

国内图书分类号：TV213.4

国际图书分类号：556

学校代码：10054

密级：公开

工学硕士学位论文

永定河流域水资源优化配置研究

硕士研究生：林春坤

导师：门宝辉 副教授

申请学位：工学硕士

学科：水利工程

专业：水文学及水资源

所在学院：可再生能源学院

答辩日期：2013年3月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TV213.4
U.D.C: 556



Dissertation for the Master's Degree in Engineering

Research on Water Resources Optimal Allocation in
Yongding River Basin

Candidate:	Chunkun Lin
Supervisor:	Associate Prof. Baohui Men
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Hydrology and Water Resource
School:	School of Renewable Energy
Date of Defence:	March, 2013
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的博士学位论文《永定河流域水资源优化配置研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：林春坤

日期：2013 年 3 月 28 日

华北电力大学硕士学位论文授权使用书

《永定河流域水资源优化配置研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密☒

作者签名：林春坤

日期：2013 年 3 月 28 日

导师签名：门宝辉

日期：2013 年 3 月 28 日

摘 要

近年来,生态与环境问题逐渐成为水资源优化配置研究的重点。本文主要进行永定河流域水资源优化配置研究,研究重点为河道内的生态需水量,在此基础上初步开发永定河多水源配置综合调控模型。主要研究内容及成果如下:

(1) 确定生态目标,并以该目标为基本出发点,通过对流域生态状况调查、生态环境的检测来分析流域水资源的供需情况,从而确定该流域的生态需水量。研究提出适合永定河流域特征的生态需水量计算方法,提出满足生态修复目标要求的水质、水量及流速等指标阈值。

(2) 采用传统的 Tennant 法、流量历时曲线法、RVA 法、以及湿周法,计算不同河段生态需水量的成果,作为永定河生态需水量比选方案和标准。在研究过程中,提出了与水资源优化配置的时间尺度相一致的小尺度生态需水量计算方法,以往的生态需水量计算成果只有总量,该方法可以获得生态需水量的年内分配,作为水资源优化配置的依据。

(3) 开展永定河流域内水资源开发利用状况调查,分析可利用水源,根据南水北调的外调水进入北京以后的水资源形势变化,确定用于永定河生态修复的水源结构,并依据生态需水计算成果,初步开发永定河多水源配置综合调控模型。

(4) 依据永定河多水源配置综合调控模型,提出官厅水库生态供水的调度方案,并最终提出永定河水资源优化配置的调控方案,实现北京首都社会的和谐发展、经济的可持续增长和优良的生态环境。

关键词: 永定河流域; 水资源; 优化配置; 生态需水; 多水源配置

Abstract

Ecological and environmental problems is gradually becoming an research focus of water resources optimal allocation. This paper mainly research the Yongding river basin water resources allocation optimization, emphasis on the instream ecological water demand. And developed a preliminary integrated control model of Yongding river water allocation. The main research contents and results are as follows:

(1)Determining the ecological target, and taking the target as the basic starting point to analyze river basin water resources supply and demand situation on the base of the basin ecological status investigation and the ecological environment detection, thereby determining the basin's ecological water demand. Raise calculation methods of ecological water requirement fit for Yongding river basin characteristics and the index threshold of water quality, water and velocity meeting for the requirement of ecological restoration.

(2)Using the traditional Tennant method, Flow Duration Curve method, RVA method, as well as wetted perimeter method to calculate the ecological water demand in different stream segments, as the alternatives and criteria of Yongding river ecological water demand. In the course of the study, a small scale calculation methods of ecological water requirement was put forward, which is consistent with the optimal allocation of water resources in the time scale. There was only gross ecological water requirement calculation results before, but this method can obtain the annual distribution of ecological water requirement, as the basis of optimized allocation of water resources.

(3)Investigating the water resources development and utilization status of Yongding river basin, analyzing the available water resources, determining the Yongding river ecological restoration water structure according to the water resources situation after the south to north water transferring into Beijing, and preliminary developing of the Yongding river water allocation integrated control model on the basis of the ecological water demand calculation results.

(4)According to the Yongding river water allocation model for multi-water

resources, put forward the ecological water supply scheduling scheme for Guanting reservoir, and finally proposed the Yongding river water resources optimization allocation regulation scheme, implementation the harmonious development of the society, sustainable economic growth and excellent ecological environment of the capital Beijing.

