”美名，已名不符实了。按老一辈的说法，桑干河在采摘桑葚的季节是干涸的，但土改时期河并没有干过。现在，桑干河河段流量很小，甚至出现了断流干河现象。所有这些都向我们提出警示，今日的桑干河流域生态环境正在亮出“黄牌”，人们必须正视生态环境的这些变化，人们对生态环境的种种损害行为已经危及自身的生存基础。我们必须从现在开始着手切实改善桑干河流域的生态环境，否则就无法实现山西的社会经济持续发展战略。

3.7.2 桑干河流域生态环境现状及原因分析

a. 现状

桑干河是山西省境内的主要河流，是首都官厅水库重要的集水区域之一，东榆林水库、册田水库等上游多座水库担负着向官厅水库供水的任务。山西省地处北京地区上风向及水源地上游，是我国环境污染最严重的省份之一，全省主要城市空气质量全部超过国家三级标准，全国污染最严重的30个城市中，山西省占了13个；全省26条河流104个监测断面中，有73%的断面水质超过国家地面水五类水质标准，失去了使用功能。桑干河流域东榆林以上段有神头电力工业区和七里河煤炭工业区，该段水质为超V类。东榆林以下至大同入境，由于受水库及沿程稀释自净，本段水质为III类。大同境内接纳了御河来水，水质超V类。污染物主要为COD、挥发酚、NH₃-N、氯化物等。册田水库坝下至南徐段由于清泉水补给及坝基绕渗过滤，该段水质为II类（GB3838—88标准）。

由于水污染造成的跨界污染纠纷日益增多，地下水的污染也在加剧；生态环境破坏日益突出，水土流失、土地退化严重，矿产资源开发造成的地质灾害面积达6000平方公里，地下采空区达1300平方公里，塌陷区520平方公里。由于山西所处的地理位置及气候条件，它的环境问题不仅仅制约了山西的社会及经济的发展，影响到人民群众的身体健康和社会安定，而且对北京市的环境也造成了很大的影响，主要体现在以下方面：

1) 对北京官厅水库的影响。山西省海河流域桑干河、南洋河均处于北京市官厅水库水源地上游，境内地水土流失、环境污染和生态破坏，对官厅水库的水环境造成了严重影响，而官厅水库正是北京2008年奥运会的水源地之一。

2) 生态环境破坏的影响。一方面是上游水土流失、水源衰竭对官厅水库的影响；另一方面是山西省北部桑干河、南洋河流域位于风沙侵蚀区，土地沙化、风蚀现象严重，是北京近年来沙尘暴来源地之一。

3) 流域常出现干旱天气，故有“十年九旱”之说。据资料记载：从

1950年到1999年,50年间有干旱年份36年。从干旱程度看,1999年是历史上干旱最严重的一年,成灾面积占总播种面积的98%,绝收面积占78.27%,此次干旱持续时间长达一年半,气温居高不下,流域内地表水出现枯竭,地下水位大幅度下降,平均降深达3—4m,不少村庄出现了严重的吃水困难,据统计粮食减产75.8%,农村经济收入减收64.2%。

4) 洪涝灾害:流域山丘区面积大,林草植被覆盖率低,降水集中且历时短强度大,土壤有机质含量低,蓄水能力差,再加上防洪设施薄弱,经常造成局部的洪涝灾害。

b. 原因分析

现在的桑干河基本处于干涸的状态,从生态学的角度看,桑干河的长期断流是一个生态灾难,不仅在于它无法供应下游庞大的城市群用水,而且其裸露的河道大量沙土随风肆虐,成为北京沙尘暴的主要原因之一。桑干河干涸的原因主要有:

植被的破坏、水土流失,使得桑干河周围的环境恶化,桑干河水不能得到很好的保持;缺水是大同市生态环境最恶劣的因素。大同市的年降水量在300mm左右,植物在干旱少雨的情况下生长非常缓慢。在这种情况下,即使天降大雨,土地也因为缺少植被而难以保住水分。如是恶性循环,导致桑干河面临的形势日渐严峻。

生态环境恶化的最大隐形杀手——燃煤发电;桑干河流域的大同有两个发电厂,神头有两座电厂,总装机容量480万千瓦,大同二电厂目前正在扩建之中,预计二期和三期扩建工程全部投产后,总装机容量将达800万千瓦。已建的电厂取水均为神头泉水及地下水,地下水的大量开采造成水位急剧下降,桑干河的源头得不到地下水的补给,导致桑干河出现断流。

东榆林水库大量蓄水;在桑干河径流量日趋减少的情况下,东榆林水库是一座宽浅的平原水库,水深小,水面大,又地处塞外,多风气候,年蒸发量高达2000mm/年左右,大量的蒸发损失和超定额的农田灌溉(亩

次用水量 2000 年之前为 400m^3 左右), 使桑干河日渐干涸。

3.8 桑干河污染负荷概况

桑干河水系主要处在大同、朔州地区, 该区煤炭、电力产业发达。山西省海河流域入河排污口分布在永定河水系的排污口共计 446 处, 占流域入河排污口总数的 52.9%, 是流域内排污口数量最集中的水系。主要以工业排污口为主。入河排污口分布在水系内的 26 条河流上, 其中御河、源子河、口泉河、恢河、浑河上的排污口分布较为集中, 上述五条河流排污口总数占水系排污口总数的 88.1%, 是水系内主要的纳污河流。

从各水系纳污废水量分析, 桑干河流域的主要入河废水集中在恢河、御河、口泉河、源子河。这些河流纳污量为 14777.5 万 t, 占永定河水系纳污废水量的 85%。主要河流废水入河量见表 3-5。

表 3-5 山西省桑干河流域主要河流废污水入河量

河名	废污水入河量 (万 t)	比重 (%)
恢河	2190.4	14.82
源子河	5203.5	35.21
口泉河	1497.5	10.13
御河	5092	34.46

注: 比重为该河流废污水入河量占桑干河水系的废污水入河量的比值。

表 3-6 山西省桑干河流域行政区污废水入河量统计分析表 单位: 万 t

行政区	污废水入河量	占全省比重	污废水分类					
			工业	%	生活	%	混合	%
大同	8056.2	16.6	3794.1	47.1	539.9	6.7	3722.2	46.2
朔州	8210.1	17	1836.3	22.4	44.2	0.5	63729.6	77.1

从行政区废污水排放量分析, 大同市年污水量为 8056.2 万 t, 日均污废水入河量为 22.1 万 t, 占全省废污水入河量的 16.6%。朔州市污废水入

河量为 8210.1 万 t, 日均污废水入河量为 22.5 万 t, 占全省污废水入河量的 17%。见表 3-6。重点排污口一览表见表 3-7。

表 3-7 重点排污口一览表

序号	排污口名称	排入河流	排入功能区名称	主要排污企业	入河污废水量 (万 t/年)
1	山化及齿轮厂	十里河	御河山西大同市排污控制区	山西化工厂、齿轮厂	568
2	永久总污口	御河	御河山西大同市排污控制区	永久总污口	442
3	皮毛城市口	御河	御河山西大同市排污控制区	皮毛厂	442
4	应县金城镇	桑干河	桑干河山西应县农业用水区	金城镇	202
5	岱岳镇	民生渠	桑干河山西山阴农业用水区	岱岳镇	281
6	铁牛里城市污口	御河	御河山西大同市排污控制区	城市污口	378
7	市委五爱口	御河	御河山西大同市排污控制区	市委	290
8	一电厂生活水	十里河	御河山西大同市排污控制区	大同一电厂	211
9	大同机车厂	十里河	御河山西大同市排污控制区	大同机车厂	237
10	大同煤气公司	十里河	御河山西大同市排污控制区	大同煤气公司	237
11	二电厂正南口	十里河	御河山西大同市排污控制区	大同二电厂	378
12	神头一电厂	源子河	源子河山西朔州工业农业用水区	神头一电厂	4131
13	朔城区北关	七里河	恢河山西保护区	朔城区北关	505
14	露矿生活区	七里河	恢河山西保护区	露矿生活区	442
15	朔城区东关	恢河	恢河山西保护区	东关	378
16	刘家口矿	七里河	恢河山西保护区	刘家口矿	227
17	平鲁化肥厂	大沙沟	源子河山西朔州工业农业用水区	平鲁化肥厂	268
18	宁武县生活污水	恢河	恢河山西保护区	宁武县生活污水	473
19	阳方口煤矿	恢河	恢河山西保护区	阳方口煤矿	236.5

从各水系入河污染物分析, 污染物主要集中在桑干河 5 条较大的支流上, 如: 源子河、口泉河、御河、十里河和恢河, 见表 3-8。

表 3-8 山西省桑干河流域主要河流入河污染物统计 单位: t

河流名称	总量 (t)	占水系比重%	入河污染物					
			COD (t)	占水系比重%	挥发酚 (t)	占水系比重%	氨氮 (t)	占水系比重%
源子河	2079.7	8.5	2049	9.2	0	—	30.7	1.5
口泉河	1969.5	8.0	1759.5	7.9	53.2	25	156.8	7.6
御河	9964	40.6	8905.8	40	2.1	1.0	756.1	37.0
十里河	3661.5	14.9	3123.8	14.0	153.5	72.1	384.2	18.8
恢河	3964.6	16.2	3768	16.9	0.1	—	196.5	9.6
合计	21639.3	88.2	19606.1	88.1	208.9	98.1	1524.3	74.6
水系总量	24520	—	22266	—	213	—	2041	—

桑干河水系 COD、挥发酚、氨氮三项污染物主要集中在御河、恢河、十里河。由于大同化纤厂、工农化肥厂、永久城市污口分布于御河沿岸,大量工业及生活污水排入所致。恢河上最大的污染源为宁武县生活污水, COD 入河量高达 3079t。十里河沿岸汇集了大同市众多的大型企业,山西化工厂、大同齿轮厂、大同市煤气公司、云岗矿、大同二电厂等等,是造成污染的重要原因。

从行政区入河污染物分析,主要污染物分布除受人口、企业、行业分布影响外,还与经济发展水平密切相关,具有明显的区域特征。见表 3-9。

表 3-9 山西省桑干河流域入河污染物行政区域统计 单位: t

区域名称	入河污染物量	入河污染物量					
		COD	占流域比重%	挥发酚	占流域比重%	氨氮	占流域比重%
大同市	16217	14557.8	77.99	213.6	100	1445.6	77.62
朔州市	4524.7	4108	22.01	0	—	416.7	22.38
合计	20741.7	18665.8	—	213.6	—	1862.3	—

3.9 永定河上游水污染治理指标

根据水利部海河水利委员会 2003 年 6 月所作的《21 世纪初期首都水资源可持续利用规划》山西省实施方案,水污染治理指标与实施年度见表 3-10。水污染治理工程实施后,共削减 COD37809t。其中,朔州市部分永定河支流桑干河减少纳污量 3928t,削减 COD9060t;大同市部分削减 COD27749t,忻州污水集中处理削减 COD1000t,水质有望由目前的 IV、V 类提高到地面水环境 III 类以上。

表 3-10 水污染治理项目

序号	项目	总投资 (万元)	削减 COD (t/年)	实施年度
合计 (50 项)		81100	37809	
点源污染 (33 项)		28900	11404	
1	大同市煤气化总公司废水处理及回用工程	5000	3918	2004-2005
2	大同市云冈焦化厂污水综合治理工程	1000	200	2004
3	大同市矿务局煤气厂废水处理改造工程	300	10	2004
4	大同市树脂厂含汞废水治理工程	1200	15	2004-2005
5	大同市化纤厂废水处理	1500	475	2004-2005
6	山西合成橡胶公司污水集中处理及回用工程	3000	280	2004-2005
7	新大钢铁有限公司废水治理及回用工程	1000	99	2004-2005
8	工农化肥厂清洁生产工程	1000	26	2005
9	浑源县化工责任有限公司两水综合治理工程	665	20	2005
10	阳高化肥厂两水综合治理工程	855	20	2005
11	广灵丰喜肥业有限责任公司废水治理工程	795	200	2004-2005
12	天镇化肥厂两水综合治理工程	885	21	2005
13	大同市氮肥厂废水综合治理工程	800	28	2005
14	大同市同星抗生素厂废水处理工程	1000	14	2005
15	大同市利群制药厂废水处理工程	660	100	2004

3 永定河的环境概况

16	大同市制药厂废水处理工程	1500	80	2004
17	阳高县工矿企业污水综合治理工程	1500	140	2004
18	天镇县工业污水综合治理工程	1100	194	2004
19	医院废水处理 (5 个医院)	420	540	2005
20	大同市皮毛厂废水处理	220	164	2005
大同市 20 项小计		24400	6544	
21	平朔煤炭工业公司废水治理及回用工程	500	900	2005
22	朔城区化肥厂两水治理废水排放达标治理技改工程	300	180	2005
23	朔芳亚麻公司废水治理及回用工程	300	500	2004
24	朔州造纸公司废水治理及回用工程	300	200	2004
25	怀仁县化肥厂废水治理及回用工程	300	180	2005
26	朔城区下窑煤矿废水治理及回用工程	300	200	2005
27	平安化肥公司废水治理及回用工程	300	200	2005
28	皇威电冶公司冲灰水治理工程	300	200	2004
29	山阴县化肥厂废水治理及回用工程	300	180	2005
30	梨花春酿酒公司清洁生产工程	300	160	2004
31	朔城区刘家口煤矿废水治理及回用工程	300	200	2004
32	神头第一发电厂废水处理及回用工程	600	500	2005
33	神头第二发电厂生活污水和工业废水综合治理工程	400	860	2005
朔州市 16 项小计		4500	4860	
二	污水集中处理 (17 项)	52200	25805	
1	大同市东郊污水处理厂扩建工程	8247	6205	2002-2003
2	大同市矿务局赵家小村污水处理厂	6000	3504	2003-2004
3	大同市湖东经济开发区污水处理厂	5572	4358	2002-2003
4	大同市新荣污水处理厂	200	1000	2003
5	大同市广灵县污水处理厂	3509	1022	2002-2003
6	大同市天镇县污水处理厂	1920	694	2003

7	大同市浑源县污水处理厂	2285	1606	2003-2004
8	大同市左云县污水处理厂	2454	204	2002-2003
9	大同市阳高县污水处理厂	2085	1862	2003
10	大同市大同县污水处理厂	1978	750	2004
大同市 11 项小计		34250	21205	
11	朔州市污水处理厂	6610	2600	2003-2004
12	朔州市平鲁区污水处理厂	1880	500	2003-2004
13	朔州市山阴县污水处理厂	1880	500	2003-2004
14	朔州市应县污水处理厂	1880	500	2003-2004
15	朔州市怀仁县污水处理厂	3500	500	2002-2003
朔州市 5 项小计		15750	4600	
16	忻州市神池县污水处理厂	1200	500	2002-2003
17	忻州市宁武县污水处理厂	1000	500	2003-2004
忻州市 2 项小计		2200	1000	

3.10 本章小结

本章介绍了永定河流域的环境概况(包括自然环境和社会环境),分析了桑干河流域生态环境恶化的主要特征,着重分析了近年来桑干河断流的原因,得出以下结论:

(1) 指出目前桑干河水质恶化、部分河段水质为 V 类或超 V 类水,有机污染严重是桑干河流域面临的重大生态环境问题。

(2) 分析了桑干河的入河污染负荷,指出工业废水和城市生活污水的点源排放是河流受到污染的主要途径,所以应采取治理工业废水和生活污水的措施,降低污染物入河的负荷。

(3) 分析了桑干河生态环境的现状,并针对桑干河的断流现象进行重点分析,指出桑干河断流的直接原因是植被破坏、水土流失以及地下水的大量开采引起的地下水位大幅度下降;间接原因是燃煤发电所产生的二氧化硫所造成的污染。

4 桑干河水质污染预测与水环境容量计算

4.1 桑干河污染物各组分含量现状与分析

山西省水环境监测中心分别于 2002 年 3 月、5 月、8 月、10 月及 2003 年 3 月、5 月、8 月、10 月对桑干河干流的东榆林水库、西朱庄、固定桥（桥下）和册田水库（坝上）及支流浑河的贾庄水文站、御河的堡子湾和艾庄、御河支流十里河的高山和观音堂进行了水质监测，监测组分有氯化物、氨氮、化学需氧量及挥发酚。从监测结果来看：在固定桥，两年各月干流氯化物浓度大多超过 250mg/L；氨氮浓度均超过 2mg/L；化学需氧量均超过 40mg/L；挥发酚浓度大多超过 0.1mg/L，2002 年 3 月浓度高达 5.32mg/L。根据国家地面水水质标准(GB3838—2002)，干流水质为地表水超 V 类，重要支流御河水水质为地表水超 V 类，册田水库为 V 类或超 V 类。

4.2 桑干河水质污染预测模型的建立

4.2.1 一维水流运动方程

桑干河河道大致分为两大类：山区型和平原型。忽略水流在横向和垂向的变化，只考虑纵向变化。在求解水质模型之前需推求河道水深。描述一维水流运动的基本方程组为一维 Saint-Venant 方程组^[62]：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + [gA - Bu^2] \frac{\partial Z}{\partial x} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} - u^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (4-2)$$

式中： Q 为流量； A 为水断面面积； t 为时间坐标； x 为空间坐标； q 为旁侧入流流量； g 为重力加速度； B 为河宽； u 为断面平均流速； Z 为水位； n 为糙率； R 为水力半径。

4.2.2 一维水质模型

桑干河从东榆林水库到固定桥长度约为 147km, 从固定桥到册田水库(坝上)长度约为 20.2km。对中小河流的较长河段, 其横向和竖向的污染物浓度梯度可以忽略, 采用只考虑纵向浓度变化的一维模型来模拟河水的水质, 如果水体的水文条件和排污条件所构成的水质状态, 处于稳定, 此时水体污染物的浓度不随时间变化, 采用稳态水质模型。综上所述, 结合氨氮、化学需氧量及挥发酚化学物理特性, 采用一维水质模型。

a. 模型控制方程:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc + c^* \quad (4-3)$$

式中: u —断面平均流速, km/d;

c —污染物浓度, mg/L;

x —河水流经距离, km;

E —纵向弥散系数, km²/d;

k —污染物降解系数, 1/d;

c^* —污染物侧向排污均匀入流的浓度, mg/L/d;

b. 支流汇入处理

将支流汇入看为侧向排污, 根据质量守恒定理, 不考虑汇流口局部的污染物的沉降与再悬浮, 可得汇流后的浓度为:

$$c = \sum_i \frac{W_i}{Q} \quad (4-4)$$

式中: W_i —第 i 条支流侧向排污污染物入流的质量, mg;

Q_i —第 i 条支流与干流混合后的流量, l/s。

c. 离散系数的确定

纵向离散系数是反映河流纵向混合特性的重要参数。天然河流中断面流速分布不均匀是引起水流纵向离散的主要原因。纵向离散系数主要受水流条件、断面特征及河道形态等因素的影响。目前确定离散系数有以下几种方法:

(1) 用断面流速分布资料推算

单宽流量在横向分布计算离散系数的积分表达式为:

$$E_x = -\frac{1}{A} \int_0^W \hat{q}(y) \int_0^y \frac{1}{D_n h(y)} \int_0^y \hat{q}(y) dy dy dy \quad (4-5)$$

式中: A 为横断面面积, W 为河宽, D_n 为横向扩散系数, $h(y)$ 为当地局部水深, $\hat{q}(y)$ 为相对于平均单宽流量的横向坐标为 y 处的单宽流量的偏离值。有了断面上单宽流量在横向分布的资料便可计算离散系数。

(2) 用经验公式估算

当缺乏流速分布资料, 作为粗略估算可用经验公式, 著名的有 Fischer、Mcquivey 和 Keefer、Iwasa 和 Aya、Seo 和 Cheong 等建立的纵向离散系数估算公式, 它们基本上只能适合于特定的水流条件。

(3) 用现场浓度观测资料计算

要较准确地确定特定河流的纵向离散系数, 可以在现场进行示踪试验。但进行一次现场观测所耗费的人力和物力是巨大的, 因而不是一般情况所能做到的。

本研究纵向弥散系数采用 Fischer 公式计算, 即

$$E = 0.011u^2 b^2 / (h\sqrt{ghI}) \quad (4-6)$$

式中: u —平均流速, m/s; b —河宽, m; h —平均水深, m; g —重力加速度, m/s²; I —水力坡降。

4.3 模型的求解

4.3.1 一维水流运动方程的差分求解

采用四点隐式差分格式离散方程组, 以流量作为上边界条件, 以水位作为下边界条件, 分别表示为:

$$\text{流量边界: } Q_1 = Q_1(t) \quad (4-7)$$

$$\text{水位边界: } Z_{n+1} = Z_{n+1}(t) \quad (4-8)$$

对每个河段得到两个差分方程, 辅以边界条件, 得到闭合线性代数方

程组，利用追赶法解得各断面水位及流量。

4.3.2 一维水质方程的解析求解

在初始条件下 $c|_{x=0} = c_0$ ，可求如下积分解：

$$c = (c_0 - \frac{c^*}{k}) e^{\frac{u - \sqrt{u^2 + 4Ek}}{2E} x} + \frac{c^*}{k} \quad (4-9)$$