Keywords:the Yongding river basin, water resources, optimal allocation, ecological water demands, multi-water resources allocation

目 录

摘 要	I
Abstract	III
目 录	V
第 1 章 绪 论	1
1.1 选题背景及意义	1
1.2 国内外研究现状及分析	2
1.2.1 生态需水研究现状	2
1.2.2 水资源优化配置研究现状	4
1.3 研究内容	5
1.3.1 永定河流域生态需水量研究	5
1.3.2 永定河流域水资源优化配置研究	6
1.4 研究目标	6
1.5 拟解决的关键问题	6
1.6 研究方案	6
1.6.1 建立永定河流域数据库	6
1.6.2 生态需水量分析	6
1.6.3 水资源优化配置	7
1.6.4 技术路线	7
第 2 章 永定河流域概况	9
2.1 自然概况	9
2.2 经济概况	10
2.2.1 人口	10
2.2.2 经济	10
2.2.3 历史文化	11
2.3 本章小结	11
第 3 章 河道内生态需水量研究	13
3.1 概述	13
3.2 生态需水特点	13
3.3 生态需水的分类	14
3.4 生态需水的计算方法	15

3.4.1 水文学方法	15
3.4.2 水力学方法	17
3.4.3 栖息地方法	20
3.4.4 综合法	20
3.5 永定河官厅水库河道内生态需水量计算	20
3.5.1 流量历时曲线法	20
3.5.2 RVA 法	24
3.5.3 湿周法	27
3.6 本章小结	37
第 4 章 水资源优化配置研究	39
4.1 概述	39
4.2 永定河水源结构	39
4.3 永定河供水及用水分析	39
4.4 多水源配置模型	40
4.4.1 模型概述	40
4.4.2 模型建立	41
4.5 模型的应用及求解	43
4.6 配置方案的分析	49
4.7 本章小结	53
第 5 章 结 论	55
参考文献	57
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	63
致 谢	65

第 1 章 绪 论

1.1 选题背景及意义

近年来,围绕着河流的生态恢复、河流的健康生命、水利工程与生态环境的关系等方面的研究逐渐成为学术界研究的热点和难点,而贯穿这些问题始终的生态需水量的研究更是引人关注,成为水文水资源、生态与环境等相关领域的前沿问题。

现在我国正在进行和谐社会建设,和谐社会建设寓意深刻,其中人与自然是和谐是最基本的方面,而这其中又以人与水和谐最为关键和重要。因为水是一切生命的源泉,水资源的可持续利用制约着社会的可持续发展。研究生态需水,其目的主要也是为了实现人类与自然的和谐,避免人类的生产、生活挤占生态系统的用水,实现流域水资源优化配置,进而为实现流域生态系统可持续发展提供科学依据。

永定河是北京的五大水系之一,是流经北京市境内最大的一条河流,是“北京的母亲河”。在北京市内的流域面积 3168 km^2 ,其中山区 2491 km^2 ,平原区 677 km^2 。永定河北京段河长约 170 km ,一般划分为官厅水库至三家店段、三家店至黄良铁路段、和黄良铁路至梁各庄段。近几十年来,永定河水量逐年减少,河道干涸,污染加剧,引发了一系列环境问题:

(1) 永定河是海河水系中含沙量最高的河流,多年平均沙量 $10\sim 100 \text{ kg/m}^3$,洪水时最大含沙量达 33% ,仅次于黄河,导致官厅水库严重淤积,目前已经淤积 6.46 亿 m^3 ,约占总库容的 30% ,且淤积仍在继续;

(2) 永定河水量逐年减少,在三家店以下常年缺水,特别是卢沟桥河段一年 365 天几乎都干涸;

(3) 永定河沿河工农业污水排放加剧,河水水质恶化,自从上世纪 80 年代以来,官厅水库逐渐退出北京市生活水资源供给的水源地之列。河道干涸,河道内淤积泥沙易随风飞扬,严重影响北京市空气质量。

永定河的生态状况与北京市的生态环境质量密切相关,因此,永定河生态需水及水资源优化配置研究对于北京首都社会的和谐发展、经济的跨越式增长以及水资源可持续的开发利用都具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状及分析

1.2.1 生态需水研究现状

1.2.1.1 国外研究现状

20 世纪 40 年代,随着水资源开发利用程度的逐渐提高,渔场的减少问题引起了美国的资源管理部门的注意和关心。美国 USFWS (U.S. Fish and Wildlife Service) 协会对河道内流量开展了一系列的研究,得出关于鱼类的生长、繁殖和产量与河流流量的关系。在 1950~1960 年期间,该协会又开始组织关于河流生态流量的定量和基于过程的研究,主张建立流量及流速与水生动植物的联系。1971 年,美国出台了用河道内流量法确定自然和景观河流的基本流量方法。1976 年, Tennant D.L.等人^[1]在完成对美国西部地区河流流量与生物的关系的研究后,提出了基于水文学的 Montana 估算方法,奠定了河流需水的理论基础,对后期的研究起了很大的促进作用。1978 年,美国的第二次全国水资源评价,综合考虑了河道外用水和河道内用水,第一次明确将生态需水作为河道内主要的控制用水,把分区河段出口的月径流量作为估算每一个水资源分区内水生生物生态需水量时的判断依据。到 20 世纪 80 年代初期,美国全面调整流域的开发和管理目标,提出了较为完善的河道内生态需水量计算方法,初步形成了生态需水研究的雏形。