式中： c_0 —河段起始断面处污染物浓度，mg/L；

4.4 模型的验证及污染物各组分衰减系数的确定

由水质监测资料可看出：桑干河干流重要水质监测断面西朱庄在 2002 年及 2003 年均均为河干，故仅对有水质资料的东榆林水库至固定桥河段和固定桥至册田水库河段考虑。

桑干河一级支流较多，全流域排污口分布较广，但是，重点排污口大多在一级支流附近。污染物主要由这些支流带入桑干河。最终考虑木瓜河、黄水河、大峪河、浑河、口泉河及御河。对御河全河段各组分衰减系数的确定时，其支流十里河作为侧向排污考虑其中。

目前能得到的有桑干河 2002 年和 2003 年水质监测资料及 2003 年桑干河全流域污染物排放净重资料，因此，参数的率定和模型的验证即采用以上数据。

02 年及 03 年水质监测均有 3 月、5 月、8 月、10 月四个水期，现用 02 年数据来率定河道中各组分平均衰减系数，以 03 年数据验证。根据所建立的一维稳态水质模型的积分解，在确定相关变量后，可以直接求出衰减系数，02 年和 03 年各组分平均衰减系数见表 4-1。

表 4-1 02 年和 03 年各组分平均衰减系数 单位：1/d

河段	氨 氮		COD		挥发酚	
	02 年	03 年	02 年	03 年	02 年	03 年
东榆林-固定桥	4.4497	4.5412	—	4.3392	—	1.0647
固定桥-册田水库	15.8866	—	—	14.9922	—	—

注：“—”为无资料率定。

由表 4-1 可以看出, 两年率定的平均衰减系数相对误差较小, 可以用来以后的水质预测。最后采用的东榆林水库至固定桥河段衰减系数为氨氮: 4.4954; 化学需氧量: 4.3392; 挥发酚: 1.0647。固定桥至册田水库河段衰减系数为氨氮: 15.8866; 化学需氧量: 14.9922。

4.5 2003 年排放条件下水质预测及结果分析

4.5.1 桑干河河道断面概化

根据提供的资料, 以划分的河段选取典型横断面并依次将各断面测量资料输入 AutoCAD 画图, 按复合梯形对河道断面进行概化。

4.5.2 计算方案基础资料

25%、50%、75%三个水文频率代表了河流流量、水位三种典型情况, 一般情况下, 河流水质在这三种典型情况之间。根据所掌握的资料, 在三个频率下进行水质预测。

a. 流量及水位资料

桑干河各频率下对应的流量见表 4-2, 水位由水流运动方程求得。

表 4-2 各频率下流量 单位: m^3/s

水文站 \ 频率	25%	50%	75%
东榆林	5.87	3.80	3.02
西朱庄	1.77	1.00	0.52
固定桥	4.01	1.90	1.64
册田	3.13	1.80	1.41
孤山	1.70	1.10	0.93
观音堂	0.59	0.40	0.35
贾庄	0.61	0.30	0.36
吴家窑	0.02	0.02	0.01

b. 干支流各组分初始浓度的确定

论文中采用总量不变原则确定各组分初始浓度,即利用 2003 年桑干河全流域污染物排放净重资料。各频率下支流流量以多年平均流量代替。

4.5.3 预测结果与分析

桑干河在不同频率流量下各组分水质预测成果分别见表 4-3、表 4-4、表 4-5。

表 4-3

各频率下氨氮预测浓度

单位: mg/L

里 程 (km) \ 频 率	25%	50%	75%
0	1.2265	1.8959	2.3878
3.797	0.976	1.4613	1.8083
5.894	0.8615	1.2626	1.5423
7.489	0.782	1.1305	1.3703
7.807	0.7711	1.1118	1.3447
9.583	0.696	0.9951	1.1992
10.648	0.648	0.9186	1.1017
21.047	0.2416	0.3264	0.384
34.886	0.1629	0.2368	0.2922
40.641	0.1526	0.2276	0.2844
48.349	0.148	0.2239	0.2814
53.123	0.1468	0.2232	0.281
59.316	0.1458	0.2227	0.2808
67.383	0.1456	0.2226	0.2808
69.177	0.3643	0.5014	0.6157
69.552	0.3643	0.5014	0.6157
70.073	0.3643	0.5014	0.6157

4 桑干河水质污染预测与水环境容量计算

72.778	0.3643	0.5014	0.6157
75.764	0.3643	0.5014	0.6157
76.951	0.3643	0.5014	0.6157
83.806	0.3643	0.5014	0.6157
91.378	0.3643	0.5014	0.6157
94.931	0.3643	0.5014	0.6157
96.254	0.3643	0.5014	0.6157
96.254	0.3643	0.5014	0.6157
100.001	0.3643	0.5014	0.6157
102.449	0.3643	0.5014	0.6157
104.781	0.3642	0.5014	0.6157
107.385	0.3642	0.5014	0.6157
112.853	0.8097	1.2855	2.1038
115.306	0.8097	1.2855	2.1038
116.146	0.8097	1.2855	2.1038
117.588	0.8097	1.2855	2.1038
118.611	0.8097	1.2855	2.1038
121.377	1.142	1.8908	2.9981
125.063	1.57	2.6194	4.0047
130.384	1.57	2.6194	4.0047
135.107	1.57	2.6194	4.0047
139.791	1.57	2.6194	4.0047
144.126	1.9216	3.1428	4.6456
147.075	1.9216	3.1428	4.6456
167.272	0.2507	0.4357	0.6514

表 4-4 各频率下 COD 预测浓度 单位: mg/L

里 程 (km) \ 频 率	25%	50%	75%
0	31.4021	48.5407	61.1348
3.797	25.1695	37.7122	46.6843
5.894	22.308	32.738	40.0189
7.489	20.3122	29.4116	35.6804
7.807	20.0378	28.9424	35.0379
9.583	16.7105	23.5742	28.1516
10.648	15.3647	21.4216	25.4036
21.047	3.7123	4.3776	4.6855
34.886	1.3395	1.6559	1.8809
40.641	1.0155	1.362	1.6272
48.349	0.8649	1.2387	1.5265
53.123	0.8254	1.2147	1.5142
59.316	0.7923	1.1968	1.5067
67.383	0.7835	1.1942	1.5056
69.177	1.9562	2.6887	3.301
69.552	1.9561	2.6887	3.3009
70.073	1.9567	2.689	3.3011
72.778	1.9554	2.6886	3.3009
75.764	1.9545	2.6883	3.3008
76.951	1.9542	2.6882	3.3008
83.806	1.9532	2.688	3.3007
91.378	1.9529	2.6879	3.3006
94.931	1.9529	2.6879	3.3006

4 桑干河水质污染预测与水环境容量计算

96.254	1.9529	2.6879	3.3006
96.254	1.9528	2.6879	3.3006
100.001	1.9528	2.6879	3.3006
102.449	1.9528	2.6879	3.3006
104.781	1.9528	2.6879	3.3006
107.385	1.9528	2.6879	3.3006
112.853	4.3408	6.8916	11.2785
115.306	4.3408	6.8916	11.2785
116.146	4.3408	6.8916	11.2785
117.588	4.3408	6.8916	11.2785
118.611	4.3408	6.8916	11.2785
121.377	6.1226	10.1371	16.0732
125.063	11.0977	18.6062	27.7753
130.384	11.0977	18.6062	27.7753
135.107	11.0977	18.6062	27.7753
139.791	11.0977	18.6062	27.7753
144.126	17.6514	27.3707	38.0628
147.075	17.6514	27.3707	38.0628
167.272	2.4441	4.0193	5.6505

表 4-5 各频率下挥发酚预测浓度 单位: mg/L

里 程 (km) \ 频 率	25%	50%	75%
0	0.0005	0.0008	0.0011
3.797	0.0005	0.0007	0.001
5.894	0.0005	0.0007	0.001
7.489	0.0004	0.0007	0.0009

7.807	0.0004	0.0007	0.0009
9.583	0.0008	0.0014	0.0018
10.648	0.0009	0.0014	0.0019
21.047	0.0014	0.0024	0.0032
34.886	0.0018	0.003	0.0039
40.641	0.002	0.0032	0.0042
48.349	0.0021	0.0034	0.0044
53.123	0.0021	0.0034	0.0045
59.316	0.0022	0.0036	0.0046
67.383	0.0023	0.0037	0.0047
69.177	0.0057	0.0082	0.0103
69.552	0.0057	0.0082	0.0103
70.073	0.0057	0.0082	0.0103
72.778	0.0058	0.0083	0.0103
75.764	0.0058	0.0083	0.0103
76.951	0.0058	0.0083	0.0103
83.806	0.006	0.0084	0.0104
91.378	0.006	0.0084	0.0104
94.931	0.006	0.0085	0.0105
96.254	0.0061	0.0085	0.0105
96.254	0.0061	0.0085	0.0105
100.001	0.0061	0.0085	0.0105
102.449	0.0061	0.0085	0.0105
104.781	0.0061	0.0085	0.0105
107.385	0.0061	0.0085	0.0105
112.853	0.0136	0.0218	0.0358

115.306	0.0136	0.0219	0.0358
116.146	0.0137	0.0219	0.0359
117.588	0.0137	0.0219	0.0359
118.611	0.0137	0.0219	0.0359
121.377	0.0193	0.0322	0.0511
125.063	0.6271	1.0739	1.4924
130.384	0.6282	1.0745	1.4926
135.107	0.6289	1.0748	1.4928
139.791	0.6294	1.0751	1.4929
144.126	1.2032	1.9368	2.5505
147.075	1.2019	1.9356	2.5497
167.272	—	—	—

注：“—”为浓度无法检出。

a. 各频率下氨氮预测结果与分析

各频率下氨氮沿程变化规律见图 4-1。

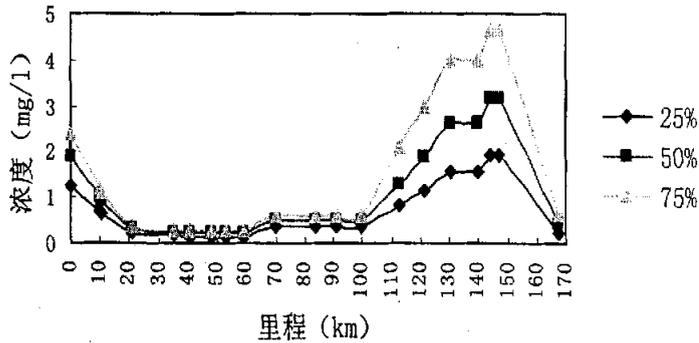


图 4-1 氨氮沿程浓度分布

表 4-3 列出了各频率下氨氮沿程变化值。从图表中可看出：①各频率下氨氮浓度从东榆林到固定桥呈先下降后上升趋势，在固定桥达到河

流最高值，然后在册田水库下降。这主要是由于河流中段支流较少，污染物注入少；固定桥附近支流较多，污染物注入多，氨氮浓度显著增加；而册田水库具有较强的自净和稀释作用。②其中 75% 频率下降幅度较大，这与初始浓度及支流入流浓度有关，初始浓度越大，支流入流浓度较小，下降幅度就大。图 4-1 中大峪河汇入处曲线突然上升，说明该支流氨氮污染较重，以后的支流汇入处曲线均大幅上升，说明这些支流也带给干流较多的污染物，特别是 75% 频率曲线上升幅度最大，25% 频率曲线上升幅度最小。这主要是在污染物总量不变的原则下，干支流不同流量所引起污染物浓度不同所致。③氨氮在 25%、50% 和 75% 频率下在河流上游水质分别为 IV 类、V 类和超 V 类；中游水质好转，分别为 II 类和 III 类；下游氨氮浓度显著增加，水质为 V 类和超 V 类；册田水库水质为 II 类和 III 类。④从图及表中可看出，75% 频率下在固定桥氨氮浓度最高，该频率下河流及支流流量最小，增加了污染物浓度。其他污染物也有相同的规律。⑤不同频率下河流中游由于流量相差不大，故三种频率下河流水质相差较小。

b. 各频率下 COD 预测结果与分析

各频率下 COD 沿程变化规律见图 4-2

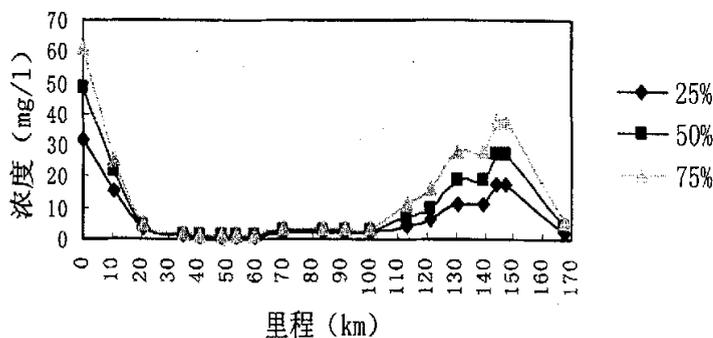


图 4-2 COD 沿程浓度分布

由图 4-2 可以看出，在东榆林处 COD 初始浓度均大于固定桥处浓度，

这是由于源头带来了太多的污染物。在 25%、50%和 75%频率下上游水质为 V类和超 V类，中游水质达到了 I类，下游水质为 III类、IV类和 V类；册田水库水质为 I类。河流 COD 沿程变化与氨氮相似，此处不再赘述。

c. 各频率下挥发酚预测结果与分析

各频率下变化规律见图 4-3

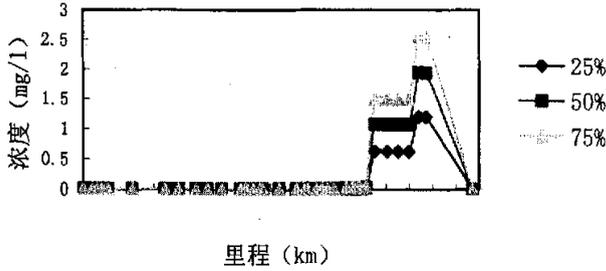


图 4-3 挥发酚沿程浓度分布

由图 4-3 可以看出，从东榆林到沿程 120 公里处，挥发酚浓度均很小，以后浓度显著增加。变化规律与氨氮相似。不同频率下水质均为超 V类，而且超标倍数非常大，需要加强对下游挥发酚排放的控制。

4.6 2010 年排放条件下水质预测及结果分析

4.6.1 桑干河河道断面概化

根据提供的资料，以划分的河段选取典型横断面并依次将各断面测量资料输入 AutoCAD 画图，按复合梯形对河道断面进行概化。

4.6.2 计算方案基础资料

25%、50%、75%三个水文频率代表了河流流量、水位三种典型情况，一般情况下，河流水质在这三种典型情况之间。根据所掌握的资料，在三个水文频率下对 2010 年桑干河东榆林至册田进行水质预测。

(1) 流量及水位资料

桑干河各频率下对应的流量见表 4-6，相关水力要素由式 (1)、(2) 联立求得。

表 4-6 各频率下流量 单位: m^3/s

水文站 \ 频率	25%	50%	75%
东榆林	5.87	3.80	3.02
西朱庄	1.77	1.00	0.52
固定桥	4.01	1.90	1.64
册田	3.13	1.80	1.41
孤山	1.70	1.10	0.93
观音堂	0.59	0.40	0.35
贾庄	0.61	0.30	0.36
吴家窑	0.02	0.02	0.01

(2) 干支流污染物各组分初始浓度的确定

2003 年桑干河全流域污染物排放净重如表 4-7，2010 年山西省永定河上游流域工业发展预测成果如表 4-8，通过表 4-8 和《21 世纪初期首都水资源可持续利用规划》山西省实施方案中关于山西省永定河上游流域污染物治理削减情况确定出 2010 年相对于 2003 年污染物排放比率，从而确定了 2010 年污染物排放净重，再除以对应的各频率流量，计算出上边界处污染物初始浓度。

各频率下支流初始浓度以支流 2010 年污染物排放净重除以对应的流量确定。

表 4-7 2003 年桑干河全流域污染物排放净重 单位: t

河 流 \ 污 染 物	COD	挥发酚	氨氮	总量
源子河	2049	0	30.7	2079.7
口泉河	1759.5	53.2	156.8	1969.5
御河	8905.8	2.1	756.1	9964
十里河	3123.8	153.5	384.2	3661.5
恢河	3768	0.1	196.5	3964.6
合计	19604	208.9	1524.3	

表 4-8 2010 年山西省永定河上游流域工业发展预测成果 单位: 亿元

分区	水平年	工业增加值				工业总 产值	工业增长 幅度
		高用水工业	火电	一般工业	合计		
大同市	2000	22.14	2.41	34.05	58.6	132.37	64
	2010	33.18	24.49	80.62	138.29	216.63	
朔州市	2000	5.49	3.08	5.97	14.54	24.57	294
	2010	8.23	19.39	7.62	35.24	96.77	
忻州市	2000	0.47	0	0.76	1.23	2.93	81
	2010	0.7	0	2.19	2.89	5.29	
流域合计	2000	28.1	5.49	40.78	74.37	159.87	100
	2010	42.11	43.88	90.43	176.42	318.69	

按照首都水资源规划项目, 确定的工业及生活污水控制排放计划, 可以得出到 2010 年预测入河污染物氨氮 1969.9 t、COD21912t、挥发酚 210.7t。

4.6.3 预测结果与分析

桑干河在不同频率流量下各组分水质预测成果分别见表 4-9、表 4-10、表 4-11。

表 4-9

各水文频率下氨氮预测浓度

单位: mg/L

里 程 (km) \ 频 率	25%	50%	75%
0	0.9591	1.4825	1.8672
1.91	0.8622	1.3093	1.6320
4.86	0.7159	1.0629	1.3091
7.10	0.6267	0.9087	1.1027
7.35	0.6169	0.8931	1.0829
7.81	0.6027	0.8694	1.0513
10.41	0.9120	1.3329	1.6324
10.82	0.8531	1.2344	1.5017
32.07	0.024	0.0197	0.0160
37.96	0.0102	0.007	0.0046
43.16	0.0040	0.0023	0.0014
53.17	0.0010	0.0004	0.0001
54.35	0.0008	0.0003	0.0001
65.55	0.0001	0.0001	0.0001
68.97	0.0001	0.0001	0.0001
69.51	0.7691	0.9799	1.1772
69.55	0.7674	0.9777	1.1746
70.18	0.7384	0.9413	1.1317
74.52	0.3889	0.4404	0.4501
76.55	0.2739	0.2860	0.2621

4 桑干河水质污染预测与水环境容量计算

77.11	0.2479	0.2526	0.2240
90.50	0.0169	0.0089	0.0035
92.72	0.0125	0.0062	0.0022
95.39	0.0081	0.0034	0.0010
96.70	0.0064	0.0024	0.0006
99.13	0.0041	0.0013	0.0003
100.93	0.0030	0.0008	0.0001
103.37	0.0019	0.0004	0.0001
105.79	0.0011	0.0002	0.0001
108.81	0.0007	0.0001	0.0001
114.72	1.5661	2.7564	5.2311
116.15	1.1529	1.6094	1.9400
116.77	1.0170	1.4022	1.6986
118.31	0.7250	0.6838	0.5768
118.77	0.6991	0.6619	0.5594
123.70	1.5453	2.3591	3.3163
126.49	2.5410	3.8600	5.2924
134.31	0.6689	0.5032	0.6194
136.54	0.4663	0.2861	0.3432
142.49	0.2159	0.0813	0.0934
144.13	1.4117	1.9034	2.3252
147.08	1.2676	1.7127	2.0931
167.27	0.1654	0.2375	0.2935

表 4-10

各水文频率下 COD 预测浓度

单位: mg/L

里 程 (km) \ 频 率	25%	50%	75%
0	24.5555	37.95737	47.80558
1.91	22.1540	33.6609	41.9709
4.86	18.4984	27.4905	33.8724
7.10	16.2637	23.6225	28.6929
7.35	16.0163	23.2272	28.1892
7.81	15.6613	22.6310	27.3943
10.41	13.1789	18.5522	22.1399
10.82	12.3523	17.2193	20.414
32.07	0.3865	0.309	0.2449
37.96	0.1693	0.1128	0.0736
43.16	0.0684	0.039	0.0223
53.17	0.0182	0.0066	0.0013
54.35	0.0147	0.0048	0.0009
65.55	0.0014	0.0001	0.0001
68.97	0.0006	0.0001	0.0001
69.51	3.9805	5.0707	6.0916
69.55	3.9717	5.0597	6.0784
70.18	3.8243	4.8746	5.8603
74.52	2.0596	2.3414	2.4064
76.55	1.4678	1.5429	1.4268
77.11	1.3332	1.3684	1.2261
90.50	0.0996	0.054	0.0219
92.72	0.0745	0.0377	0.014
95.39	0.0488	0.0212	0.0065