生态需水量这一概念是 Gleick^[2]于 1995 年首先提出来的。同年, Falkenmak^[4]提出“绿水 (Green Water)”的概念,强调了生态系统对水资源的需求。1996 年, Rashin 等人^[5]提出了水的可持续利用这一观点,要求必须要有足够的水量来保护生态系统的最低水量需求,以保证其能够正常可持续利用,但是却没有给出其明确的概念和计算方法。1999 年, Whipple 等人^[8]认为水资源规划与管理需要作出适当调整,相应增大水供给在河道内的环境利用。同年, Baird 等人^[9]以各类型生态系统的基本结构和功能为基础,探讨了植物与水文过程两者之间的联系,这对生态需水研究的发展有很强的指导意义。

20 世纪末 21 世纪初,水资源与生态环境系统之间的相互关系逐渐被人类所认识,促使人类转变水资源的管理理念:抛弃以往的以人类需求为中心,强调生态环境需水的重要性。FRIEND 行动计划得以实施,促使国际间的生态需水研究广泛交流与合作,推动了生态需水研究的深度和广度不断扩大,使河流生态需水逐渐开始由单一目标发展转变为以多方面需求来估算河道流量。

1.2.1.2 国内研究现状

国内的生态需水研究起步于 20 世纪 90 年代, 由于研究对象、研究思路和技术手段的不同, 关于生态需水量及与之相关联的概念到目前为止有多种表达, 对于生态需水的概念不能形成统一的看法, 计算方法也各不相同。

1995 年以来, 汤奇成^[14]、贾宝全^[15]等人以新疆地区的生态用水为例, 开始对生态需水进行了一定程度的研究。1999 年, 刘昌明^[16]在《中国水利》提出我国 21 世纪水资源供需的“生态水利”问题, 并对 21 世纪中国水资源若干问题进行了讨论, 指出: 在可持续发展的理念下, 水资源的开发利用必须遵循水资源的开发与利用应该是不断的和可持续的, 以及满足社会和经济发展的需要两个原则。

新世纪以来, 我国生态需水研究也进入蓬勃发展时期。2000 年, 李丽娟、郑红星^[17]在研究海滦河流域河道生态环境需水时, 扩展了河道环境需水量的内涵。2001 年, 王让会等^[18]运用地下水、土壤水、植物生长与生态环境状况之间的定量关系来计算生态需水量。随着研究的不断深入, 生态需水研究领域也不断拓宽、理论也不断完善。2001 年, 王西琴^[19]针对渭河水污染严重的情况, 提出了环境功能设定法, 计算满足河道自净功能要求的需水量。2002 年, 崔保山、杨志峰^[20]将生态需水量扩展到湿地生态系统, 系统剖析了湿地生态系统生态环境需水量的计算方法和各种相关指标。2002 年, 石伟等^[21]根据黄河特殊性 & 黄河生态需水量研究现状, 将维持和保护河流功能的黄河下游生态需水分为汛期需水量与非汛期生态基流量, 在平滩流量输运能力最强的前提下, 估算黄河现有汛期输沙需水量。依据实测径流资料, 估算了下游水量控制断面花园口水文站和作为河口地区水量控制断面利津水文站的非汛期生态基流量。杨志峰^[22,23]分别于 2003、2004 年系统阐明了生态环境需水的内涵和特征, 包括概念的界定、需水的组成结构和需水特点等; 在此基础上, 提出了生态环境需水分级和计算方法; 同时以黄淮海地区为研究实例, 估算了研究区生态环境现状用水量、最小需水量、适宜需水量, 并计算了相应的缺水量, 为进一步开展不同类型生态环境需水规律研究奠定了理论基础。2005 年, 张远等^[24]提出了河道生态环境分区需水量的概念及计算方法, 并以黄河流域为例进行了实例分析, 结果表明黄河流域的河道需水分区需水量差异显著。

随着生态需水理论的创新, 其研究应用也越来越广泛。2005 年, 门宝辉、刘昌明、夏军、刘苏峡等^[25]通过分析南水北调西线调水区河道内的生态需水主要是满足水生生物栖息地的需水的要求, 讨论了水生生物产量与水体水量之间的关系, 认为在河道内径流 50% 保证率时, 河道径流的 30% 应为最小生态径流量。刘静玲、杨志峰、肖芳等^[26]以保证和改善河流生态系统总

体结构和功能完整性为目的,在明确区分了消耗型需水量和非消耗型需水量的基础上,建立了河流生态基流量整合模型。在计算得到海河流域主要河段以及主要湿地生态环境需水量的基础上,对海河流域生态基流量进行了整合计算。2005年,刘蕾^[28]采用了流量历时曲线法研究计算了松辽流域河道内生态需水,取得比较理想的效果。

综上所述,国内外在生态需水研究进展较快,到目前为止已经提出了一系列生态需水计算方法,并在多个流域得到很好的应用。但是目前生态需水的研究仍存在以下问题:生态需水的概念依然没有一个公认的界定,生态需水、生态用水、生态耗水等概念容易产生混淆;生态需水量时间尺度不协调,多以年为单位,无法直接应用于水资源优化配置。

1.2.2 水资源优化配置研究现状

1.2.2.1 国外研究现状

20世纪40年代,国外水资源合理配置研究进入萌芽发展阶段,其代表性成果就是 Masse 基于水资源系统分析提出了水库优化调度问题。1950以后,随着学科的交叉发展,系统分析优化技术被引入水资源优化配置研究中来,再加上迅速发展的计算机技术,许多新方法和手段被应用于水资源系统模拟模型技术的研究和应用。到了80年代,水资源分配的研究范围被不断扩大,理论及应用研究不断加深。进入20世纪80年代后期,随着决策支持技术、模拟优化技术和资源价值定量方法等方法的引入与应用,水资源优化配置的发展研究进入新阶段^[45]。90年代以来,一些优化算法在水资源优化配置当中得到应用,进一步促进了水资源优化配置的发展。

在水资源分配管理方面,Bjornlund H 和 Mckey J 提出集中机制和市场机制两种水资源分配机制。2000年,在荷兰海牙召开的世界水论坛部长级会议上 Islam M. Faisal 博士改进了水资源管理机制,提出要在水资源管理中体现综合性、面向市场、用水户参与和环境保护四大方面。

1.2.2.2 国内研究现状

自从新中国成立以来,水资源配置机制大致经历了三个阶段^[49]:1949~1965 供水不收费阶段,水资源配置由国家按需无偿配置;1965~1978 水资源低价配置模式阶段,出现了水资源所有权益和经营权益,但未得到重视;1978年至今,我国水资源产权和配置制度改革和政策变迁的时期,主要通过经济来调控水资源的产权和配置,多元化配置机制也在这一时期产生并发挥作用。随着水资源在社会可持续发展中的地位日渐突出,治水方针也不断与时俱进,相

对应的，水资源优化配置研究和应用实践也日趋成熟。

进入 90 年代以后，陈志恺、王浩等人首次建立了华北宏观经济水资源优化配置模型，研制了京、津、唐地区宏观经济水规划决策支持系统。“九五”期间，水资源配置的范畴被进一步拓展到社会-水资源-生态环境系统，水资源与经济、环境、生态三者紧密联系，促使生态需水量计算方法的提出。在“十五”期间，水资源合理理论与方法有了新进展，基于流域“自然-人工”二元水循环演化模式被提出，该模式构建了面向生态的水资源合理配置理论框架和方法体系，体现了水资源合理配置的可持续性、公平性、高效性和系统性。

近几年，水资源优化配置模型得到了蓬勃的发展，考虑的因素更加完善。2005 年，邵东国等人^[53]探讨了基于水资源净效益思想的水资源配置机制，确立了包括生存条件、承载能力、用水公平性和可持续性约束的水资源开发利用约束准则，构建了基于水资源净效益最大的水资源配置方案生成模型和水资源配置合理性评价模型，并对郑州市郑东新区龙子湖地区水资源优化配置进行了实证分析。2006 年，裴源生^[52]对宁夏经济生态系统水资源优化配置进行了研究，提出了面向经济生态系统的水资源优化配置研究框架，开发建立了平原区分布式水循环模型、广义水资源合理配置模型等多个独创性模型。2007 年，张永祥等^[72]建立了北京市朝阳区水资源经济优化模型，并运用单纯形法求解模型，计算了 2010 年、2020 年的水资源量最佳分配。

1.3 研究内容

1.3.1 永定河流域生态需水量研究

首先确定生态目标，并以该目标为基本出发点，通过对流域生态状况调查、生态环境的检测来分析流域水资源的供需情况，从而确定该流域的生态需水量。

研究提出适合永定河流域特征的生态需水量计算方法。提出满足生态修复目标要求的水质、水量及流速等指标阈值。

研究重点为河道内的生态需水量，采用传统的 Tennant 法、流量历时曲线法、RVA 法以及湿周法等，获得不同河段生态需水量的成果，作为永定河生态需水量比选方案和标准。研究提出与水资源优化配置的时间尺度相一致的小尺度生态需水量计算方法，以往的生态需水量计算成果只有总量，该方法可以获得生态需水量的年内分配，作为水资源优化配置的依据。

1.3.2 永定河流域水资源优化配置研究

开展永定河流域内水资源开发利用状况调查,分析可利用水源,根据南水北调的外调水进入北京以后的水资源形势变化,确定用于永定河生态修复的水源结构,并依据生态需水计算成果,初步开发永定河多水源配置综合调控模型。

1.4 研究目标

在理论上,把握国际前沿和热点,利用流量历时曲线和 RVA 理论计算月尺度最小生态需水量方法,揭示河流生态系统的演进规律,逐步丰富和发展生态水文学的理论。

在实践上,以永定河流域为案例,针对目前永定河下游生态环境情况,采用 Tennant 法、流量历时曲线法、RVA 法,湿周法等方法计算永定河不同河段的生态需水量,提出官厅水库生态供水的可调度方案,形成永定河水资源优化配置的调控方案,实现北京首都社会的和谐发展、经济的可持续增长和优良的生态环境。