4 桑干河水质污染预测与水环境容量计算

96.70	0.0387	0.0154	0.0042
99.13	0.025	0.0083	0.0018
100.93	0.0189	0.0055	0.001
103.37	0.0122	0.0029	0.0004
105.79	0.0072	0.0014	0.0002
108.81	0.0046	0.0007	0.0001
114.72	8.1045	14.2637	27.0698
116.15	6.029	8.4772	10.3208
116.77	5.3334	7.4061	9.0591
118.31	3.8466	3.6959	3.1725
118.77	3.7116	3.5796	3.0784
123.70	8.0904	12.3074	17.2562
126.49	22.3837	35.654	49.0341
134.31	6.1635	4.9644	6.147
136.54	4.3503	2.8763	3.474
142.49	2.0682	0.8533	0.9885
144.13	23.9332	30.4102	35.6777
147.08	21.5333	27.4158	32.1777
167.27	2.9812	4.0254	4.7764

表 4-11 各水文频率下挥发酚预测浓度 单位: mg/L

里 程 (km) \ 频 率	25%	50%	75%
0	0.0004	0.0006	0.0009
1.91	0.0004	0.0006	0.0009
4.86	0.0004	0.0005	0.0008
7.10	0.0004	0.0005	0.0008

7.35	0.0004	0.0005	0.0008
7.81	0.0004	0.0005	0.0008
10.41	0.0024	0.0036	0.0047
10.82	0.0023	0.0035	0.0045
32.07	0.0009	0.0011	0.0011
37.96	0.0007	0.0008	0.0008
43.16	0.0006	0.0006	0.0006
53.17	0.0004	0.0004	0.0003
54.35	0.0004	0.0004	0.0002
65.55	0.0002	0.0001	0.0001
68.97	0.0002	0.0001	0.0001
69.51	0.0033	0.004	0.0048
69.55	0.0033	0.004	0.0048
70.18	0.0032	0.004	0.0047
74.52	0.0028	0.0033	0.0038
76.55	0.0025	0.003	0.0033
77.11	0.0025	0.0029	0.0032
90.50	0.0013	0.0013	0.0011
92.72	0.0012	0.0011	0.001
95.39	0.0011	0.001	0.0008
96.70	0.001	0.0009	0.0007
99.13	0.0009	0.0008	0.0006
100.93	0.0008	0.0007	0.0005
103.37	0.0008	0.0006	0.0004
105.79	0.0007	0.0005	0.0003
108.81	0.0006	0.0004	0.0002

114.72	0.0068	0.0114	0.0212
116.15	0.0063	0.01	0.0159
116.77	0.006	0.0094	0.015
118.31	0.0055	0.0078	0.0111
118.77	0.0055	0.0077	0.0109
123.70	0.0094	0.0146	0.0209
126.49	0.519	0.8815	1.2185
134.31	0.3754	0.5283	0.7079
136.54	0.3443	0.4604	0.6129
142.49	0.2867	0.3412	0.4496
144.13	0.7509	1.0362	1.2988
147.08	0.7149	0.9866	1.2366
167.27	0.0001	0.0001	0.0001

(1) 各水文频率下氨氮预测结果与分析

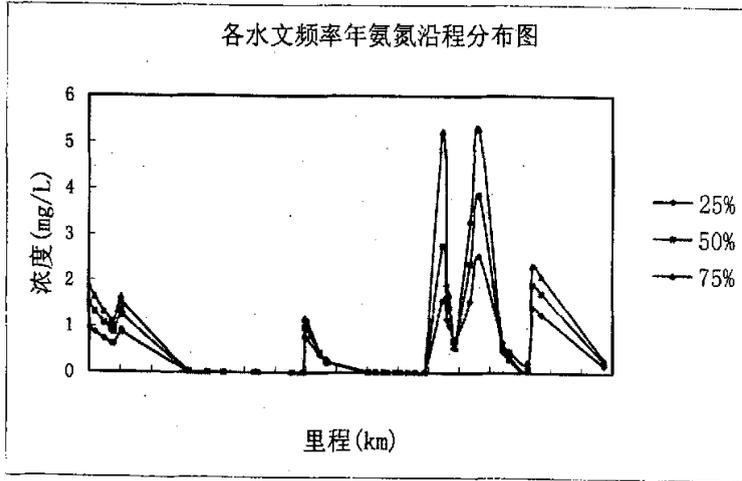


图 4-4 氨氮沿程变化规律图

各水文频率下氨氮沿程变化规律见图 4-4, 从中可看出: ①各频率下氨氮浓度从东榆林 (0km 处) 到固定桥 (约 147km 处) 呈较大波动, 在

口泉河汇入口（约 126.5km 处）达到最高值，然后在册田水库（约 147km~167km）下降。这主要是由于河流上游仅支流木瓜河（约 10.4km 处）汇入，中段仅支流黄水河（约 69.5km 处）汇入，污染物注入少，故桑干河中上游污染物浓度较低；下游支流较多，包括大峪河（约 114.7km 处），浑河（约 123.7km 处），口泉河，御河（约 144.1km 处）附近支流较多，污染物注入多，氨氮浓度显著增加；而册田水库具有较强的稀释和沉降作用，氨氮浓度明显下降。②从上图及表 5 中可看出，75%频率下氨氮浓度沿程相对最高，50%次之，25%最小。主要原因是在 75%频率下河流及支流流量最小，水体所承载的氨氮浓度相对较高。COD 和挥发酚浓度预测也有相同的规律。③不同频率下河流中游由于流量相差不大，故三种频率下河流水质相差不大。

(2) 各水文频率下 COD 预测结果与分析

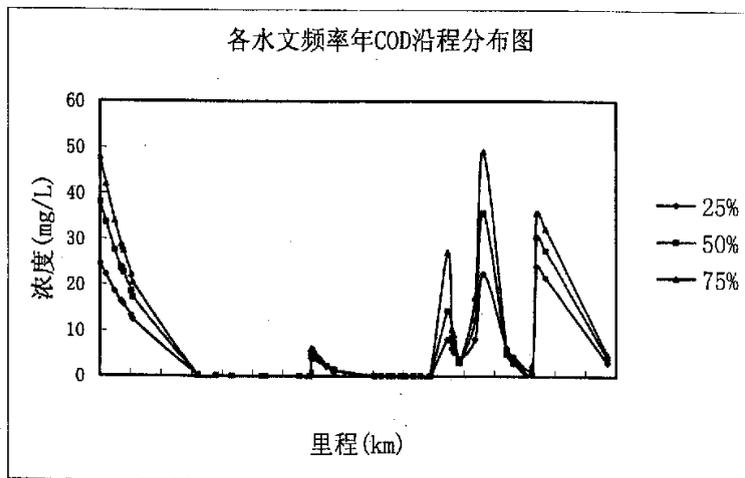


图 4-5 COD 沿程变化规律图

各水文频率下 COD 沿程变化规律见图 4-5，可以看出：在东榆林处 COD 初始浓度较大，这是由于源头带来了较多的污染物。河流 COD 沿程变化与氨氮相似，此处不再赘述。

(3) 各水文频率下挥发酚预测结果与分析

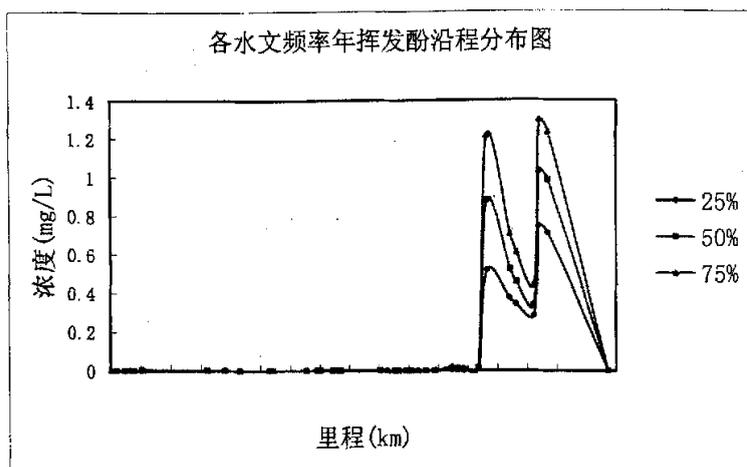


图 4-6 挥发酚沿程变化规律图

各水文频率下挥发酚沿程变化规律见图 4-6，可以看出：从东榆林到沿程 126.5km 处，挥发酚浓度均很小，以后浓度显著增加，并呈波动变化。下游变化规律与氨氮相似。挥发酚超标倍数较大，需要加强对下游挥发酚排放的控制。

4.7 河流水环境容量计算

水环境容量是污染物总量控制的基础，也是水环境治理优化方案的决策依据。河流的水环境容量是指具有某一设计水情的(即某一保证率)河流为维持其水环境质量标准，而允许入河的污染物质的量。本文以一维水流水质模型为基础计算河流的水环境容量。为了确定水环境容量，首先必须确定水环境容量计算的规划设计条件，包括水功能区划和水质保护目标、设计水文条件等。

4.7.1 桑干河水环境功能区划及水质目标选取

a. 水环境功能区划

根据水利部颁布试行的《中国水功能区划》，永定河在山西省共划分 11 个水功能分区一级区。详见表 4-12，4-13。

表 4-12 桑干河流域水功能分区表（一级分区）

分区名称	河流	起始断面	终止断面	长度(km)	现状水质
桑干河山西开发利用区	桑干河	东榆林水库	册田水库	162.1	劣V
恢河山西保护区	恢河	河源	东榆林水库	101	IV
浑河山西保护区	浑河	河源	浑源	29.7	劣V
御河内蒙山西缓冲区	御河	饮马河	堡子湾	8.7	劣V
御河山西开发利用区	御河	堡子湾	利仁皂	57	劣V

桑干河干流、支流各河段依据二级功能区进行河段断面设计，共划分10段，总河长160 km,其划分见表4-13。

表4-13 桑干河河段断面设计

序号	功能区	河流	起始断面	终止断面	长度(km)	现状水质	水质目标
1	恢河山西保护区	恢河	河源	东榆林水库	14.4	劣V	II
2	桑干河山西农业用水区	桑干河	东榆林水库	木瓜河汇入口	9		III
3	桑干河山西开发利用区	桑干河	木瓜河汇入口	西朱庄	60.55		III
4	桑干河山西开发利用区	桑干河	西朱庄	浑河汇入口	48.76		III
5	浑河山西保护区	浑河	贾庄	浑河汇入口		劣V	II
6	桑干河山西开发利用区	桑干河	浑河汇入口	口泉河汇入口	3.5		III
7	桑干河山西开发利用区	桑干河	口泉河汇入口	御河汇入口	20.68		III
8	御河排污控制区	十里河	观音堂	御河汇入口		劣V	IV
9	桑干河山西过渡区	桑干河	御河汇入口	固定桥	4.61		III
10	桑干河山西饮用水源区	桑干河	固定桥	册田水库	20.19	劣V	II

b. 水质目标

根据桑干河实际情况及各方面因素, 选取氨氮、挥发酚、COD 及氯化物作为主要指标。根据《桑干河流域水环境保护规划》, 并参照 GB3838-2002《国家地表水水质标准》, 确定其各功能区的水质保护目标, 详见表 4-14。

表 4-14 GB3838-2002 《国家地表水水质标准》

(单位: mg/L)	I	II	III	IV	V
COD≤	15	15	20	30	40
氨氮≤	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
挥发酚≤	0.002	0.002	0.005	0.01	0.1

4.7.2 水环境容量的计算

水环境容量按降解机理可分为稀释容量和自净容量。所谓稀释容量是指污水和天然水体混合过程中, 污染物浓度由高到低, 显示天然水体对污染物有一定的稀释能力; 当水体通过物理稀释作用使污染物达到水质目标时, 所能容纳污染物的量就称为稀释容量。而自净容量是指水体通过物理、化学及生物等作用对污染物所具有的降解和无害化能力。

1) 河流环境容量公式推求

1) 稀释容量 E_1

根据节点物质平衡原理, 污染物排入河流后的混合浓度为:

$$C = (Q_E \times C_E + Q_S \times C_S) / (Q_E + Q_S) \quad (4-10)$$

式中: Q_E —废水排放流量 m^3/s ;

Q_S —河流流量 m^3/s ;

C_E —废水浓度 mg/L ;

C_S —河流来水(背景)浓度 mg/L 。

令混合浓度 C 为水质标准 S , 则污染物的排放量和水质标准有如下关系。

$$Q_E \times C_E = S \times (Q_E + Q_S) - Q_S \times C_S \quad (4-11)$$

$$E_1 = S \times (Q_E + Q_S) - Q_S \times C_S \quad (4-12)$$

2) 自净容量 E_2

河流自净容量是指：给定某一距离 $L(\text{km})$ 的河段，流速为 $V(\text{m/s})$ ，满足段末不同水质标准 S ，该河段内污染物的净化数量；因此该河段的净化容量 E_2 可定义为：

$$\begin{aligned} E_2 &= \langle \text{河段初始浓度} - \text{段末浓度} (\text{取水水质标准 } S) \rangle \times \text{流量} \\ &= S \times (e^{kL/V} - 1) \times (Q_E + Q_S) \end{aligned} \quad (4-13)$$

式中：

k — 综合自净系数 $1/\text{d}$ ；

Q_E — 污染源平均排放量 m^3/s ；

Q_S — 河水设计流量 m^3/s ；

V — 河水平均流速 m/s 。

3) 总容量 E

$$E = E_1 + E_2 \quad (4-14)$$

4.7.3 结果与分析

a. 污染物环境容量计算结果

污染物容量是指 COD、氨氮、挥发酚的水环境容量。不同流量对应的年、各月的污染物水环境容量计算结果见表 4-15 至表 4-16。

b. 结果分析

根据模型计算结果来看，桑干河主干流固定桥—册田水库断面的氨氮、COD 及挥发酚均严重超标；东榆林—西朱庄断面的氨氮及 COD 也严重超标；相对而言，西朱庄—固定桥断面情况稍好。同时可见，75% 频率情况下污染情况尤其严重；估计主要是因为河流流量较小而引起的。

表 4-15 不同频率下氨氮、COD 及挥发酚的环境容量 单位:t

频率	断面	东榆林—木瓜河—西朱庄	木瓜河—西朱庄	西朱庄—浑河—西朱庄	浑河—西朱庄—西朱庄	口泉河—西朱庄—西朱庄	御河—西朱庄—西朱庄	御河—西朱庄—西朱庄	固定桥—册田水库
		东榆林—木瓜河—西朱庄	木瓜河—西朱庄	西朱庄—浑河—西朱庄	浑河—西朱庄—西朱庄	口泉河—西朱庄—西朱庄	御河—西朱庄—西朱庄	御河—西朱庄—西朱庄	固定桥—册田水库
25%	氨氮	27.92	64.73	144.26	-4.97	-21.38	-102.89	-156.63	
	COD	-714.44	1379.64	3213.31	1293.16	1516.63	1974.36	988.23	
	挥发酚	1.18	0.87	0.48	-1.05	-48.75	-182.42	-150.24	
50%	氨氮	-37.28	8.55	107.03	-31.65	-54.46	-165.87	-142.38	
	COD	-2018.66	374.2	2395.69	632.84	813.17	864.82	200.43	
	挥发酚	0.86	0.54	0.34	-1.09	-50.0	-182.2	-114.36	
75%	氨氮	-61.89	-11.19	85.99	-50.92	-72.97	-234.44	-198.32	
	COD	-2510.65	-345.03	289.36	340.16	470.9	289.2	-554.42	
	挥发酚	0.72	0.41	0.31	-1.26	-46.18	-188.71	-129.75	

表 4-16 不同频率各月氨氮的环境容量 单位:t

断面	东榆林—西朱庄			西朱庄—固定桥			固定桥—册田水库		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
1	-3.58	2.86	-12.21	1.37	1.37	1.37	-4.64	-4.19	-9.84
2	2.86	-0.38	-2.26	1.38	190.84	1.37	-9.35	-1.59	-35.48
3	9.82	-6.59	15.76	31.85	154.14	1.37	-5.66	-7.38	-29.69
4	-5.93	-9.71	-12.47	33.0	1.37	1.37	-12.58	-8.25	-8.36
5	-11.87	-8.1	-12.36	38.57	1.37	1.37	-32.86	-7.70	-11.02
6	37.82	-0.92	-12.38	32.97	31.68	1.37	-33.58	-5.23	-12.71
7	38.65	-6.22	2.22	36.53	0.46	32.63	-33.24	-57.95	-28.07
8	6.99	4.83	-7.82	45.62	34.03	637.48	-11.10	-10.97	-42.13
9	-10.99	14.53	2.86	1.37	1.37	31.63	-4.41	-38.37	-5.34
10	2.86	-1.98	0.31	1.37	1.37	499.54	-5.33	-19.10	-11.09
11	11.48	6.39	5.20	292.27	56.60	1.37	-0.80	-10.90	-0.85
12	2.86	-6.73	2.86	1.37	1.37	1.37	-1.67	-6.42	-2.72

表 4-17 不同频率各月 COD 的环境容量 单位:t

断面	东榆林—西朱庄			西朱庄—固定桥			固定桥—册田水库		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
1	-177.97	0	-350.25	0	0	0	19.60	-1.49	-38.79
2	0	-113.65	-151.37	1.36	33.49	0	23.94	3.43	-159.80
3	90.22	-268.67	209.18	653.93	33.92	0	21.19	-12.59	-129.97
4	-224.68	-300.27	-355.50	695.07	0	0	21.25	-16.09	-33.64
5	-343.47	-268.10	-353.31	827.09	0	0	-11.34	-13.66	-27.12
6	650.29	-124.50	-353.6	105.22	679.09	0	16.19	-5.0	-54.31
7	735.11	47.80	-61.76	783.30	928.22	721.81	16.43	-179.45	-126.94
8	33.65	-9.45	-262.41	1004.08	745.18	30.35	23.23	-23.51	-200.55
9	-325.95	203.50	0	0	0	696.61	16.51	-124.40	-14.20
10	0	-145.66	-99.95	0	0	30.94	21.53	-53.25	-43.45
11	123.53	21.75	-2.07	32.50	43.68	0	12.99	-23.23	-6.55
12	0	-240.70	0	0	0	0	15.90	-11.20	-17.70

表 4-18 不同频率各月挥发酚的环境容量 单位:t

断面	东榆林—西朱庄			西朱庄—固定桥			固定桥—册田水库		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
1	0.18	0	0.23	0.01	0	0	-4.33	-3.21	-5.83
2	0	0.2	0.19	-0.01	0.95	0	-134.17	-1.68	-20.82
3	0.27	0.16	0.31	0.15	0.77	0	-5.22	-5.47	-17.5
4	0.17	0.05	0.02	0.14	0	0	-10.96	-6.13	-4.93
5	0.4	0.16	0.03	0.15	0	0	-26.73	-5.70	-6.50
6	0.46	0.2	0.02	0.16	0.13	0	-29.48	-3.95	-7.47
7	0.46	0.26	0.22	0.15	0.13	0.11	-29.2	-36.18	-17.08
8	0.25	0.24	0.16	0.17	0.13	3.19	-9.79	-8.05	-25.22

9	0.06	0.31	0.01	0.02	0	0.12	-4.11	-26.80	-3.28
10	0	0.19	0.21	0	0	2.5	-5.0	-13.73	-7.04
11	0.28	0.25	0.24	1.46	0.28	0	-0.92	-8.0	-0.32
12	0	0.17	0	0	0	0	-1.75	-5.24	-1.68

4.7.4 污染负荷削减量计算

选取最不利点(75%频率下)对应的水环境容量进行污染负荷削减量计算,结果见下表 4-19。

表 4-19 污染负荷削减量计算结果 单位: t

污 染 物	氨氮	COD	挥发酚
预测入河	3939.8	43824	421.4
容许入河	1425	17525.33	0
削减量	544.74	26298.67	421.4
削减率 (%)	27.15%	20.19	100%

4.8 本章小结

本章首先介绍了河流各组分水质监测情况,在固定桥处干流水质为地表水超 V 类,重要支流御河水质为地表水超 V 类。针对桑干河的实际情况,文中建立了一维稳态水质模型,并对模型进行了简化,求解容易,所需原始资料也大为减少,通过河道水质监测数据的验证,效果良好。弥散系数确定的恰当与否是影响求解结果好坏的一个重要因素,弥散系数的确定有很多方法,但各有自己的适用之处,文中选用了较为常用的弥散系数计算公式。

三个频率下污染物预测结果表明:

(1) 频率小,干支流对应的流量大,支流将带来较小浓度的污染物,干流的较大流量有助于污染物的稀释。

(2) 氨氮及 COD 在河流的上中游沿程有下降趋势, 这与初始浓度及支流入流浓度有关。挥发酚上中游沿程变化不大。

(3) 三个频率下, 河流中游水质相对较好, 水质达到 IV 类。综合考虑三种组分, 河流上游及下游水质均为 V 类和超 V 类, 册田水库具有较强的自净作用, 在三个频率下, 水质为 II 类和 III 类。

(4) 从计算结果来看, 从支流大峪河汇入处, 污染物浓度明显上升, 在御河汇入后为最, 应加强对下游流域的污染控制和治理。

其次将桑干河流域水环境容量的计算方法与一维水流——水质计算方法相结合, 把水环境容量分为自净容量和稀释容量两部分, 分别确定了自净容量和稀释容量的计算方法, 并取不同频率情况计算了污染物: 氨氮、COD 及挥发酚的水环境容量。结果表明, 不同情况下桑干河流域的氨氮、COD 及挥发酚的含量均严重超标。三项指标均分别需要削减 27.15%、20.19%、100%。

5 桑干河流域生态环境需水量

5.1 生态环境需水量的研究内容

山西省桑干河流域地处我国黄土高原干旱半干旱区，水资源开发利用与生态环境矛盾十分突出，同时水资源供需矛盾形势十分严峻。根据上述的定义和方法原则分析，结合桑干河流域实际情况，山西省桑干河流域生态环境需水量的研究内容应该包括生态需水量和环境需水量。其中生态需水量包括维持河流生态系统的生态基流、河流水面蒸发生态需水量、河流入渗生态需水量；环境需水量包括维持河流水沙平衡需水量、桑干河干流污染物自净需水量、地下水超采回补需水量等。如图 5-1 所示。

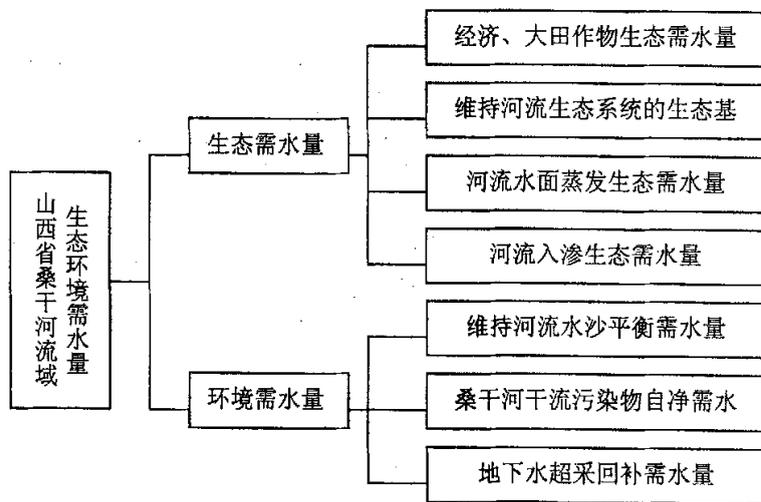


图 5-1 山西省桑干河流域生态环境需水量结构图

5.2 生态环境需水量的计算方法

1. 经济、大田作物生态需水量

通常北方地区的农作物需水是由灌溉渠系来提供的，而对于一些经

济作物,若水量得不到及时补充就会枯萎死亡,导致生态破坏。因此要维持作物生长需要,就必须通过水库或在河流上新建水泵提取河水灌溉。在桑干河流域有许多灌区,为保证经济作物的正常生长,河流内必须要预留一部分水量。根据某一灌区的单位面积的需水定额乘以相应的有效灌溉面积求得经济、大田作物的生态需水量。

2. 维持河流生态系统的生态基流

河流生态系统的生态基流即维持山西省桑干河流域河流系统最基本的生态环境功能的最小水量。河流基本的生态环境需水量主要用以维持水生生物的正常生长,以及满足部分的排盐、入渗补给、污染自净等方面的要求。对于常年性河流而言,维持河流的基本生态环境功能不破坏,就是要求年内各时段的河川径流量都维持在一定的水平上,不出现诸如断流等可能导致河流生态环境功能破坏的现象。以河流最小月平均实测径流量的多年平均值作为河流的生态系统的生态基流。取计算公式^[49]为:

$$W_b = \frac{T}{n} \sum_{i=1}^n \min(Q_{ij}) \times 10^{-8} \quad (5-1)$$

式中, W_b ——年河流基本生态环境需水量 (10^8m^3);

Q_{ij} ——第 i 年第 j 月的月平均流量 (m^3/s);

n ——统计年数;

T ——换算系数,基值为 $31.536 \times 10^6 \text{s}$ 。

3. 河流水面蒸发生态需水量

河流的水面蒸发是河流水量消耗的重要方式之一,这需要一定的水量用于维持河流系统正常的环境功能。当水面蒸发高于降水时,通过水面蒸发量与降水量差值所计算的消耗于蒸发的净水量,称之为水面蒸发用水量。当降水量大于蒸发量时,就认为蒸发生态用水量为零^{[50]、[51]}。其计算公式为:

$$\begin{aligned} W_E &= A(E - P) \times 10^{-11} & E > P \\ W_E &= 0 & E < P \end{aligned} \quad (5-2)$$

式中, W_E 为水面蒸发用水量 (10^8m^3); A 为各月平均水面面积 (m^2);

E 为各月平均蒸发量(mm), 由 E601 水面蒸发器测定结果计算而得; P 为各月平均降水量(mm)。

4. 河道渗漏补给量

河道渗漏补给量的公式为:

$$Q_{\text{河}} = Q_{\text{来水}} \times M_{\text{河}} \quad (5-3)$$

式中: $Q_{\text{来水}}$ —河道来水量;

$M_{\text{河}}$ —河道渗漏补给系数。

河道渗漏补给系数的计算主要引用 38—05—07 课题即“大同市御河平原段河道渗漏模型”中线性模型的成果。它假定: 河道渗漏段内损失均匀, 沿程流量按等比级数递减。河道对应各流量的渗漏补给系数参考表 5-1。

表 5-1 河道渗漏系数 $M_{\text{河}}$ 值表

$Q_{\text{上}}$ (立方米/秒)	<2.0	2.0~6.0	6.0~12.0	>12.0
$M_{\text{河}}$	0.467	0.323	0.231	0.178

5. 维持河流水沙平衡需水量

维持水沙平衡(主要是指河流中下游的冲淤平衡、输沙排沙), 维持冲刷与侵蚀的动态平衡, 需要一定的生态环境用水量与之匹配, 这部分水量就称之为水沙平衡用水^[49]。在一定的输沙总量要求下, 输沙水量取决于水流含沙量的大小。

桑干河是多泥沙河流, 必须考虑输沙需水量。由于水流含沙量的多少、流量的大小以及其他水沙动力条件的不同而不同, 输沙水量也因此发生相应的变化。汛期的输沙量约占全年输沙总量的 80%以上, 即河流的输沙功能主要在汛期完成。因此, 忽略非汛期较小的输沙水量, 通过人工调水调沙手段的作用下, 充分利用汛期洪水较强的输沙能力完成输沙要求, 以维持河流形态的动态平衡, 必将有利于水资源最大限度的开发利用。在上述假设前提下, 本文把汛期用于输沙的水量计算为河流生态环境需水量的一部分, 并取河流汛期输沙用水量的公式如下:

$$W_s = 0.1 \times n S_i / \sum_i^n \max(C_{ij}) \quad (5-4)$$

式中, W_s 为输沙用水量(10^8m^3); S_i 为多年平均输沙量(10^4t); C_{ij} 为第 i 年 j 月的月平均含沙量(kg/m^3); n 为统计年数。

6. 桑干河干流、支流自净环境需水量

河流水质被污染, 将使河流的生态环境功能遭受直接的破坏, 因此河道内必须留有一定的水量来维持水体的自净功能, 保证河流水质达标。这在河流生态环境需水量研究中, 是国内外学者关注的一个重要方面。目前主要采用以下几种方法进行计算研究^[52]。

(1) 7Q10 法。美国的 7Q10 法是指采用 90% 保证率最枯连续 7 天的平均水量作为河流最小流量设计值。该方法在 20 世纪 70 年代传入我国, 主要用于计算污染物允许排放量, 应用于许多大型水利工程建设的环境影响评价中。由于该方法的标准要求比较高, 鉴于我国经济发展水平比较落后、南北方水资源情况差别较大的现状, 我国对其进行了修改。GB3839—83《制订地方水污染物排放标准的技术原则和方法》规定: 一般河流采用近 10 年或 90% 保证率最枯月平均流量作为河流环境用水。

(2) Tennant 法。Tennant 法也叫 Montana 法, 是非现场测定类型的标准设定法。这种方法简单易行, 便于操作, 适应任何有季节性变化的河流。该方法设有 8 个等级, 推荐的基流分为汛期和非汛期, 推荐值以占径流的百分比作为标准。当河流径流水平低于此值时, 便认为不能保证河流水质符合要求或会造成河流生态系统受损。由表 4-2 中可看出, 河流的月平均流量与多年统计的月径流量之比的下限是 10%, 即河流的最小流量不得低于多年平均月径流量的 10%, 否则, 河流水环境质量将得不到保障。

表 5-2 保护水生生态等有关环境资源的河流流量状况标准

流量描述	推荐的基流 (10—3) 平均流量百分比/%	推荐的基流 (4—9) 平均流量百分比/%
最大	200	200
最佳范围	60—100	60—100
极好	40	60
非常好	30	50
好	20	40
中或差	10	30
差或最小	10	10
极差	0—10	0—10

5.3 桑干河流域生态环境需水量的计算

5.3.1 河道内生态环境需水量的计算

河道内生态环境需水量应按生态需水量、环境需水量分别计算。而生态需水量、环境需水量又按时段和河段分别计算。

1) 河道内生态需水量

不同时段(t)、不同河段(i)的河道内生态需水量 $W_{p_1}(t, i)$ 主要包括: a. 维持河流生态系统的生态基流 $W_j(t, i)$; b. 维持河流水面蒸发所需的生态需水量 $W_e(t, i)$; c. 维持河道渗漏所需的生态需水量 $W_s(t, i)$ 。

I 维持河流生态系统的生态基流 $W_j(t, i)$

由于河流系统生态环境需水量受到河流系统功能的制约。对生态环境功能要求越高, 河流的生态环境需水量也就越大, 即使属于同一河流系统, 在不同区段起到的生态功能也不同, 因而不同的区段上, 其生态环境需水量也相应不同。为此, 本次在桑干河干流选择了东榆林等四个断面, 在桑干河一级支流上选择了贾庄等四个断面进行生态基流量计算。计算结果如

表 5-3 所示。

表 5-3 多年平均值下桑干河典型断面生态基流计算

测站		河流生态基流			
		统计年份	年数	最小月平均流量的多年平均值 (m^3/s)	年河流生态基流 ($10^8\text{m}^3/\text{a}$)
桑干河断面	东榆林	1984-2003	20	0.622	0.196
	西朱庄	1984-2003	20	0.168	0.053
	固定桥	1984-2003	20	0.436	0.137
	册田	1984-2003	20	0.471	0.149
浑河	贾庄	1984-2003	20	0.184	0.058
御河	孤山	1984-2003	20	0.215	0.068
	观音堂	1984-2003	20	0.075	0.024
大峪河	吴家窑	1984-2003	20	0.0154	0.005

II 维持河流水面蒸发所需的生态需水量 $We(t,i)$

通过调查测量河道水面面积，分析研究典型年的逐日水面蒸发量，依据河的水位计算其水面面积，由水面蒸发量和河水面面积计算河流的蒸发水量。河流的水面蒸发是河流水量消耗的重要方式之一，这需要一定的水量用于维持河流系统正常的环境功能。当水面蒸发量高于降水量时，通过水面蒸发量与降水量差值所计算的消耗于蒸发的净水量，称之为水面蒸发用水量，为维持河流系统的正常生态功能，必须从流域河道水面系统以外的水体来弥补。根据水面面积、降水量、水面蒸发量，可求得相应各月的蒸发生态需水量。计算结果如表 5-4 所示：

表 5-4 水面蒸发量计算表

河系	站名	地点	计算水面积 (km ²)	代表站年水面蒸发量(mm)	水面年蒸发量(亿 m ³)
桑干河	东榆林水库	山阴	6.47	738.15	0.048
	东榆林—西朱庄	应县	2.99	726.17	0.022
	西朱庄—固定桥	大同	2.43	708.29	0.017
	固定桥—册田水库	大同	8.32	704.64	0.059
	册田水库	阳高	34.90	704.64	0.246
总量					0.392

备注：代表站年水面蒸发量是根据当地气象站采用 $\phi 20\text{cm}$ 仪器观测得到

III 维持河道渗漏所需的生态需水量 $W_s(t, i)$

水资源短缺造成了各地地下水的大规模开采，出现了严重的超采状况，地下水含水层大面积疏干，形成大面积区域性地下水位下降及城市附近地区地面下沉，许多地区出现了地下水漏斗，地下水位下降十分严重。对于河道来说，当河道水位高于两岸地下水位时，河道将通过渗漏补给地下水。计算结果见表 5-5、5-6、5-7。

表 5-5 桑干河（25%年份）河道渗漏量计算结果表

断面	Q(x10 ⁴ m ³ /d)												总计 (亿 m ³ /a)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
东榆林	10.27	0.00	16.75	7.98	2.87	20.35	20.68	14.75	4.28	0.00	17.92	0.00	0.349
西朱庄	0.00	0.02	5.08	7.56	14.26	4.16	10.86	13.69	0.00	0.00	0.44	0.00	0.171
固定桥	6.214	8.233	7.47	10.77	18.80	20.76	20.56	9.63	5.81	7.10	1.45	2.58	0.361
册田	0.00	0.00	6.17	17.82	7.51	11.50	16.04	6.74	1.90	0.11	9.01	1.73	0.238
合计	16.48	8.25	35.46	44.14	43.14	43.43	56.76	68.13	44.81	11.98	7.21	28.83	1.120

表 5-6 桑干河（50%年份）河道渗漏量计算结果表

断面	Q(x10 ⁴ m ³ /d)												总计 (亿 m ³ /a)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
东榆林	0.00	13.40	5.83	6.17	5.86	12.87	15.25	13.23	20.76	11.83	14.33	7.20	0.367
西朱庄	0.00	0.57	0.65	0.00	0.00	6.92	16.74	9.74	0.00	0.00	1.49	0.00	0.112
固定桥	2.91	1.57	4.88	5.41	5.08	3.55	15.83	7.14	16.38	8.40	7.10	4.68	0.251
册田	0.00	0.00	5.29	13.62	0.00	0.00	0.00	0.00	15.27	22.55	0.00	0.00	0.172
合计	2.91	15.53	16.65	25.20	10.94	23.34	47.82	30.11	52.41	42.79	22.92	11.88	0.902

表 5-7 桑干河（75%年份）河道渗漏量计算结果表

断面	Q(x10 ⁴ m ³ /d)												总计 (亿 m ³ /a)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
东榆林	2.22	11.55	20.96	1.45	1.86	1.82	15.94	6.14	0.00	14.07	13.49	0.00	0.273
西朱庄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.26	0.30	7.76	7.76	0.00	0.00	0.055
固定桥	3.95	9.66	8.12	3.35	4.40	5.04	7.93	11.69	2.26	2.26	0.44	1.21	0.192
册田	0.00	0.00	6.17	14.68	5.78	5.37	14.79	5.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.160
合计	6.17	21.21	35.21	19.48	12.03	12.23	47.92	23.58	10.02	19.16	13.94	1.21	0.680

2) 河道内环境需水量

不同时段(t)、不同河段(i)的河道内环境需水量 $Wp_2(t,i)$ 主要包括：d. 维持河流水沙平衡需水量 $Wn(t,i)$ ；e. 桑干河干流、支流自净环境需水量 $Wz(t,i)$ 。

I 维持河流水沙平衡需水量 $Wn(t,i)$

桑干河输沙有悬移质、推移质和跃移质，目前水文观测资料仅限于悬移质，观测数据小于实际沙量。桑干河流域多年平均输沙量 4676 万 t（含上游境外来沙），年均出省沙量 1575 万 t（包括壶流河出省沙量 83 万 t）。输沙主要集中在汛期，约占年输沙总量的 80%。沙量（境内）主

要来源于御河、吴城河、古城河、浑河。由于受降水和风力因素的影响，输沙量年际变化较大。桑干河多年平均值下河流输沙需水量见表 5-8。

表 5-8 多年平均值下桑干河输沙需水量

测站		河流输沙需水量						输沙排盐 需水量 (10^8m^3)
		输沙量			含沙量			
		统计 年份	年数	多年平均 输沙量 (10^8kg)	统计 年份	年数	最大月均含 沙量的多年 均 值 (kg/m^3)	
桑干 河断 面	东榆林	1994-2003	10	10.268	1994-2003	10	6.3972	1.6051
	西朱庄	1984-2003	20	4.216	1984-2003	20	27.6235	0.1526
	固定桥	1984-2003	20	13.992	1984-2003	20	41.04	0.3409
	册 田	1984-2003	20	—	1984-2003	20	—	—
浑河	贾 庄	1984-2003	20	2.472	1984-2003	20	56.809	0.0435
御河	孤 山	1984-2003	20	0.424	1984-2003	20	63.818	0.0066
	观音堂	1984-2003	20	4.738	1984-2003	20	60.408	0.0784

II 桑干河干流、支流自净环境需水量 $W_z(t, i)$

为了进行比较，在表 5-9 和 5-10 分别列出按最枯月平均流量法和 Tennant 法（采用 1984-2004 近 20 年平均流量的 10%）计算出的桑干河最低生态环境需水量。

表 5-9 生态环境需水量(最枯月平均流量法)

		流量 $Q(90\%)$ (m^3/s)	近十年最枯月平均流量 (m^3/s)
桑干河 断面	东榆林	0.71	0.625
	西朱庄	0.003	0.137
	固定桥	0.18	0.546
	册 田	0.0725	0.3504
浑 河	贾 庄	0.023	0.173
御 河	孤 山	0.22	0.169
	观音堂	0.044	0.1034
	吴家窑	0.002	0.024

表 5-10 河道最低需水量(Tennant 法) 单位: m^3/s

断面	纳污稀释需水量 (近 20 年平均流量 10%计)
东榆林	0.459
西朱庄	0.130
固定桥	0.335
册田	0.241
贾庄	0.051
孤山	0.134
观音堂	0.051
吴家窑	0.0017

按环境功能设定法计算在表4-12中列出了按环境功能法排污达标和现状排放状况时的纳污稀释需水量计算结果。

根据 2000 年山西省水环境监测中心、山西省水文水资源勘测局的统计资料沿桑干河 4 个断面的废污水排放情况如下表 5-11 所示:

表 5-11 2000 年污水排放量 单位: $10^8 \text{m}^3/\text{a}$

断面	东榆林	西朱庄	固定桥	册田	合计
污水排放量	0.7393	0.0202	0.6475	0.0083	1.4153

根据桑干河以有机污染物(COD)为主的特征,桑干河水质要求及主要控制指标设计如下:水质类别,III级;主要控制指标,COD;设定保证率 $p_0 \geq 90\%$ 。

由主要控制指标的污水排放标准与河流水环境标准可知,河流的稀释系数一般不得低于 5。所以本文取 $\lambda = 5$ 。按照不等式(7),2000 年桑干河各小段及干流仅满足纳污功能的河道最小环境需水量计算结果如下表 5-12 所示:

表 5-12 桑干河各小段及全段满足纳污功能的最小环境需水量 单位: $10^8 \text{ m}^3/\text{a}$

典型断面	东榆林	西朱庄	固定桥	册田	全河段	
现状年河道污染物自净需水量 ($Q_v \geq 1Q_w$)	3.6965	0.101	3.2375	0.0415	7.0765	
现状年实际流量 (Q_t)	0.8702	0.1702	0.9572	0.3063	2.3039	
不同水文年河道污染物自净需水量 $Q_v \geq Q_n(p)$ 设定保证率大于 90% 的河道流量 Q_t	25%	1.8524	0.5585	2.1814	0.9885	5.5808
	50%	1.4081	0.3357	1.4772	0.6625	3.8835
	75%	0.9515	0.1625	1.0336	0.4453	2.5956
	多年平均	1.4476	0.4097	1.8082	0.7595	4.4250

由上表可以看出, 现状年桑干河满足纳污功能的最小环境需水量为 7.0765 亿立方米, 而实际流量为 2.3039 亿立方米, 比环境需要的最小水量少 67.4%。也就是说, 在不考虑桑干河环境容量背景值的情况下, 2000 年除西朱庄和册田外, 从桑干河源头到东榆林、从西朱庄到固定桥排入桑干河的废污水, 远远超出相应河段河水稀释降解能力的范围, 按照河道实际流量, 上述 2 个河段分别需消减 76%、70% 的废污水, 才能满足桑干河河段的环境功能要求。

在设定保证率达 90%, 频率为 25%、50%、75% 及多年平均水文年的情况下, 桑干河河道各小段的实际流量如表 4-12 所示, 桑干河总的实际流量分别为 5.58 亿 m^3/a 、3.88 亿 m^3/a 、2.60 亿 m^3/a 、4.43 亿 m^3/a , 也即按照上述计算方法所要求的最小环境需水量。桑干河河道最小环境需水量的概算结果表明, 为满足最小环境功能的要求, 沿桑干河 4 个河段的废污水排放量必须低于现状年。在频率为 25%、50%、75% 及多年平均水文年, 东榆林、西朱庄、固定桥、册田 4 个河段允许排入桑干河的废污水分别为: 1.12 亿 m^3/a 、0.78 亿 m^3/a 、0.52 亿 m^3/a 、0.89 亿 m^3/a 。