1.5 拟解决的关键问题

研究拟提出一种与水资源优化配置年内分配的时间尺度相一致的小尺度生态需水量计算方法,并与其他类似方法进行比较,验证其在永定河流域的适用性,并应用于永定河流域水资源优化配置。

1.6 研究方案

1.6.1 建立永定河流域数据库

收集、调查永定河流域水文、经济数据等相关资料,构建永定河流域数据库。

1.6.2 生态需水量分析

确定永定河流域的生态保护目标,依据流域水循环机理,采用不同的方法分析计算永定河生态需水量,通过比较分析提出适用于永定河流域的生态需水量计算方法。

1.6.3 水资源优化配置

综合考虑生态需水的计算成果,利用水资源配置综合调控模型以及多水源生态支持决策系统等,构建永定河流域多水源配置综合调控模型,通过模型提出永定河(北京段)生态恢复条件下的水资源配置技术方案。

1.6.4 技术路线

本文研究的技术路线见图 1-1 所示。

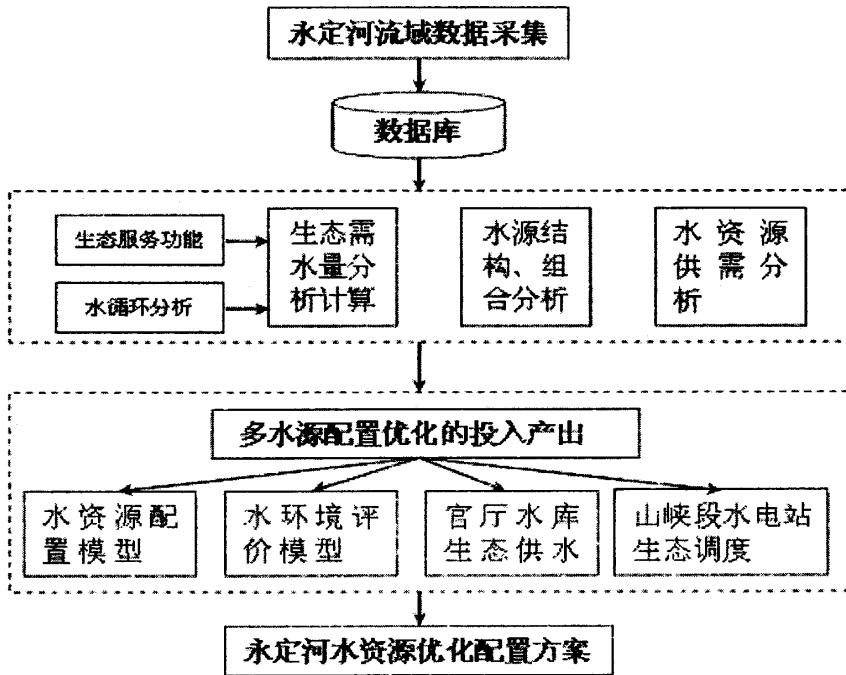


图 1-1 研究的技术路线图

此页不缺内容

第 2 章 永定河流域概况

2.1 自然概况

永定河是北京的五大水系之一，是流经北京市境内最大的一条河流，是“北京的母亲河”，其地理位置见图 2-1。在北京市内的流域面积 3168 km^2 ，其中山区 2491 km^2 ，平原区 677 km^2 。永定河北京段河长约 170 km ，一般划分为官厅水库至三家店段、三家店至黄良铁路段、和黄良铁路至梁各庄段。永定河流域多年平均降水量值为 440 mm ，汛期降水量占全年降水量的 $75\%-85\%$ ，暴雨常发生在 7 月下旬和 8 月上旬，7、8 月降雨极易造成洪涝灾害。永定河是海河水系中含沙量最高的河流，多年平均沙量 $10\sim 100 \text{ kg/m}^3$ ，洪水时最大含沙量达 33% ，仅次于黄河，导致官厅水库严重淤积，目前已经淤积 6.46 亿 m^3 ，约占总库容的 30% ，且淤积仍在继续。近几十年来，永定河水量逐年减少，在三家店以下常年缺水，特别是卢沟桥河段一年 365 天几乎都干涸。河道干涸，污染加剧，引发了一系列环境问题。永定河沿河工农业污水排放加剧，河水水质恶化，自从上世纪 80 年代以来，官厅水库逐渐退出北京市生活水资源供给的水源地之列。河道干涸，河道内淤积泥沙易随风飞扬，严重影响北京市空气质量。