从以上计算结果可以看出, Tennant 法各断面纳污稀释需水量较小, 最枯月平均流量法考虑因素也欠细致, 对于我国河流的具体实际情况而言, 以这种河流最小流量达到水质目标难以实现。

3) 河道内生态环境需水量

上述河道内生态、环境需水量有不同的时间空间上的水量水质需求,总需水量并不是各项的简单相加。上述第 a、d、e 项属河道内生态环境需水量存在相互包含关系,满足这三方面的生态环境需水量可取 3 项中的最大值,而维持河流水面蒸发所需的生态需水量以及河道渗漏所需的生态需水量是各自独立的,因此总需水量为:

$$Wp = \max(Wj(t,i), Wn(t,i), Wz(t,i)) + We(t,i) + Ws(t,i) \quad (5-5)$$

计算结果见表 5-13。

表 5-13 桑干河生态环境需水量计算结果表 单位: 亿 m³/年

断面	25%		50%		75%	
	生态环境需水	缺水量	生态环境需水	缺水量	生态环境需水	缺水量
东榆林	4.116	2.263	4.134	2.726	4.040	3.088
西朱庄	0.341	0	0.282	0	0.225	0.062
固定桥	3.658	1.477	3.548	2.071	3.489	2.455
册田	0.526	0	0.460	0	0.448	0.003
合计	8.641	3.740	8.424	4.797	8.202	5.608

5.3.2 河道外生态环境需水量的计算

河道外生态需水主要是植被的生态需水(包括天然植被和人工植被)以及流域的蒸发需水。针对桑干河流域河道外生态需水主要包括经济、大田作物需水、林草需水以及流域蒸发需水。

1、经济、大田作物需水

按面积定额法计算经济、大田作物生态需水量,对历年的实测灌溉面积的按实际灌溉面积计算。桑干河流域灌溉面积分为大同市、朔州市两片,其中,大同市包括南郊区、新荣区、浑源县、左云县^{3/4}、大同县,朔州市包括朔城区^{4/5}、平鲁区^{3/5}、山阴县、应县、怀仁县。其计算结果见表 5-14 及图 5-2。

表 5-14 山西省桑干河流域经济、大田作物生态需水量计算结果表

年份	大同市实际 灌溉面积 (千公顷)	朔州市实际 灌溉面积 (千公顷)	大同市灌溉 用水量 (10^8m^3)	朔州市灌溉 用水量 (10^8m^3)	流域灌溉实际 总需用水量 (10^8m^3)
1990	27.12	59.222	0.9686	2.1409	3.1095
1991	11.19	34.720	0.3997	1.2551	1.6548
1992	12.72	36.036	0.4543	1.3027	1.7570
1993	18.37	51.41	0.6561	1.8586	2.5148
1994	33.06	89.690	1.1807	3.2423	4.4230
1995	33.68	93.230	1.2029	3.3703	4.5731
1996	36.68	94.124	1.3100	3.4026	4.7126
1997	37.41	97.480	1.3361	3.5239	4.8600
1998	38.12	100.150	1.3615	3.6204	4.9819
1999	38.49	101.950	1.3747	3.6855	5.0602
2000	37.49	102.110	1.3390	3.6913	5.0302
2001	36.93	100.884	1.3190	3.6470	4.9659
2002	34.51	98.452	1.2325	3.5590	4.7916
2003	36.03	97.992	1.2868	3.5424	4.8292

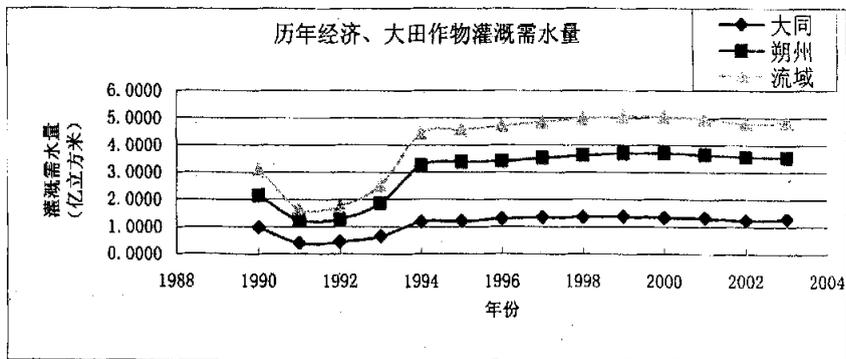


图 5-2 历年经济、大田作物灌溉需水量

2、林草需水

桑干河流域生态需水量计算结果见表 5-15，图 5-3。

表 5-15 山西省桑干河流域林草生态需水量计算结果表 (1994-2003 年)

年份	大同市林地、 果园面积 (千公顷)	朔州市林地、 果园、牧草面 积 (千公顷)	大同市林、 园用水量](10^8m^3)	朔州市林、园、 牧草用水量 (10^8m^3)	灌溉实际总 需水量 (10^8m^3)
1994	0.548	7.176	0.0282	0.3690	0.3972
1995	0.505	7.276	0.0260	0.3741	0.4001
1996	0.745	7.276	0.0383	0.3741	0.4124
1997	0.775	7.276	0.0399	0.3741	0.4140
1998	0.815	7.276	0.0419	0.3741	0.4160
1999	0.765	7.276	0.0393	0.3741	0.4135
2000	0.670	7.276	0.0345	0.3741	0.4086
2001	0.765	7.276	0.0393	0.3741	0.4134
2002	0.766	7.276	0.0394	0.3741	0.4135
2003	0.766	7.276	0.0394	0.3741	0.4135

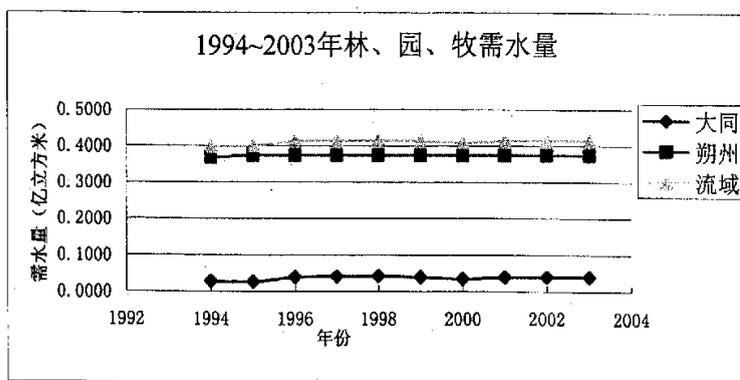


图 5-3 1994~2003 年林、园、牧生态需水量

3、流域蒸发需水量

流域蒸发研究任意区域面积上的蒸发。一个流域的下垫面极其复杂，其中包括河流、湖泊、土壤、岩石和不同的植被等，因此，流域蒸发应包括区域内各类蒸发的总和。研究区域蒸发有两种途径，从理论上讲欲求区域总蒸发量，则需求出区域中各项因素的蒸发量，然后进行组合而得，但事实上，区域内气象条件和下垫面条件都随时在变，从现有技术条件看，要精确求得各单项蒸发是有困难的。另一途径是从全流域综合研究的观点出发，研究全区域总蒸发量，这种方法得到了广泛应用。水量平衡法：

利用水量平衡方程式，对于闭合流域，其方程式为

$$E = P - R \pm \Delta W \pm \Delta W' \pm \Delta u \quad (5-6)$$

式中： R —出口断面流量；

ΔW 、 $\Delta W'$ 、 Δu —分别为计算时段始末地面蓄水量、地下蓄水量和土壤含水量之差值。

上述为全流域在时段 Δt 内之总蒸发量。对于求多年平均流域总蒸发量，则方程式可简化为：

$$\bar{E} = \bar{P} - \bar{R} \quad (5-7)$$

式中： \bar{E} 、 \bar{R} 、 \bar{P} 分别为流域多年平均蒸发量、多年平均径流量和多年平均降水量。

表 5-16 大同市多年平均降水量

大同市	实际面积 (km^2)	年蒸发量 (mm)	年降雨量 (mm)	多年平均降水量 (亿 m^3)
南郊区	1972	2076.4	396.6	7.821
新荣区				
浑源县	1965	1651.6	396.6	7.793
左云 3/4	985.5	1803.1	396.6	3.908
大同县	1501	1747.9	396.6	5.953
总量	25.475			

表 5-17 朔州市多年平均降水量

朔州市	实际面积(km ²)	年蒸发量(mm)	年降雨量(mm)	多年平均降水量 (亿 m ³)
朔城 4/5	896.5	1434.4	415.9	3.729
平鲁 3/5	1388.4	1388.4	415.9	5.774
山阴县	1652	1652	415.9	6.871
应县	1708	1708	415.9	7.103
怀仁县	1230	1230	415.9	5.116
总量	28.593			

由此可知，桑干河流域多年平均蒸发量为：

$$\bar{E} = \bar{P} - \bar{R} = (25.475 + 28.593) - 6.6 = 47.468 \text{ 亿立方米。}$$

5.4 断流时生态环境需水量的计算

河道断流后，河槽和湖泊逐渐退化，丧失其应用的功能。在闸控河流，当上游水闸长时间关闸后，河流水位将逐渐下降，直至河床干枯，这将使流域内生态环境受到严重的破坏。为维持河流自身的功能，应使河道保持一个较小的基流，使湖泊维持一定的水位，即留有防止河流断流、湖泊萎缩所需的生态环境需水量。对于某一河道而言，防止断流的需水量应包括该河段的水面蒸发量、下渗量和河道外取水量。即：

$$W = W_{\text{蒸}} + W_{\text{渗}} + Q \quad (5-8)$$

式中： Q 为计算河段定额河道外取水量之和。

5.4.1 河流蒸发量

见 5.3.1 中的 II 维持河流水面蒸发所需的生态需水量 $w_e(t, i)$ 。

5.4.2 河道渗漏量

见 5.3.1 中的 III 维持河道渗漏所需的生态需水量 $w_s(t, i)$ 。

5.4.3 河道外取水量

a. 农业用水

① 农田灌溉取水

桑干河流域灌溉取水量计算结果见下表 5-18、图 5-4。

表 5-18 桑干河流域经济、大田作物河道取水量计算结果表

年份	大同农业灌溉供水量 (引水工程)	朔州农业灌溉供水量 (引水工程)	流域灌溉实际取水量 (万 m ³)
1994	3863.5	3048	6911.5
1995	4298.5	3063.6	7362.1
1996	4351	3287.6	7638.6
1997	4395	2547.6	6942.6
1998	3912.5	3714.6	7627.1
1999	3518.5	3704.6	7223.1
2000	3351.5	3800.6	7152.1
2001	2967.5	2712.6	5689.1
2002	2654.5	2931.6	5586.1
2003	2640	2948.6	5588.6

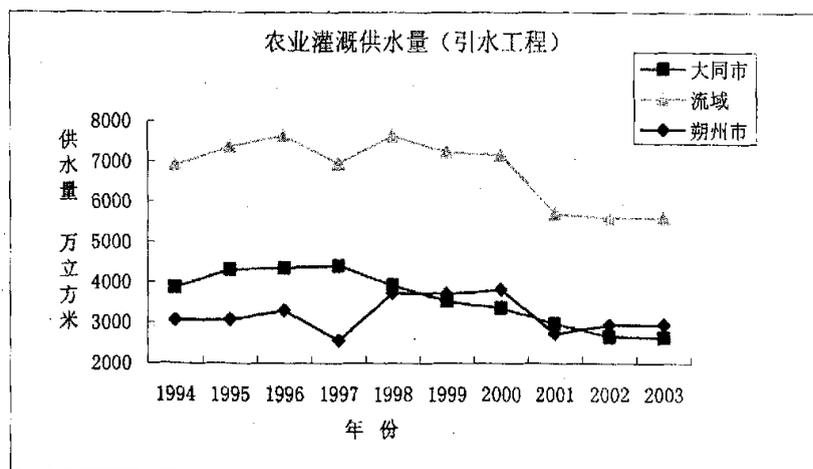


图 5-4 历年农业灌溉引水量

② 林牧渔用水

桑干河流域林牧渔用水主要分为大同市和朔州市两片，计算结果见表 5-19 和图 5-5:

表 5-19 桑干河流域林牧渔用水统计表 (1994-2003 年)

项目	大同市			朔州市			总需水量 亿 m ³
	园林	牧草	需水量	园林	牧草	需水量	
1994	0.548	0	0.0282	7.152	0.024	0.3690	0.3972
1995	0.505	0	0.0260	7.252	0.024	0.3741	0.4001
1996	0.745	0	0.0383	7.252	0.024	0.3741	0.4124
1997	0.775	0	0.0399	7.252	0.024	0.3741	0.4140
1998	0.815	0	0.0419	7.252	0.024	0.3741	0.4160
1999	0.765	0	0.0393	7.252	0.024	0.3741	0.4134
2000	0.670	0	0.0345	7.252	0.024	0.3741	0.4086
2001	0.765	0	0.0393	7.252	0.024	0.3741	0.4135
2002	0.766	0	0.0394	7.252	0.024	0.3741	0.4135
2003	0.766	0	0.0394	7.252	0.024	0.3741	0.4135

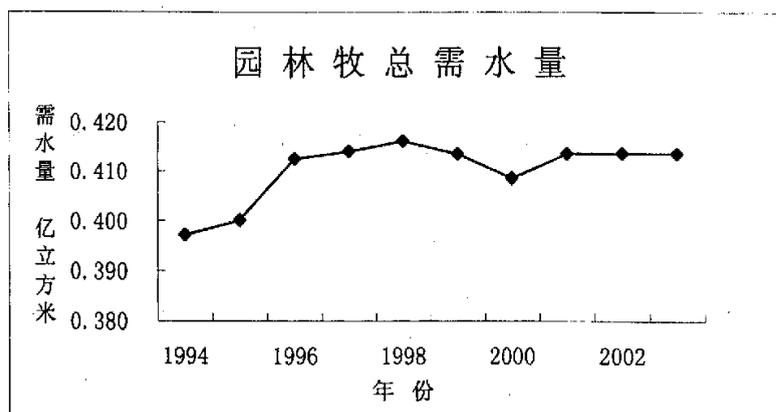


图 5-5 历年园林牧总需水量

b. 工业用水

桑干河流域工业河道取水量见下表 5-20、图 5-6:

表 5-20 桑干河流域工业河道取水量 单位: 万 m^3

年份	大同市工业取水量	朔州市工业取水量	合计
1994	15	6587	6602
1995	4	6531.6	6535.6
1996	470.25	6607	7077.25
1997	15	6679	6694
1998	14.25	6679	6693.25
1999	12	6687	6699
2000	14.25	6703	6717.25
2001	51.75	6710.4	6762.15
2002	14.25	6710.4	6724.65
2003	14.25	6714.4	6728.65

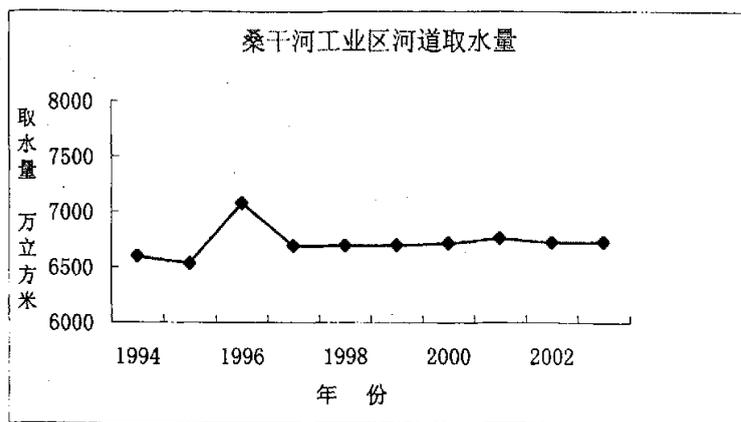


图 5-6 桑干河工业区河道取水量

c. 生活用水

① 城镇生活河道取水

随着我国城市化率的提高, 城镇人口逐步增加, 人民生活水平的不断改善, 生活用水量(含居民用水和公共设施用水)增长很快, 见表 5-21。

表 5-21 桑干河流域城镇生活河道取用水量 单位: 万 m³

年份	大同市	朔州市	合计
1994	0	18	18
1995	0	0	0
1996	2.25	0	2.25
1997	37.5	11.4	48.9
1998	36	11.4	47.4
1999	36	11.4	14
2000	2.6	11.4	12
2001	0	12	12
2002	0	12	12
2003	0	11.4	11.4

② 农村生活取水

农村生活取水量包括农村居民取水和牲畜用水。由于桑干河流域内城镇化率比较低, 农村人口占大多数, 故其用水量比城镇生活用水高, 见表 5-22、图 5-7。

表 5-22 桑干河流域农村生活用水量 单位: 万 m³

年份	大同市	朔州市	合计
1994	1141.5	1263.2	2404.7
1995	1073.75	1270.6	2344.35
1996	1116.5	1563.2	2679.7
1997	1236.5	1563.2	2799.7
1998	1270	1585.2	2855.2
1999	1337	1717.2	3054.2
2000	1287.5	1607	2894.5
2001	1836.8	1547	3383.8
2002	1787.8	1739.2	3527
2003	1153.5	2178.4	3331.9

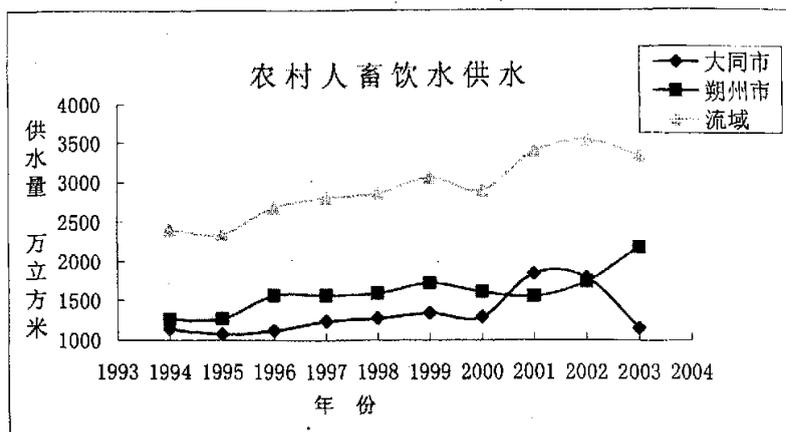


图 5-7 农村生活用水量

d. 河道外总取水量

桑干河流域河道外总取水量包括农业引水量、工业引水量、生活引水量等。计算结果见表 5-23。

表 5-23 桑干河流域河道外取水量计算成果表

农业用水量 (万 m ³)		工业用水量 (万 m ³)	生活用水量(万 m ³)		河道外取水量 (亿 m ³)
农田灌溉	林牧渔		城镇	农村	
7638.6	4160	7077.6	47.4	3527	2.245

5.4.4 计算结果

本文以桑干河断流时期为研究对象,从防止河道断流的角度,提出了河道在不断流的临界状态下的最小生态环境需水量的定量计算方法,并通过实际的例子进行说明。通过以上计算可知,桑干河流域最小生态环境需水量为 3.539 亿立方米。

5.5 本章小结

本章建立了河流生态需水量模型和河流环境需水量模型。

(1) 河道内生态需水量包括维持河流生态系统的生态基流、河流水面蒸发生态需水量、河流入渗生态需水量。其中河流水面蒸发生态需水量、河流入渗生态需水量是河流需要补给的生态需水损耗项，而生态基流是河流需要维持的水量。通过生态需水量模型计算了桑干河河道内的生态需水量。河道内环境需水量包括维持河流水沙平衡需水量、桑干河干流污染物自净需水量、地下水超采回补需水量。生态需水量对水质没有要求，只对水量有要求，而污染物稀释自净需水量不仅要求水量，而且水质必需满足一定的要求。

(2) 河道外生态需水主要是植被的生态需水(包括天然植被和人工植被)以及流域的蒸发需水。针对桑干河流域河道外生态需水主要包括经济、大田作物需水、林草需水等。

(3) 针对桑干河断流的情况，本文研究了断流时河流的生态环境需水量。对于某一河道而言，防止断流的需水量应包括该河段的水面蒸发量、下渗量和河道外取水量。本文计算了桑干河断流时生态环境需水量。

6 桑干河流域水环境保护策略模拟与分析

按照第 4 章水环境容量的计算结果, 桑干河水体不同污染物的含量已经超过水体的纳污能力。部分河段水环境容量已经为负值, 生态用水也存在较大缺口。按照国民经济发展规划, 到 2010 年桑干河流域的工业产值还要翻一番, 即使按照首都水资源规划项目的要求, 将万元产值的排污量减少, 桑干河的水体其污染物仍然严重超标, 在此情况下, 采用什么策略可以有效地提高水环境承载力, 本章采用前述的系统动力学方法, 列出了多种治理策略进行模拟分析

6.1. 模型模拟基本数据

6.1.1 不同频率的污染物环境容量

由于不同来水流量对水环境容量的影响较大, 为简化起见, 选最不利的 75% 频率下的河流流量作为代表进行各种策略分析。由表 6-1 可以建立河流流量与污染物环境容量的表函数。

表 6-1 75% 频率流量对应的污染物环境容量 单位: t

频率	污染物	大同	朔州
75%	COD	12917.38	6974.24
	氨氮	930.34	495.82
	挥发酚	157.4	17
	盐	7956.61	

6.1.2 总可利用水量及外调水量

桑干河流域不同频率的总可利用水量在水环境承载力模型中也是作为限制变量, 其计算结果见表 6-2。总可利用水量包括地下水和地表水。

表 6-2 桑干河流域可利用水量计算结果表 单位: 万 m^3

频率	大同		朔州	
	地下水	地表水	地下水	地表水
25%	64556	68200	64443	42900
50%		50400		34000
75%		40700		28600

桑干河流域的大同城郊和平朔地区的水供需矛盾日趋尖锐, 该区域是重要的工业中心和国家煤、电生产基地, 也是生态脆弱、水资源严重短缺的区域。目前流域内正在建设一批水源工程项目和污水处理厂, 并规划有御河孤山水库等工程。正在实施的万家寨引黄工程北干线, 是解决该地区资源性缺水问题、保障经济社会可持续发展、改善生态环境的重要工程。万家寨引黄工程北干线的任务是向大同市和朔州市的城市生活、城市生态环境和工业供水。供水区总面积 5162km^2 ; 包括大同市城区、矿区、南郊区和新荣区; 朔州市的朔城区、平鲁区、山阴县、怀仁县等。已经建成的引黄工程总干线设计输水流量为 $48\text{m}^3/\text{s}$, 年引水量 12 亿 m^3 , 其中为北干线分配输水流量 $22.2\text{m}^3/\text{s}$, 年引水量 5.6 亿 m^3 , 近期 (2010 年) 设计年引水量 1.6 亿 m^3 , 设计引水流量 $6.45\text{m}^3/\text{s}$ 。

6.1.3 模型检验

将由前面主要方程所建立的系统动力学模型用计算机语言表达后上机运行, 应用 Vensim 软件所提供的编译软件和跟踪功能检验模型的正确性, 输入 2002、2003 年的各类决策变量, 通过对系统状态变量的仿真值与历史统计数据比较, 得到二者拟合较好的结论, 从而验证了模型的有效性。

6.1.4 计算步骤

1) 通过系统动力学模型模拟可求出水环境承载力指标体系中的指标值。

2) 标值确定后采用 2-2 式确定策略下的分数值。

3) 按照 2-2、2-3 式确定各指标权重。

对于工业子系统, 建立判断矩阵如表 6-3:

表 6-3 工业子系统权重判断矩阵

	C_1	C_3	C_6
C_1	1	4	2
C_3	1/4	1	1/3
C_6	1/2	3	1

通过计算, 得出 $w(C_1: B_1)=0.604$; $w(C_3: B_1)=0.132$; $w(C_6: B_1)=0.264$;

$CI=0.034$, $RI=0.58$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0.06 < 0.1$, 满足一致性检验。

对于农业子系统, 建立判断矩阵如 6-4:

表 6-4 农业子系统权重判断矩阵

	C_2	C_4	C_7
C_2	1	1/4	1/3
C_4	4	1	2
C_7	3	1/2	1

通过计算, 得 $w(C_2: B_2)=0.122$; $w(C_4: B_2)=0.558$; $w(C_7: B_2)=0.32$;

$CI=0.009$, $RI=0.58$; $CR = \frac{CI}{RI} = 0.016 < 0.1$, 满足一致性检验。

对于人口子系统, 两个指标同样重要, 得 $w(C_3: B_3)=0.5$; $w(C_4: B_3)=0.5$;

对于水资源子系统, 建立判断矩阵如表 6-5:

表 6-5 水资源子系统权重判断矩阵

	C_5	C_6	C_7	C_8
C_5	1	5	3	7
C_6	1/5	1	2	4
C_7	1/3	1/2	1	4
C_8	1/7	1/4	1/4	1

$w(C_5: B_4)=0.578$; $w(C_6: B_4)=0.203$; $w(C_7: B_4)=0.163$; $w(C_8: B_4)=0.056$;

$CI=0.069$, $RI=0.9$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0.077 < 0.1$, 满足一致性检验。

对于水污染子系统, 建立判断矩阵如表6-6:

表6-6 水污染子系统权重判断矩阵

	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}
C_9	1	3	4	6
C_{10}	1/3	1	2	3
C_{11}	1/4	1/2	1	2
C_{12}	1/6	1/3	1/2	1

$w(C_9: B_5)=0.558$; $w(C_{10}: B_5)=0.228$; $w(C_{11}: B_5)=0.136$; $w(C_{12}: B_5)=0.078$;

$CI=0.03$, $RI=0.52$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0.058 < 0.1$, 满足一致性检验。

对于水环境承载力系统, 建立判断矩阵如表6-7:

表6-7 水环境承载力系统权重判断矩阵

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
B_1	1	1/2	2	4	1/4
B_2	2	1	4	6	1/2
B_3	1/2	1/4	1	2	1/6
B_4	1/4	1/6	1/2	1	1/8
B_5	4	2	6	8	1

$w(B_1: E)=0.143$; $w(B_2: E)=0.269$; $w(B_3: E)=0.076$; $w(B_4: E)=0.043$;

$w(B_5: E)=0.469$ 。 $CI=0.023$, $RI=1.36$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0.017 < 0.1$, 满足一

致性检验。

4) 采用 2-4、2-5 式计算出水环境承载度, 全部计算均纳入系统动力学模型中, 反映承载力大小的最终指标是综合各类因素的承载度。承载度是一个无量纲、小于 1、愈大愈优、有相对意义, 无明确物理概念的指标, 主要用于策略效果比较。通过比较, 可以选择出最优的策略, 也可以对各种策略进行全面的、长时段的分析, 判断那些策略是短期行为, 那些策略

有长期效果。

6.2 模型模拟

6.2.1 模型模拟方案

a. 河流流量模拟

本文主要以2000—2010年河流流量都为75%频率枯水年流量的情况下,讨论桑干河流域的水环境承载力变化情况。

b. 水环境保护策略模拟

本文采用以下策略模拟2000年—2010年的指标变化情况,通过水环境承载力来分析经济发展与生态环境的协调程度。策略一描述如下:

(1) 策略1(原始策略):工业万元产值用水量保持目前水平不变;工业发展速度保持目前水平不变;农灌定额大同保持 $238.1\text{M}^3/\text{亩}$,朔州保持 $241.0\text{M}^3/\text{亩}$ 不变;工业万元产值废水排放量保持目前水平不变,不投资用于污水治理,地下水开采量保持目前水平,不投资用于节水灌溉,桑干河不从黄河生态调水。

(2) 策略2:每年增加农业产值的20%用于节水投资;

(3) 策略3:工业万元产值用水量每年递减1.2%;

(4) 策略4:工业发展速度每年递减1%;

(5) 策略5:每年投资工业产值的10%用于治理污水;

(6) 策略6:工业用水重复利用率每年递增0.5%;

(7) 策略7:桑干河从黄河生态调水1.6亿;

(8) 策略8:每年回补地下水为2000年超采量的10%;

(9) 综合策略9:工业万元产值用水量每年递减1.2%,工业发展速度每年递减1%;每年增加农业产值的20%用于节水投资,万元产值废水排放量每年递减1%,每年投资工业产值的10%用于治理污水,工业用水重复利用率每年递增0.5%,桑干河从黄河生态调水1.6亿,地下水每年回补现状年2000年的10%。

6.2.2 模型模拟结果与分析

a. 75%频率水文条件下水环境承载度

2000—2010年来水流量为75%频率枯水年流量情况下得到的各种策略下的大同、朔州两个子系统及桑干河流域大系统的水环境承载力度。

(1) 大同子系统

表 6-8 75%频率流量情况下大同子系统的水环境承载度

年份	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4	策略 5	策略 6	策略 7	策略 8	策略 9
2000	0.427	0.427	0.427	0.427	0.516	0.427	0.450	0.427	0.539
2001	0.393	0.451	0.387	0.393	0.523	0.395	0.422	0.393	0.617
2002	0.365	0.443	0.354	0.378	0.528	0.368	0.399	0.365	0.642
2003	0.341	0.428	0.327	0.371	0.533	0.347	0.379	0.341	0.658
2004	0.326	0.416	0.310	0.372	0.540	0.331	0.364	0.326	0.679
2005	0.319	0.401	0.300	0.380	0.549	0.320	0.351	0.319	0.691
2006	0.315	0.389	0.295	0.393	0.557	0.314	0.343	0.315	0.703
2007	0.316	0.385	0.293	0.408	0.554	0.314	0.338	0.316	0.716
2008	0.319	0.388	0.295	0.427	0.532	0.318	0.337	0.319	0.728
2009	0.324	0.393	0.299	0.449	0.507	0.325	0.346	0.324	0.740
2010	0.332	0.401	0.304	0.472	0.481	0.335	0.358	0.332	0.752

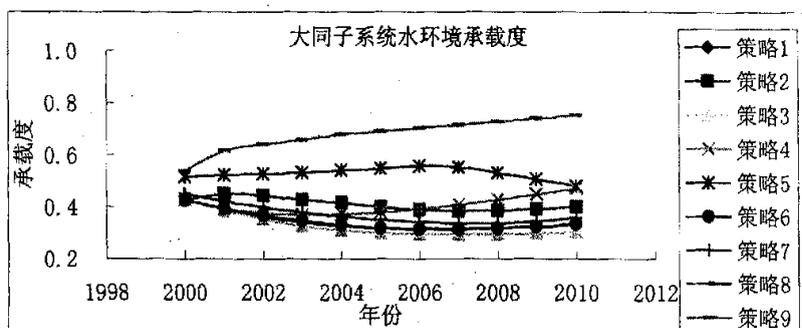


图 6-1 75%频率流量情况下大同子系统的水环境承载度

从表 6-8 及图 6-1 可见,如不采取任何措施,大同地区水环境承载度呈现逐年下降的趋势,这主要是因为在此策略下,没有对经济的发展采取任何限制措施,亦未加大污水治理的投资,因此,随着经济的发展水环境污染越来越严重,已经严重的阻碍了社会经济的发展。而且在所采取的策略中策略 4、策略 5 及综合策略对水环境承载力的提高明显大于其他策略。这说明采取限制工业发展和加大污水治理投资对提高大同地区的水环境承载力的作用不可忽视。策略 2 与策略 7 采取了农业节水和生态调水的措施,虽然它们优于原始策略,但由于节水量和调水量有限,对环境承载度没有大幅度的提高。由于大同工业用水重复利用率已经较高,所以策略 6 基本没有对环境承载度产生改善。策略 3 减少了工业用水量,但相对提高了污染负荷,因此它较原始策略更差。

(2) 朔州子系统

表 6-9 75%频率流量情况下朔州子系统的水环境承载度

年份	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4	策略 5	策略 6	策略 7	策略 8	策略 9
2000	0.569	0.569	0.569	0.569	0.569	0.569	0.569	0.569	0.569
2001	0.554	0.613	0.564	0.568	0.637	0.569	0.585	0.573	0.705
2002	0.540	0.627	0.561	0.567	0.645	0.570	0.591	0.578	0.749
2003	0.527	0.634	0.559	0.565	0.652	0.572	0.599	0.585	0.788
2004	0.514	0.638	0.559	0.562	0.658	0.577	0.608	0.595	0.822
2005	0.503	0.645	0.561	0.560	0.662	0.583	0.619	0.606	0.854
2006	0.493	0.653	0.565	0.556	0.666	0.590	0.631	0.619	0.876
2007	0.484	0.663	0.570	0.552	0.642	0.600	0.644	0.634	0.864
2008	0.475	0.675	0.576	0.546	0.614	0.611	0.659	0.650	0.852
2009	0.469	0.688	0.585	0.541	0.592	0.624	0.675	0.668	0.840
2010	0.463	0.702	0.594	0.534	0.574	0.639	0.693	0.687	0.825

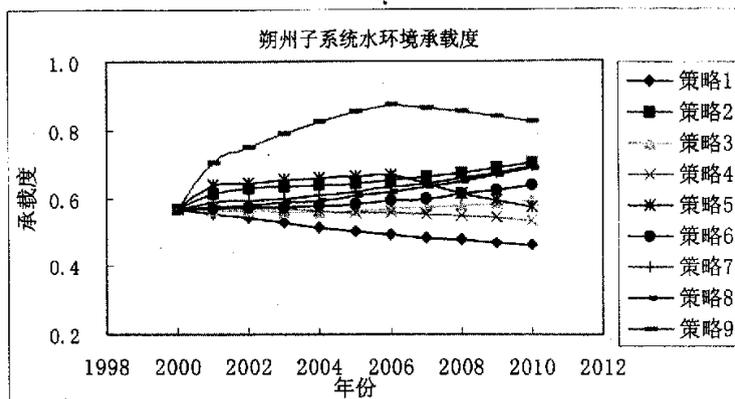


图 6-2 75%频率流量情况下朔州子系统的水环境承载力

表 6-9 及图 6-2 可见，如不采取任何措施，朔州地区水环境承载力呈现逐年下降的趋势，同样，这是因为在此策略下，没有对经济的发展采取任何限制措施，亦未加大污水治理的投资，因此，随着经济的发展水环境污染越来越严重，已经严重的阻碍了社会经济的发展。与大同不同的是策略 2、策略 5、策略 6、策略 7 和策略 8 都对水环境承载力的提高有显著的作用，尤其是综合策略 9。这说明针对朔州市采取农业节水、加大污水治理投资、提高工业用水重复利用率以及生态调水等措施，对提高朔州市水环境承载力有着不可忽视的作用。

(3) 桑干河流域

表 6-10 75%频率流量情况下桑干河大系统的水环境承载力

年份	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4	策略 5	策略 6	策略 7	策略 8	策略 9
2000	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498
2001	0.474	0.532	0.476	0.481	0.580	0.482	0.504	0.483	0.661
2002	0.452	0.535	0.457	0.472	0.587	0.469	0.495	0.471	0.695
2003	0.434	0.531	0.443	0.468	0.592	0.460	0.489	0.463	0.723
2004	0.420	0.527	0.435	0.467	0.599	0.454	0.486	0.461	0.750
2005	0.411	0.523	0.431	0.470	0.606	0.451	0.485	0.462	0.772
2006	0.404	0.521	0.430	0.474	0.611	0.452	0.487	0.467	0.790

2007	0.400	0.524	0.432	0.480	0.598	0.457	0.491	0.475	0.790
2008	0.397	0.531	0.436	0.487	0.573	0.464	0.498	0.484	0.790
2009	0.396	0.540	0.442	0.495	0.550	0.474	0.511	0.496	0.790
2010	0.397	0.552	0.449	0.503	0.527	0.487	0.526	0.510	0.789

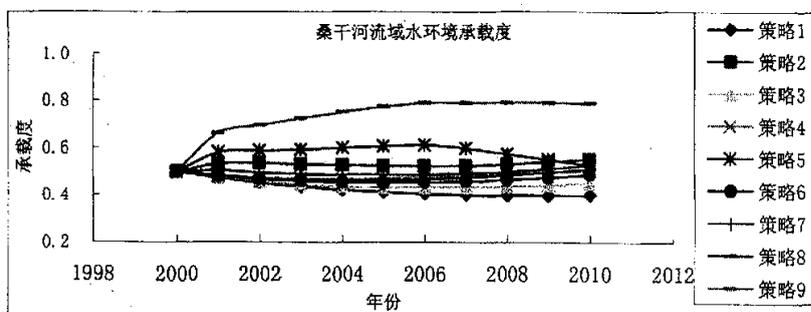


图 6-3 75%频率流量情况下桑干河大系统的水环境承载度

从表 6-10 及图 6-3 可见, 如不采取任何措施, 桑干河流域水环境承载度呈现逐年下降的趋势, 这主要是因为在此策略下, 没有对经济的发展采取任何限制措施, 亦未加大污水治理的投资, 因此, 随着经济的发展水环境污染越来越严重, 已经严重的阻碍了社会经济的发展。而其他策略对水环境承载力均有不同程度的提高, 尤其是综合策略最佳。其次是策略 5 和策略 2, 因此在桑干河流域采取加大污水治理投资和农业节水措施, 将会对整个流域的水环境承载力有较大程度的改善。

6.3 灵敏度分析

6.3.1 治理率增加对水环境承载力的影响

图 6-4、6-5 和 6-6 所示分别为工业污水治理率为 30%、50%、70% 和 80% 时对大同、朔州和桑干河流域水环境承载力的影响。从图中可见, 增加污水治理率在同期可以提高水环境承载力, 但是纵向比较水环境承载力在升高一段时间后, 又呈下降的趋势, 可见单纯的靠增加污水治理并不能使水环境承载力一直保持增加的趋势。

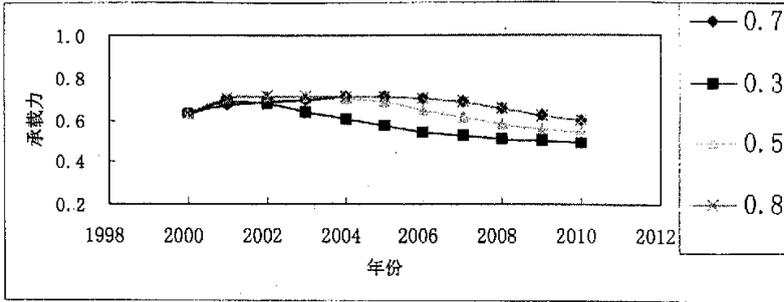


图 6-4 不同治理率对大同子系统水环境承载力的影响

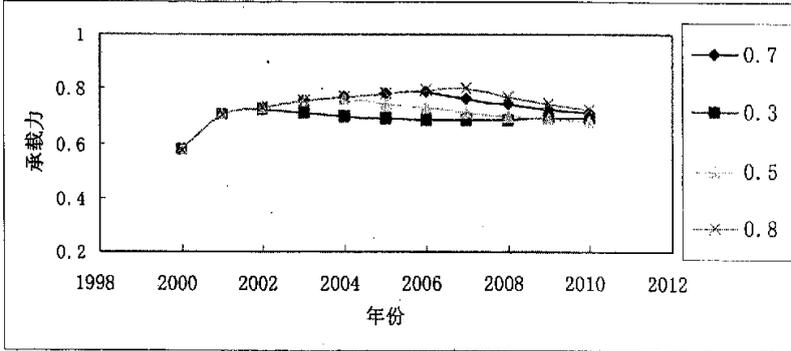


图 6-5 不同治理率对朔州子系统水环境承载力的影响

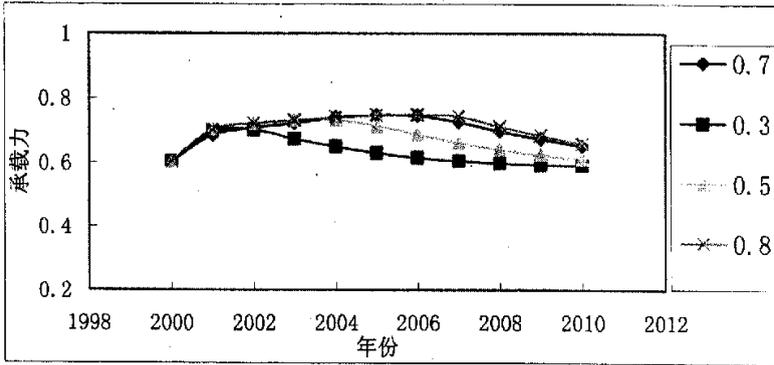


图 6-6 不同治理率对桑干河流域水环境承载力的影响

6.3.2 限制工业发展对水环境承载力的影响

图 6-7、6-8 和 6-9 所示分别为工业发展速度每年递减 1%、0.8% 和 1.2% 时对大同、朔州和桑干河流域水环境承载力的影响。从图中可见，

工业发展速度每年递减 1% 时可以提高水环境承载力。

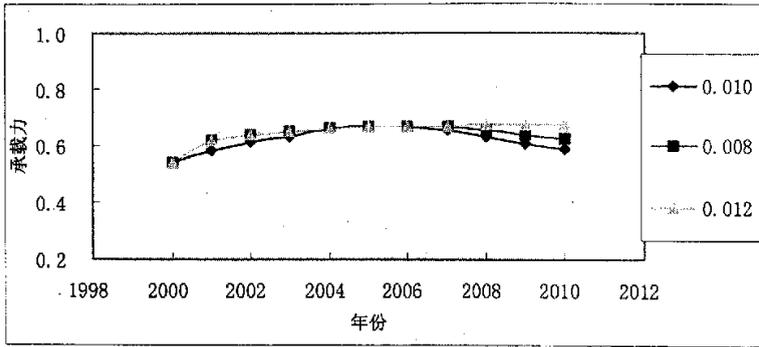


图 6-7 不同工业年递减速度对大同水环境承载力的影响

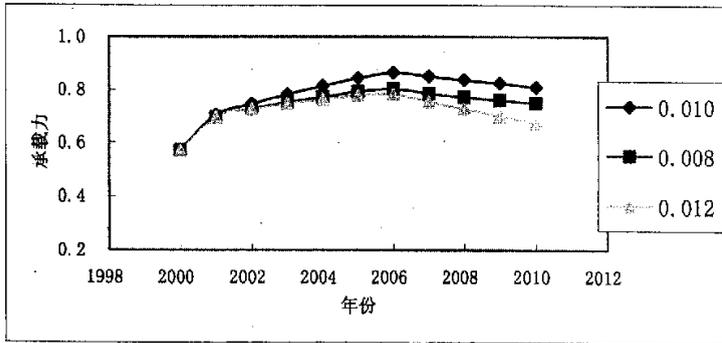


图 6-8 不同工业年递减速度对朔州水环境承载力的影响

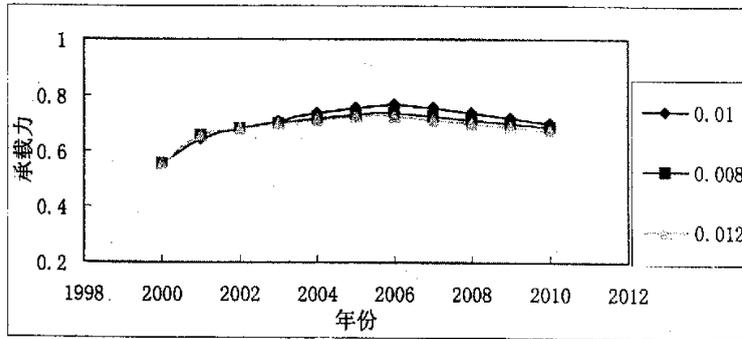


图 6-9 不同工业年递减速度对桑干河水环境承载力的影响

图 6-10、6-11 和 6-11 所示区域外调水量分别为 1.6 亿、2.6 亿及 3.6 亿.2%时,对大同、朔州和桑干河流域水环境承载力的影响。从图中可见,区域外调水量对朔州的水环境承载力影响最大,对整个桑干河的水环境承载力也有很大的影响。调水量越大,当地的水环境承载力提高的越大。