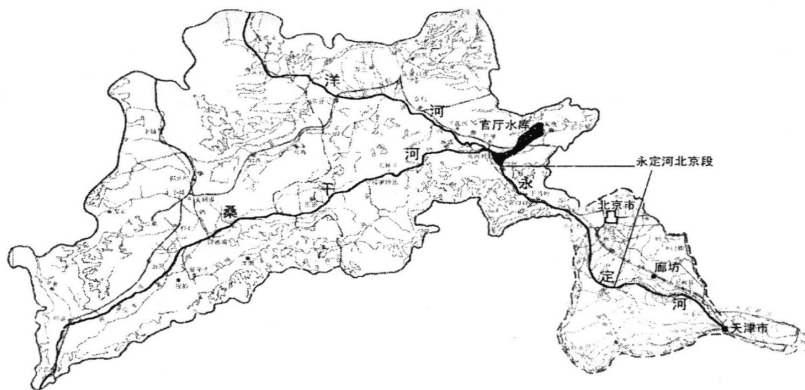


图 2-1 永定河地理位置

官厅水库是新中国成立后兴建的第一座大型水库^[56]，坝址位于永定河山峡入口处，控制上游流域面积 43402 km^2 ，占永定河总流域面积的 92.8% ，是一座兼防洪、供水、发电和灌溉等多种功能的综合利用工程，是根治永定河及其流域开发的大型控制性工程，是首都北京主要供水水源之一。官厅水库原设计库容 22.7 亿 m^3 ，坝顶高程 485.27 m ，1987 年改建后水库坝顶高程为 492 m ，库容增到 41.6 亿 m^3 ，调洪库容为 29.9 亿 m^3 ，防洪能力提高到 1000 年一遇可

能最大洪水校核。库区由永定河库区和妫水河库区组成，跨河北省怀来县和北京市延庆县。

官厅水库上游流域主要由洋河、桑干河、妫水河及其支流汇集而成。流域自然地理复杂，绝大部分属于黄土高原和黄土丘陵，植被覆盖度差，水土流失严重，属大陆性季风气候，干燥寒冷多风，少雨，多年平均降水量 401.8mm（1955-2006），年际分配中经常出现连续枯水年现象。

2.2 经济概况

永定河流域主要行政区域包括北京、河北、山西、内蒙古 4 省、市、自治区的 32 个县市。官厅水库上游近 70%是农业人口，耕地约 103.6 万 hm^2 。70 年代以前，永定河流域经济活动以农业为主，有引洪漫灌的习惯。80 年代以后，采煤、电力、化工、造纸、制药等工业发展很快。北京段位于北京的西南部，横跨门头沟、石景山、丰台、大兴、房山五个行政区。其在北京市内沿河流域的社会经济概括也将从这五个行政区入手进行研究。

2.2.1 人口

北京市永定河沿河五区人口占北京人口的 27.2%，土地面积占全市面积 30%。近几年北京市永定河沿岸人口统计情况见表 2-1。

表 2-1 北京市永定河沿岸人口统计（万人）

	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
门头沟区	27.5	28	29	29.4
石景山区	59	60.3	61.6	63.4
丰台区	175.3	182.3	187.6	217
房山区	90.5	91.2	94.5	96.7
大兴区	109.7	115.9	136.5	142.9
合计	462	477.7	509.2	549.4

2.2.2 经济

北京市永定河沿河五区土地面积占全市面积 30%，GDP 只占 12%，沿河五区地方财政收入仅占全市的 5%。详细经济状况统计见表 2-2。

永定河沿河五区第三产业在西南区域的比重只有 10%，现代服务业发展滞后，但增长迅猛。

表 2-2 永定河流域北京段经济状况统计（单位：亿元）

经济指标	年份	门头沟区	石景山区	丰台区	房山区	大兴区	合计
生产总值	2008	67.8	208	510.3	223	214.5	1223.6
	2009	75.9	248.6	600.7	293.5	236	1454.7
	2010	85.9	295.5	705.5	342.2	1013.4	2442.5
	2011	102.7	322.1	839.2	416	1135	2815
财政收入	2008	8.9	26.7	34.8	21	19.6	111
	2009	9.3	18.2	39.8	52.7	23.1	143.1
	2010	10.7	19.1	47.3	168.6	293.6	539.3
	2011	16.9	23	62.4	117.5	353.7	573.5
固定资产投资	2008	26.8	68	198.8	158.3	133.7	585.6
	2009	85.5	136.3	389.3	349.8	354.2	1315.1
	2010	94.8	146.7	504.6	403.8	659.3	1809.2
	2011	142.3	130.9	553	454.5	785.8	2066.5
规模以上工业总产值	2008	66.9	550	362.3	843.9	382.7	2205.8
	2009	64.9	539.7	368.8	779.8	424.9	2178.1
	2010	77	624	426.1	966.6	2661.3	4755
	2011	89.7	379.6	456.7	1051.6	2742.4	4720

2.2.3 历史文化

永定河是海河水系最大的一条支流，在北京市界内流经门头沟、石景山、丰台、房山、大兴等区，流经北京市境的河段长 159.5 km，流域面积为 3168 km²。永定河斜贯门头沟全区，蜿蜒百余公里，流域面积 1368 km²。两岸峡谷纵横，群山耸立，珍珠湖、斋堂水库、三家店水闸等景点点缀其间，形成著名的永定河百里山峡景观。永定河积淀了非常丰富的历史文化底蕴，创造了独具特色的流域文明。多彩的文化和人文资源形成了独具特色的九大文化。这些社会文化条件对永定河流域而言，无论是历史的发展还是现今的发展都会产生深远的影响。

2.3 本章小结

本章主要介绍了永定河流域的自然环境、地理概况、人文景观、经济概况等，为后续的研究搜集必要的研究区概况。

此页不缺内容

第 3 章 河道内生态需水量研究

3.1 概述

20 世纪以来,随着经济社会的不断进步和发展,人类对水资源已经逐渐由开发利用转杯为不同程度的掠夺,生产、生活与生态用水之间的矛盾日益加剧,导致一系列严重的生态环境问题,诸如河道断流、生物多样性降低、生态系统退化、地下水位下降、水环境污染和土地荒漠化等。生态需水研究是合理配置水资源,实现水资源合理开发利用的基础,也是维持和改善生态系统,实现水资源永续利用的保障。从 20 世纪 40 年代起,全球生态环境日益恶劣,各国学者为科学解决水资源失衡以及生态环境问题,对生态需水进行了一系列的研究。在我国,水资源供应普遍不足,随着国民经济高速增长,水不足、水污染、水浪费等问题日益严重。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。研究生态需水,其目的主要也是为了实现人类与自然的和谐,避免人类的生产、生活挤占生态系统的用水,实现流域水资源优化配置,进而为实现流域生态系统可持续发展提供科学依据。

基于自然水循环,河道内生态需水可以定义为:在特定时段内,在一定的生态保护目标下,维持河流基本结构与功能所需要的一定水质目标下的水量,包括降水、天然储存的水(如地下水)以及天然获取的水(如径流)等部分。河流生态系统在长期自然选择过程中形成了相当的自我调节能力,对水的需求有一定的弹性,因此生态需水有一定的阈值区间,不同的保护目标有不同的需水等级。生态需水包含两部分,一部分是非消耗性的,它构成生态系统得以维持健康的环境条件;另一部分则是消耗性的,它参与了生态系统的省力过程及水循环过程。

3.2 生态需水特点

(1) 质与量的统一性

水量的维持是生态系统存在的前提,而水质的保证则是生态系统功能正常发挥的重要基础。因此,生态需水是质与量的统一体,必须同时达到水量目标和水质目标,才能满足生态系统结构与功能的需要。

(2) 时间与空间性

河流具有纵向、横向、垂直、时间等四维特征。在不同河段,由于河道生态特征及人类活动影响差异,河段所发挥的生态功能不同;生态系统随着时间的演

进发生着变化。如长时间的生态系统进化，中长时间的生态系统演替，段时间的年度、季度和昼夜变化等，不同时间段具有不同的需水要求。因此，对于河流生态系统，必须按照自身的特点在时间上满足其对需水量的要求，如河道生态需水的年际变化、年内变化等。

（3）尺度多样性

从空间尺度上看，河流可分为：河流、河区、河段、断面等，对于不同尺度的生态需水之间存在着尺度转换的问题。从时间尺度上看，不同时间段具有不同的需水要求，表现在河道生态需水的丰、平、枯水年特征的年际变化以及汛期、非汛期特征的年内变化。

（4）最优性与阈值性

根据自组织理论，生态系统能够承受一定范围内的水量变化，但是如果水量的减少或增大超过系统的承受范围，系统的自组织能力和自我调节能力将丧失，系统组分秩序发生不可逆变化，达到另外一种结果稳态，形成自组织演化过程。为维持生态系统的健康和正常功能，必须保证足够的生态用水，但并不是越多越好。这意味着生态需水不仅存在最小生态需水，还存在最大生态需水，具有上下两个安全阈值。如果在生态需水阈值范围内，则生态系统能够维持正常功能，当超出限度范围，生态系统的结构和功能将发生变化，并发生逆向演替。因此，必须综合考虑生态需水的上下阈值、最优值，根据实际情况加以控制和调整。

3.3 生态需水的分类

河流生态系统多层次、多等级特性决定了河道内生态需水类型的多样性、复杂性。河道生态需水关键在于维持河流的最基本功能，如为水生生物提供栖息地、在允许范围内的自净功能、保持河道形态等，因此可相对应将河道内生态需水划分为：基本生态流量、自净需水、输沙需水等。

（1）基本生态流量

河道基本生态流量是指维持栖息地形态、正常的生态演替和生物多样性水平以及河流所需要的营养结构的河道内流量。对于常年性河流而言，要求年内各时段的河川径流量都能维持在一定的水平上；对于季节性河流，应维持其自然的季节性变化特征，在非汛期保证河道不断流。

（2）自净需水

自净需水是发挥河流对污染物质的自净作用所需要的河道流量。河流在维持一定的流量下，可以使排入水体污染物经过物理的、化学的与生物化学的作用，将其浓度降低或总量减少，受污染水体能够部分或完全地恢复原状。