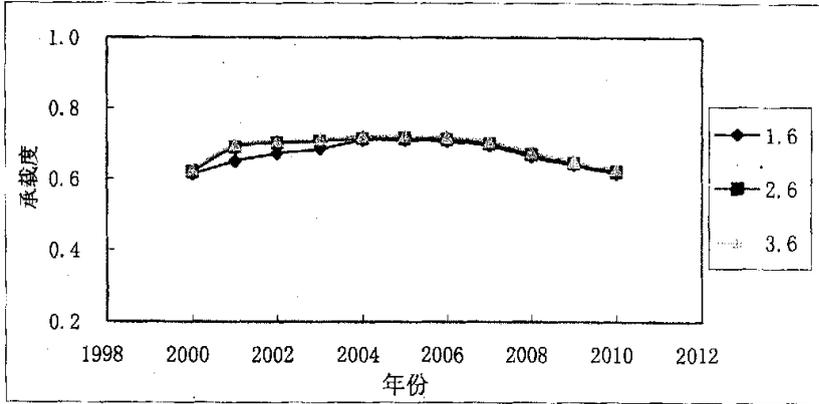


图 6-10 不同调水量对大同水环境承载力的影响

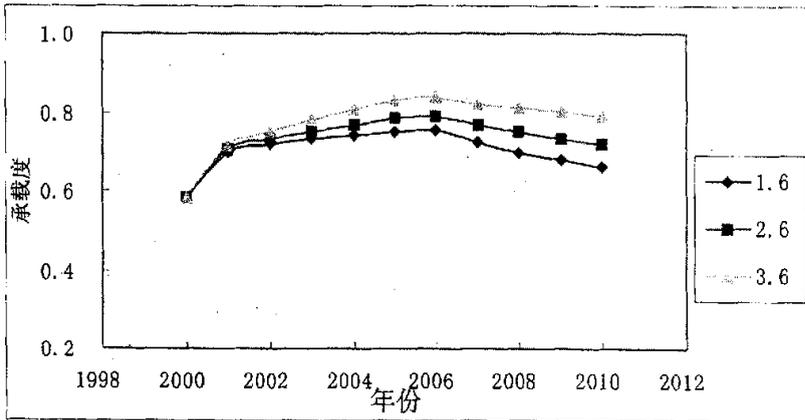


图 6-11 不同调水量对朔州水环境承载力的影响

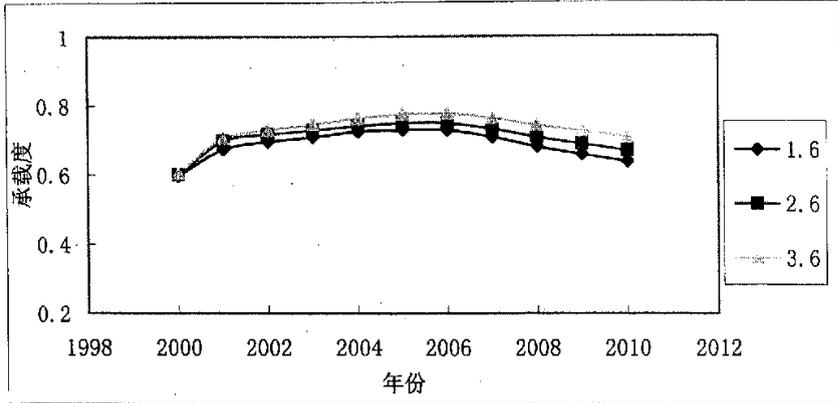


图 6-12 不同调水量对桑干河流域水环境承载力的影响

6.3.3 保持工业发展的情况下，增加治理率对水环境承载力的影响

图 6-13、6-14 和 6-15 所示分别为在工业发展速度保持 8% 的情况下，工业污水治理率为 30%、50%、70% 和 80% 时对大同、朔州和桑干河流域水环境承载力的影响。从图中可见，如果工业污水的治理率达到 80%，即使工业发展速度保持 8% 的情况下仍可以提高当地的水环境承载力。可见增加污水治理的投资，提高污水的治理水平对提高桑干河流域的水环境承载力有重大的影响。

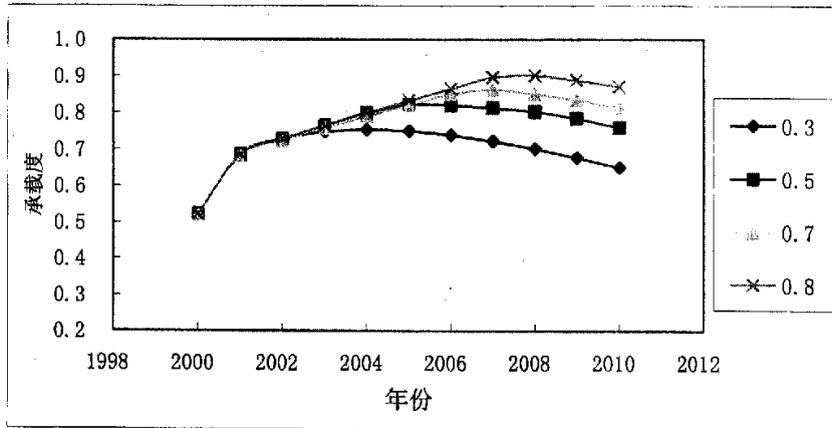


图 6-13 工业发展速度 8%，增加治理率对朔州水环境承载力的影响

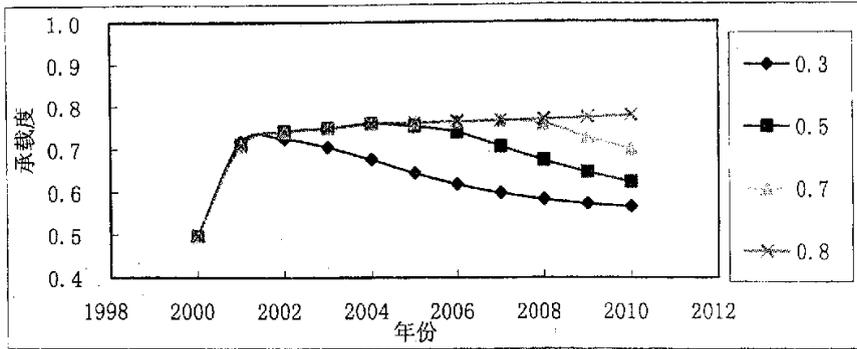


图 6-14 工业发展速度 8%，增加治理率对大同水环境承载力的影响

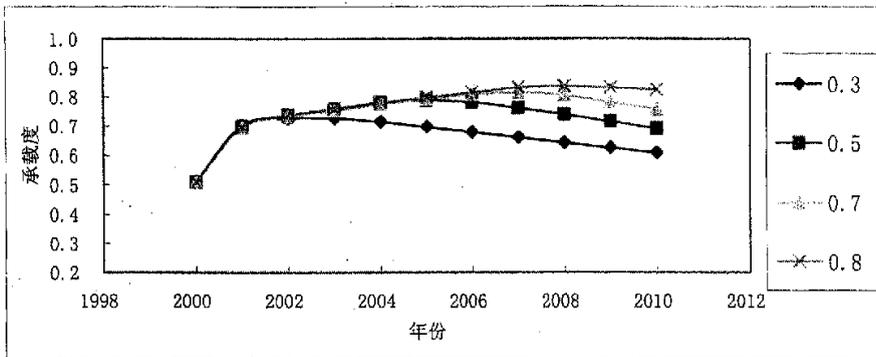


图 6-15 工业发展速度 8%，增加治理率对桑干河流域水环境承载力的影响

6.4 本章小结

本章建立了水环境承载力系统动力学模型，综合考虑了经济发展、人口增长、污染物环境容量、生态环境需水量、水污染控制措施、水环境保护规划等诸多方面，对水环境承载力指标体系中的指标进行模拟，分别采用了2000—2010年来水流量为75%频率枯水年流量情况进行模拟并比较分析，得出如不采取任何措施，桑干河流域水环境承载度呈现逐

年下降的趋势。而桑干河流域采取加大污水治理投资和农业节水措施，将会对整个流域的水环境承载力有较大幅度的改善。从黄河调水将促进桑干河流域的社会经济发展。如果把工业废水的治理率提高到 80%，即使保持工业发展速度为 8% 的情况下，则桑干河流域的水环境承载力仍可保持持续上升的趋势。如果工业废水的治理率达不到 80%，仍保持工业发展速度不变的情况下，可以调整桑干河流域的产业结构，或者改进清洁工艺，减少工业废水的产生，保证桑干河流域的可持续发展。

7 结论及展望

7.1 结论

(1) 建立了水资源—水环境—水生态—社会—经济相互耦合的水环境承载力概念模型,在此基础上建立了水环境承载力指标体系,并采用层次分析法确定了指标体系各级指标的权重。

(2) 分析了桑干河生态环境的现状,并针对桑干河的断流现象进行重点分析,提出桑干河断流的直接原因是植被破坏、水土流失以及地下水的大量开采引起的地下水位大幅度下降;间接原因是燃煤发电所产生的二氧化硫的污染。

(3) 建立了河流生态需水量模型和河流环境需水量模型。生态需水量包括维持河流生态系统的生态基流、河流水面蒸发生态需水量、河流入渗生态需水量。环境需水量包括维持河流水沙平衡需水量、桑干河干流污染物自净需水量、地下水超采回补需水量。生态需水量对水质没有提出要求,只对水量进行了计算,而污染物稀释自净需水量不仅要求有一定的水量,而且水质必需满足要求。

(4) 将水环境容量的计算方法与一维水流——水质计算方法相结合,把水环境容量分为自净容量和稀释容量两部分,分别确定了自净容量和稀释容量的计算方法,并取不同频率情况计算了污染物:氨氮、COD及挥发酚的水环境容量。结果表明,不同情况下桑干河流域的氨氮、COD及挥发酚的含量均严重超标。因此,应该采取积极有效的措施,以使桑干河流域水体尽快达到水质标准,水环境容量得到满足。

(5) 建立水环境承载力系统动力学模型,分别采用了2000—2010年来水流量为75%频率枯水年流量情况及不同策略下对桑干河流域的水环境承载力进行模拟,得到水环境承载力的影响因子,有助于决策者作出科学、合理的决策,保证桑干河流域的可持续发展。

7.2 展望

(1) 对河流水环境承载力的指标体系进一步研究,丰富和充实目前的指标体系,尽量使指标体系的建立既全面又能够被量化,对指标体系中指标权重的确定方法进行研究,使其尽量减少人为因素的干扰。

(2) 河流生态环境需水量的研究对于干旱半干旱地区尤为重要,也是河流水环境承载力计算的基础,因此,今后在河流生态需水量研究时,应该深入的研究水沙平衡需水量问题。以及当河流处于断流和结冰等特殊时期时,河流生态环境需水量的研究。

(3) 针对桑干河水环境承载力的研究,由于桑干河水体富营养化并不严重,因此本文在此方面没有深入研究,但是有些河流存在着严重的水体富营养化问题,为了避免发生“水华”,应考虑建立河流富营养化模型,深入研究。

致 谢

在论文写作与工作过程中，周老师给予了悉心的指导，老师严谨的学风使我受益非浅。水利水电学院的各位院长，研部的各位师长也给予了很多帮助。索部长和各位专家，不辞劳苦在论文完稿之际给予帮助和指导。

感谢周老师，感谢索部长和各位专家、各位师长、各位同学的真诚帮助。

参考文献

- 【1】 冯起, 曲耀光, 程国栋.西北干旱地区水资源现状问题及对策[J].地球科学进展, 1997, 12 : 66-72.
- 【2】 蒋晓辉等.陕西关中地区水环境承载力研究.环境科学学报, 2001. 21(3):312-317
- 【3】 汪党献, 王浩, 马静.中国区域发展的水资源支撑能力[J].水利学报, 2000, (11): 21-26, 33.
- 【4】 汪恕诚.水环境承载能力分析 with 调控.中国水利.2001 (11): 9-12.
- 【5】 North American Lake Management Society [EB/OL]
http: //www.nalms.org/glossary/lkword-c.htm(undated).
- 【6】 施雅风, 曲耀光.乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M].北京: 科学出版社, 1992.210-220.
- 【7】 许有鹏.干旱地区水资源承载力综合评价[J].自然资源学报,1993,8 (3): 229-237.
- 【8】 王建华, 等.基于 SD 模型的干旱区城市水资源承载力预测研究[J].地理学与国土研究, 1999, 15(2): 18-22.
- 【9】 徐中民.情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用[J].冰川冻土, 1999, 21(2): 99-106.
- 【10】 贾嵘.区域水资源承载力研究[J].西安理工大学学报, 1998, 14(4): 382-387.
- 【11】 中国水利水电科学研究院.西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究[J/OL] http: //tech.water.info.net.cn/NewsR/News Display. asp? Id=11245.
- 【12】 阮本清, 等.流域水资源管理[M].北京: 科学出版社, 2001.152-169.
- 【13】 高彦春, 刘昌明.区域水资源开发利用的阈限研究[J].水利学报,

- 1997, (8): 73-79.
- 【14】 傅 湘,纪昌明.区域水资源承载能力综合评价——主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 168-172.
- 【15】 林虎林等.河西走廊水资源供需平衡及其对农业发展的承载潜力[J]. 自然资源学报, 1997, 12(3): 224-232.
- 【16】 水利部南京水文水资源研究所, 中国水利水电科学研究院水资源研究所. 21.世纪中国水供求[M].北京: 中国水利水电出版社, 1998.131-138.
- 【17】 郭怀成, 等.我国新经济开发区水环境规划研究[J].环境科学进展, 1994, 2(5): 14-22.
- 【18】 魏斌, 张霞.城市水资源合理利用分析与水资源承载力研究——以本溪市为例[J].城市环境与城市生态, 1995, 8(4): 19-24.
- 【19】 崔凤军.城市水环境承载力及其实证研究[J].自然资源学报, 1998, 13(1): 58-62.
- 【20】 王淑华.区域水环境承载力及其可持续利用研究[D].北京: 北京师范大学, 1996.
- 【21】 曾维华, 程声通.区域水环境集成规划刍议[J].水利学报, 1997, (10): 77-82.
- 【22】 陈冰, 等.柴达木盆地水资源承载方案系统分析[J]. 环境科学, 2000, 21(3): 16-21.
- 【23】 李丽娟, 等.柴达木盆地水资源承载力研究[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 20-23.
- 【24】 夏军.区域水环境及生态质量评价.[M].武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- 【25】 夏军,许新宜等.可持续水资源管理研究与实践[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社, 1999.
- 【26】 Armentrout GW, Wilson JF. *Assessment of low flow in streams in*

- northeastern Wyoming*. USGS Water Resources Investigation Report, 85-4246, 4(5), 1987: 533- 538
- 【27】 Sheail, J. 1984a. *Constraints on water-resources development in England and Wales, concept and management of compensation flows*. J. Environ Manager. 19:351-361
- 【28】 Sheail, J. 1984b. Historical development of setting compensation flows. In: Gustard A, Cole G, Marshall D, et al. *A Study of Compensation flows in the UK, report 99*. Institute of Hydrology, Wallingford. Appendix (I)
- 【29】 Geoffrey, E. P. 1996. Water in crisis: Paths to sustainable water use, *Ecology Applications*. 8 (3): 571-579
- 【30】 姚治军等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析, *水科学进展*, 2002.13 (1): 111—115
- 【31】 夏军、朱一中, 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战, *自然资源学报*, 2002.17(3): 262—269
- 【32】 沈国舫. 生态环境建设与水资源的保护和利用. *西北生态环境论坛*. 170-177.
- 【33】 李丽娟, 郑红星. 河流系统的环境与生态需水量: 海滦河流域的研究. *地理学报*. 2001.11(2): 495—499.
- 【34】 Hughes, R. M., Whittier, T. R., Thiele, J. E., et al. 1992. Lake and stream indication for the United States environmental protection agency's environmental monitoring and assessment program .In: Daninel H, Mckenzie D, Hyatt E, et al. *Ecological indicators*. Barking: Elsevier Science Publishers Ltd, 305-335.
- 【35】 Henry, C. P., Amoros, C., Giuliani, Y. 1995b. Restoration Ecology of Riverine Wetlands: II. An Example in Former Channel of the Rhone River. *Environmental Management*, 19(6):891-902.
- 【36】 Naiman, R. J. Magnuson, J. J., Mcknight, Diane, M. 1993. The freshwater

imperative. Island Press.

- 【37】 汤奇成.绿洲的发展与水资源的合理利用,干旱区资源和环境,9(3), 1995:107-112.
- 【38】 贾宝全,许英勤等.干旱区生态用水的概念和分类—以新疆为例,干旱区地理,21(2),1998:8-12.
- 【39】 贾宝全, 慈龙骏.新疆初步用水量的初步估算, 生态学报, 20 (2), 2000: 243-250.
- 【40】 贺东辰,刘维义.柴达木盆地水资源开发潜力分析.西北水资源与水利工程,9 (2),1998:53-57.
- 【41】 Zhang Xingyou, Shen Yuanchun.1999. A preliminary study on ecological water demand estimation in the arid region-A case in the Qaidam basin, The journal of Chinese Geography, 9(2):155-162.
- 【42】 李丽娟,郑红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算,地理学报,55(4),2000:495-500.
- 【43】 刘昌明,何希吾. 21 世纪中国水问题方略.北京: 科学出版社. 1996:82-96.
- 【44】 刘昌明.中国 21 世纪水供需分析:生态水利研究.中国水利,(10),1999: 18-20.
- 【45】 王西琴,刘昌明,杨志峰.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究 (I)-理论.环境科学学报,21(5),2001a:543-547.
- 【46】 王西琴,杨志峰,刘昌明.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究 (II)-应用.环境科学学报,21(5),2001b:548-552.
- 【47】 洪阳、叶文虎, 可持续环境承载力的度量及其应用, 中国人口·资源与环境, 1998.8 (3) :54—58.
- 【48】 朱一中等, 关于水资源承载力理论与方法的研究, 地理科学进展, 2002.21(2)
- 【49】 李丽娟,郑红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算.海河水

- 利,2003, (1):6-9
- 【50】 严登华,何岩等.东辽河流域河流系统生态需水研究.水土保持研究,2001,15(1):46-49.
- 【51】 朱晓原,张学成.黄河水资源变化研究.黄河水利出版社.1999: 122-123.
- 【52】 杨志峰,崔保山,刘静玲,等.生态环境需水量理论、方法与实践.北京:科学出版社,2003:50-54.
- 【53】 廖文辉,韩龙喜.三峡大坝至葛洲坝间沿程水污染一维预测模拟.水文, 21 (2), 2001: 28—30.
- 【54】 傅国伟.河流水质数学模型及其模拟计算.北京:中国环境科学出版社, 1987: 97-108
- 【55】 余常昭.环境流体力学导论.北京:清华大学出版社,1992:178—183.
- 【56】 Fischer H B. Discussion of “simple method for predicting dispersion in stream” by Mcquivey R S and Keefer T. J. Environ. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1975(101): 453-455.
- 【57】 吴持恭.水力学,上册(第二版),北京:高等教育出版社,1982:269—323.
- 【58】 薛惠锋等,水资源可持续利用的理论与实践,西安地图出版社, 1998
- 【59】 彭再德、杨凯、王云,区域环境承载力研究方法初探,中国环境科学, 1996.16 (1) :6-9
- 【60】 冉圣宏等,区域环境承载力理论及应用,环境科学进展, 1997.12 增刊
- 【61】 周德群著,可持续发展研究:理论与模型,中国矿业大学出版社, 1998
- 【62】 崔凤军,城市水环境承载力的实例研究.山东矿业学院学报, 1995.14 (2): 140—144
- 【63】 郭秀锐、毛显强、冉圣宏等,国内环境承载力研究进展,中国人

- 口、资源与环境, 2000.10 (3): 28—30
- 【64】 曾维华、王华东、薛纪渝、叶文虎、关伯仁, 环境承载力理论及其在湄洲湾污染控制规划中的应用, 中国环境科学, 1998.18 增刊: 70—73
- 【65】 面向 21 世纪的环境科学与可持续发展——北京大学百年校庆国际研讨会论文集, 科学出版社, 2000
- 【66】 唐剑武、郭怀成、叶文虎, 环境承载力及其在环境规划中的初步应用, 中国环境科学, 1997.17 (1): 6—9
- 【67】 高占喜著, 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用, 中国环境科学出版社, 2001
- 【68】 惠洪河等, 水资源承载力评价指标体系研究, 水土保持通报, 2001.21(1)
- 【69】 谢红彬, 关于资源环境承载容量问题的思考, 新疆大学学报, 1997.14 (1): 79—84
- 【70】 崔凤军, 环境承载力论初探, 中国人口、资源与环境, 1995.5 (1): 76—88
- 【71】 余卫东、闵庆文、李湘阁, 水资源承载力研究的进展与展望, 干旱区研究, 2003.20 (1): 60—66
- 【72】 孙鸿烈主编, 中国资源科学百科全书, 中国大百科全书出版社, 石油出版社, 2000
- 【73】 王祥荣著, 生态与环境——城市可持续发展与生态环境调控新论, 东南大学出版社, 2000
- 【74】 高吉喜等著, 21 世纪生态发展战略, 贵州科技出版社, 2001.3
- 【75】 龙腾锐、姜文超, 水资源(环境)承载力的研究进展, 水科学进展, 2003.14 (2): 249—253
- 【76】 苏志勇等, 黑河流域水资源承载力的生态经济研究, 冰川冻土, 2002.24 (4): 400—406

- 【77】程国栋,承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架,冰川冻土,2002.24(4):361—367
- 【78】秦莉云、金忠青等,淮河流域水资源承载能力的评价分析,水文,2001.23(1):14—17
- 【79】陈燕,环境承载力分析方法在嵩明县工业布局规划中的应用,云南环境科学,1998.17(4):6—8
- 【80】资源环境信息化工程,薛惠锋、张洪才主编,陕西科学技术出版社,2001
- 【81】王顺久、侯玉、张欣莉、丁晶,流域水资源承载能力的综合评价方法,水利学报,2003.1
- 【82】姜德娟、王会肖、李丽娟,生态环境需水量分配及计算方法综述,地理科学进展,2003.22(4):369—378
- 【83】刘静玲、杨志峰,湖泊生态环境需水量计算方法研究,自然资源学报,2002.17(5):604—609
- 【84】刘燕华.柴达木盆地水资源合理利用与生态环境保护.北京:科学出版社,2000
- 【85】丰华丽,干旱区流域生态需水量估算原则分析,环境科学与技术,2002.25(1):31-33
- 【86】崔树彬,关于生态环境需水量若干问题的探讨,中国水利,2001.8:71-74
- 【87】王让会等.塔里木流域“四源一干”生态需水量的估算.水土保持学报 2001.3
- 【88】丰华丽,王超,李勇.流域生态需水量的研究.环境科学动态.2001.1
- 【89】A.Schneiders,C.Wils,R.Verheyen,The use of ecological information in the selection of quality objectives for river conservation and restoration in Flanders(Belgium),Aquatic Ecosystem Health and

Management 2(1999)137-154

- 【90】 D.A.Hughes, Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African rivers, *Journal of Hydrology* 241(2001)140-151
- 【91】 中国林学会编, 西北生态环境论坛——西北地区生态环境建设研讨会专辑, 中国林业出版社, 2001
- 【92】 黄漪平等编著, 太湖水环境及其污染控制, 科学出版社, 2001
- 【93】 J.King, D.Louw. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 1(1998),109-124
- 【94】 Martin Pusch, Andreas Hoffmann. Conservation concept for a river system (River Spree, Germany) impacted by flow abstraction in a large post-mining area. *Landscape and Urban Planning* 51(2000)165-176
- 【95】 K.Rowntree, R.Wadson. A geomorphological framework for the assessment of instream flow requirements. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 1(1998),125-141
- 【96】 黄承才等, 富营养化水中 14 种野生植物蒸腾与营养吸收的相关性, *浙江林业科技*, 1999.18(6):3-8
- 【97】 水利部牧区水利科学研究所编著. 草原灌溉. 北京:水利电力出版社, 1995
- 【98】 闵睿. 鄱阳湖水面蒸发量的确定. *人民长江*. 1998.29 (5) 29-31
- 【99】 王积强著, 中国北方地区若干蒸发实验研究. 科学出版社, 1990
- 【100】 朱岗崑著, 自然蒸发的理论及应用. 气象出版社, 2000
- 【101】 王积强, 天然湖泊蒸发量之测算, *干旱区研究*, 1994.11 (2)
- 【102】 谢贤群、左大康、唐腾银主编, 农田蒸发——测定与计算 (国家自然科学基金委员会资助项目). 气象出版社, 1991

- 【103】 李万春等, 高原咸水湖水面蒸发估算——以兹格塘错为例, 湖泊科学, 2001.13 (3)
- 【104】 刘昌明, 王会肖等著, 土壤——作物——大气界面水分过程与节水调控。科学出版社, 1999
- 【105】 王积强, 蒲草蒸发量的测算, 新疆地理, 1984.7 (1)
- 【106】 裴新国、闫晓燕、周国良等, 博斯腾湖的盐污染及其控制, 干旱区地理, 1991.14(1):59-62
- 【107】 马尔慧, 新疆博斯腾湖的湖滨沼泽, 1989.20(6):554-563
- 【108】 成正才、李宇安, 博斯腾湖的水盐平衡与矿化度, 干旱区地理, 1997.20(3):43-49
- 【109】 裴新国、闫晓燕, 博斯腾湖生态环境的演变, 干旱区研究, 1992.9(4):57-62
- 【110】 王让会等, 新疆塔里木河流域生态脆弱带的环境质量综合评价, 环境科学, 2001.22(2):7-11
- 【111】 程其涛, 博斯腾湖水质矿化度演变及展望, 大自然探索, 1994.13(2):70-76
- 【112】 刘松, 博斯腾湖水质矿化度模型及预测研究, 干旱环境监测, 1996.10(3):142-146
- 【113】 任学慧, 广阔水面蒸发模式, 陕西师大学报, 1995.23 增刊
- 【114】 程维新、胡朝炳、张兴权著, 农田蒸发与作物耗水量研究。气象出版社, 1993
- 【115】 Ralf Seppelt, Application of optimum control theory to ageoecosystem modeling, Ecological Modelling 121(1999)161-183
- 【116】 Martin Wegehenkel, Test of a modeling system for simulating water balances and plant growth using various different complex approaches, Ecological Modelling 129(2000)39-64
- 【117】 Wang Yongsheng, Han Shijie, Sun Jiwu, Effects of water state of soil on

- ecological boundary of leaf surface of populus davidiana, Journal of forestry research, 1998.9(1):16-18
- 【118】 Savka Zlatarova, Dora Slavtcheva and Bojanka Georgieva, Ecological research on the TZONEVO dam as a possible alternative source for the water supply of varna city, Wat.Sci.Tech.1999.39(8):155-160
- 【119】 L.Zhang, W.R.Dawes, and G.R.Walker. Response of mean evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale, Water Resources Research, 2000. 37 (3) 701-709
- 【120】 Oregon William R. Bidlake, Evapotranspiration from a bulrush-dominated wetland in the KLAMATH basin, Journal of the American Water Resources Association, 2000.36(6):1309-1320
- 【121】 Stannard, D.I. 1993. Comparison of Penmen-Monteith, Shuttle-worth-Wallace, and Modified Priestley-Taylor Evapotranspiration Models for Wildland Vegetation in Semiarid Rangeland. Water Resources Research 29:1379-1392
- 【122】 陶文铨, 数值传热学, 西安交通大学出版社, 2001
- 【123】 黄真理、李锦绣、廖文根、罗以生, 中国环境水力学 2002, 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- 【124】 李义天、赵明登、曹志芳, 河道平面二维水沙数学模型, 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- 【125】 李炜, 环境水力学进展, 武汉水利电力大学出版社
- 【126】 陈毓龄、张世森. 滇池水体富营养化水质预测模型的研究. 成都科技大学学报. 1991.6.63-69
- 【127】 张永泽等. 湖泊生态动力学模型的改进研究. 成都科技大学学报. 1996.2.1-7
- 【128】 金相灿, 屠清英主编, 湖泊富营养化调查规范. 中国环境科学出版社, 1990
- 【129】 金相灿主编, 中国湖泊水库环境调查研究. 中国环境科学出版社,

1990

- 【130】 黄玉瑶编著, 内陆水域污染生态学——原理与应用。科学出版社, 2001
- 【131】 金相灿主编, 湖泊富营养化控制和管理技术, 化学工业出版社, 2001
- 【132】 夏军等, 汉江富营养化动态模型研究, 重庆环境科学, 2001.23(1):20-23
- 【133】 戴树桂、王永岩, 生态模型在环境化学中的作用, 环境化学, 1990.9(2):73-84
- 【134】 杜宝汉、李永安, 用灰色关联度模型评价湖泊富营养化, 四川环境, 1999.18(4):48-52
- 【135】 李强, 灰色动态模型在湖泊 TN、TP 贮蓄量预测中的应用, 水资源保护, 1998.2:23-26
- 【136】 全为民等, 湖泊富营养化模型研究进展, 生物多样性, 2001.9(2):168-175
- 【137】 王其藩编著, 系统动力学, 清华大学出版社, 1985
- 【138】 张永良、刘培哲, 水环境容量综合手册, 北京清华大学出版社, 1991
- 【139】 杨文龙、杨常亮, 滇池水环境容量模型研究及容量计算结果, 云南环境科学, 2002.21(3):20-23
- 【140】 刘文洋、李喜俊等, 新疆博斯腾湖水环境容量研究, 环境科学研究, 1999.12(1):35-38
- 【141】 宿俊英、刘述坤等, 太湖水环境容量的研究, 水利学报, 1992.11: 22-36
- 【142】 李凡修等, 集对分析用于湖泊富营养化评价研究, 重庆环境科学, 2000.22(6)
- 【143】 司全印, 冉新权, 周孝德等著. 区域水污染控制与生态环境保护研究. 北京:中国环境科学出版社,2000
- 【144】 夏军等, 博斯腾湖可持续水资源管理应用研究, 郑州大学, 2000.6

- 【145】 王为东、王大力等, 芦苇型湿地生态系统的潜水水质状态研究, 生态学报, 2001.21(6):919-925
- 【146】 李卫军等, 不同生长型芦苇与土壤水盐相关的研究, 中国草地, 1995.6.20-23
- 【147】 杨海莲等, 不同生境芦苇的营养成分分析, 草业学报, 1994.3, 1-6
- 【148】 Jiann-Chu Chen, Wei-Chi Chen, Salinity tolerance of *Halimolobos diversicolor supertexta* at different Halinity and temperature levels, *Aquaculture* 181 (2000)191-203
- 【149】 J.B.Adams, G.C.Bate, Growth and photosynthetic performance of *Phragmites australis* in stuarine waters: a field and experimental evaluation, *Aquatic botany* 64(1999)359-367
- 【150】 Mihaela Pauca-Conanescu, Olga A. Clevering, Jenica Hanganu, Phenotypic differences among ploidy levels of *Phragmites australis* growing in Romania, *Aquatic Botany* 64(1999)223-234
- 【151】 Monika Hardej, Teresa Ozimek, The effect of sewage sludge flooding on growth and morphometric parameters of *Phragmites australis*, *Ecological Engineering* 18(2002)343-350
- 【152】 Jenica Hanganu, Gridin Mihail, Hugo Coops, Responses of ecotypes of *Phragmites australis* to increased influence: a field study in the Danube Delta, Romania, *Aquatic Botany* 64(1999)351-358
- 【153】 David M. Burdick, Robert Buchsbaum, Eric Holt, Validation in soil salinity associated with expansion of *Phragmites australis* in salt marshes, *Environmental and Experimental Botany* 46 (2001) 27-261
- 【154】 Mathias Herbst, Ludger Kappen, The ratio of transpiration versus evaporation in a reed belt as influenced by weather conditiona, *Aquatic Botany* 63(1999)113-125

- 【155】 P.Griffin and C.Pamplin,The advantages of a constructed reed bed based strategy for small sewage treatment works,Wat.Sci,Tech.38(1998)143-150
- 【156】 Jurgen Kern,Christine Idler,Treatment of domestic and agricultural wastament by reed bed systems,Ecological Engineering 12(1999)13-25
- 【157】 徐新华等著,环境保护与可持续发展,化学工业出版社,2000
- 【158】 沈德中编著,污染环境的生物修复,化学工业出版社,2001
- 【159】 沈国舫主编,中国环境问题院士谈,中国纺织出版社,2001
- 【160】 王大力、尹澄清等,植物根孔在土壤生态系统中的功能,生态学报,2000.20(5):869-874
- 【161】 刘昌明、何希吾,我国21世纪上半叶水资源需求分析,中国水利,2000.1:19-20
- 【162】 尤作亮,芦苇塘及其应用问题,农业环境保护,1998.17(4):187-189
- 【163】 左其亭等,生态系统模拟与预测的人工神经网络模型方法,干旱区资源与地理,2001.15(4):17-21
- 【164】 张永泽,自然湿地生态恢复研究综述,生态学报,2001.21(2):309—314
- 【165】 曲向荣等,辽东湾芦苇湿地对陆源营养物质净化作用的初步研究,应用生态学报,2000.11(2)
- 【166】 任海、彭少麟编著,恢复生态学导论,科学出版社,2001
- 【167】 孔繁翔主编,环境生物学,高等教育出版社,2000
- 【168】 孙广智、于忠民等,人工芦苇床污水处理技术,污染防治技术,1999.12(1):1-4
- 【169】 李科德、胡正嘉,芦苇床系统净化污水的机理,中国环境科学,1995.15(2):140-144
- 【170】 张甲耀、夏盛林等,潜流型人工湿地污水处理系统中芦苇地生

- 长特性及净化能力, 水处理技术, 1998.24(6):363-367
- 【171】 赵可夫等, 芦苇湿地在处理污水中的作用及机理的探讨, 论文选刊, 2000.4:8-11
- 【172】 王海珍等, 水生植被对富营养化湖泊生态恢复的作用, 自然杂志 24 (1): 33—36
- 【173】 种云霄、胡洪营、钱易, 大型水生植物在水污染控制治理中的应用研究进展, 环境污染治理技术与设备, 2003.4(2):36-40
- 【174】 白晓慧等, 利用自然湿地处理城市污水的试验研究, 哈尔滨建筑大学学报, 1998.31(6): 63—67
- 【175】 Jürgen Kern, Christine Idler, Treatment of domestic and agriculture wastewater by reed bed system , Ecological Engineering 12(1999)13—25
- 【176】 G.Sun, K.R.Gray, A.J.Biddlestone, Treatment of Agricultural Wastewater in Downflow Reed Beds:Experimental Trials and Mathematical Model,J.agric.Engng Res.(1998)69.63—71
- 【177】 Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in the CZECH Republic the First 5 Years Experience, Wat.Sci. Tech.1996.34(11): 159—164
- 【178】 申碧峰, 北京市宏观经济水资源系统动力学模型, 北京水利, 1995.2
- 【179】 杨建强、罗先香, 水资源可持续利用的系统动力学仿真研究, 城市环境与城市生态, 1999.12(4):26-29
- 【180】 陈传美等, 郑州市土地承载力系统动力学研究, 河海大学学报, 1999.27(1):53-56
- 【181】 丁凡等, 中国可持续发展系统动力学仿真研究——环境部分, 计算机仿真, 1998.15.(1):7-10
- 【182】 王艳等, 中国可持续发展系统动力学仿真研究——社会部分,

- 计算机仿真, 1998.15.(1):5-7
- 【183】 陈成鲜, 我国水资源可持续发展系统动力学模型研究, 上海理工大学学报, 2000.22(2):154-159
- 【184】 王斌等, 青岛地区水资源系统动力学模型, 青岛建筑工程学院学报, 1997.18(3):59-65
- 【185】 国家环境保护局自然保护司编著, 中国生态问题报告, 中国环境科学出版社, 1999
- 【186】 徐强著, 区域环境经济与预警, 中国环境科学出版社, 2001.11
- 【187】 朱启贵著, 可持续发展评估, 上海财经大学出版社, 1999
- 【188】 冷宝林主编, 环境保护基础, 化学工业出版社
- 【189】 程声通、陈毓龄编著, 环境系统分析, 高等教育出版社, 1990
- 【190】 杨京平主编, 生态安全的系统分析, 化学工业出版社, 2002.5
- 【191】 中国西北干旱区湖泊水资源——环境问题与对策, 干旱区资源与环境, 2001.15(2):7-10
- 【192】 吴熊勋等著, 城市水环境污染控制, 东南大学出版社,
- 【193】 蔡晓明编著, 生态系统生态学, 科学出版社, 2000
- 【194】 朱建盈, 二十一世纪中国的水供求, 中国水利, 2001.1:21-22
- 【195】 刘燕华、李秀彬主编, 脆弱生态环境与可持续发展, 商务出版社, 2001
- 【196】 崔保山、刘兴土, 湿地生态系统设计的一些基本问题探讨, 应用生态学报, 2001.12(1):145—150
- 【197】 刘鸿亮等著, 中国水环境预测与对策概论, 中国环境科学出版社, 1988
- 【198】 Mcquivey R S, Keefer T. Simple method for predicting dispersion in stream. J. Environ. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. , 1974(100): 997-1011.
- 【199】 Iwasa Y, Aya S. "predicting longitudinal dispersion coefficients in

open-channel flow". In: Environmental Hydraulics. Ed. By Lee J H W, et al., A.Balkema, Rotterdam, NL, 1991.

- 【200】 Seo I W, Cheong T S. Prediction of longitudinal dispersion coefficient in natural streams. In: Tickle K S, et al. Stochastic Hydraulics. 96.A.A. balke ma Pub. 1996.
- 【201】 邓建中, 刘之行. 计算方法. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 8

附 录

一、攻读博士学位期间发表的论文

1. Pan Junfeng, Wang Yumin. The research of water environment capacity in lake - taking Bosten Lake as an example. 4th International Symposium on Environmental Hydraulics & 14th Congress of IAHR-APD, 2004, 12
2. 潘军峰, 冯民权, 郑邦民, 闵涛. 丁坝绕流及局部冲刷坑二维数值模拟. 四川大学学报, 2005(1)
3. 潘军峰, 闵涛, 周孝德, 冯民权. 对流-扩散方程逆过程反问题的稳定性及数值求解. 武汉大学学报(工学版), 2005(1)
4. 詹义正, 潘军峰, 曹志芳等. 非淹没丁坝坝头冲刷深度的计算. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(4)

二、攻读博士学位期间主持或参加的科研项目

1. 国家高技术研究发展计划(863计划), 华北半湿润偏旱井灌区及旱作区(山西晋中)节水农业综合技术体系集成与示范(项目编号: 2002AA2Z4311), 2002-2005(项目负责人)
2. 《山西省第二次水资源评价及水资源总体规划》专题研究, 2001-2003(项目技术负责人)
3. 中澳合作永定河上游阳高县污水利用及治理研究, 2001-2005(项目负责)
4. 山西省重点工程汾河上游治理项目(项目总指挥)
5. 《21世纪初期首都水资源可持续利用规划》项目(山西项目负责人)

三、攻读博士学位期间的论著

1. 《山西河流》(书号: ISBN7-03-014102-4). 主编. 北京: 科学出版社, 2004年9月

2. 《山西省水资源评价》. 副主编. 北京: 中国水利水电出版社, 2005年6月(待出版)

四、攻读博士学位期间获得的科技进步奖

1. 井渠结合灌溉类型区农业高效用水模式与产业化示范. 科技进步一等奖(证书号: 2004-J-1-007, 排名第四), 山西省科学技术奖励委员会, 2005