(3) 输沙需水

水沙平衡主要指河流中下游的冲淤平衡。为了维持冲刷与侵蚀的动态平衡，就必须在河道内保持有一定的水量。输沙需水是指为了维持河道冲淤平衡所需要的河道流量。当进入河流的泥沙与河流输沙能力达到平衡时，河道冲淤就会处于一种动态平衡状态；当两者存在不平衡时，河流就发生冲刷和淤积。

3.4 生态需水的计算方法

对生态需水的计算，其意义不在于对流域每一种生态需水类型的精确计算，甚至不需要计算满足河流生态系统所有功能的生态需水。在生态用水与经济用水存在竞争的情况下，不可能将所有类型的生态需水在水资源配置中同时考虑，而应优先考虑在近期内需要在水资源规划与水资源配置中重点考虑的生态需水。针对流域最突出、最关键的环境问题，以及要维持的生态功能和分阶段的保护目标，可将目前国内外河流生态需水计算方法大体分为四类：水文学方法、水力学方法、栖息地法和综合法。

3.4.1 水文学方法

水文学方法以日流量或月流量等历史流量数据为基础来确定河道生态需水，操作简单，如果水文资料是正确的，就能很快得出结果。对于全流域尺度上的规划或者提供最初的评价比较合适，一般作为战略性管理方法而使用。常用的水文学方法主要包括 Tennant 法、流量历时曲线法、RVA 法等。

3.4.1.1 Tennant 法

Tennant 法又称蒙大拿 (Montana) 法，是 Tennant 于 1976 年首先提出来的。该方法以平均年流量的百分比作为推荐流量^[57,58]，在不同的月份采用不同的百分比，其推荐的基流标准见表 3-1。Tennant 法适用条件有一定的局限性^[58]，其计算结果的精度与对栖息地重要性认知程度有关；比例确定困难，不同区域、不同需水类型、不同保护对象，生态健康程度与流量的比例关系不同，需要根据当地河流情况进行分析调整；根据多年平均流量的一定比例统一划定，没有考虑水量需求的年内变化问题；没有从流域特性及成因规律分析流量的特点，忽略河流流量季节性变化。因此，该方法常作为其他方法的一种检验，适用于优先度不高的河段。

表 3-1 Tennant 法推荐基流标准

流量值及相应栖息地的 定性描述	推荐的基流标准（平均流量百分数）	
	一般用水期（10-3 月）	鱼类产卵育幼期（4-9 月）
最大	200	200
最佳范围	60-100	60-100
很好	40	60
好	30	50
较好	20	40
一般或较差	10	30
差或最小	10	10
严重退化	<10	<10

我国河流水生态系统大多具有明显的季节性特征，因此在运用 Tennant 法时要将河流生态需水按季节性划分为：4~6 月、7~10/11 月、11/12 月~翌年 3 月三个时段(或依据需要分多个时段)，或者用典型年流量来代替多年平均流量来反映河流流量的季节性。

3.4.1.2 流量历时曲线法

流量历时曲线法^[40]依据历史流量资料绘制流量历时曲线，计算数据系列的累积频率，将某个累积频率相对应的流量作为生态流量推荐值。一般情况下，该频率可取为 90%或 95%，也可根据需要作适当调整。 $Q_{90\%}$ 通常作为枯水流量指数，是水生栖息地的最小流量，是警告水资源管理者的危险流量条件的临界值； $Q_{95\%}$ 通常作为低流量指数或者极端低流量条件指标，是保护河流健康的最小流量^[54]。流量历时曲线法一般需要至少 20 年的流量系列数据，该方法在保留了采用水文资料的简单性的同时，却更好地反映了径流年际、年内分布的不均匀性。

实际计算时，先将数据系列排序，完成排序后利用式（3-2）来计算累积频率，绘制流量历时曲线。根据流量历时曲线，求取某个累积频率相应的流量，并将其作为生态流量推荐值。

$$q_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (3-1)$$

$$p_i = p(Q > q_i) = \frac{i}{N+1} \quad (3-2)$$

式中： q_1 、 q_N 为序列中的最大、最小流量值； N 为序列长度。

3.4.1.3 RVA 法

RVA(Range of Variability Approach)法是 Richter 等人在 1997 年提出一种基于 IHA（Indicators of Hydrologic Alteration）法的河流流量管理模式^[59]，使用流量大小、发生时间、频率、持续时间和变化率 5 个方面的水文特征值对水体进行描述。使用 RVA 法推导河流生态流量，需要具有较长的历史流量资料。

IHA 法根据河流的日水文资料，计算具有生态意义的关键水文特征值（表 3-2）及年际的集中量数（例如中位数，平均值）和离散量数（例如范围，标准偏差，变异系数），用以描述人类活动干扰前后的河流水流模式^[59-63]。将 IHA 的 32 个水文特征值分为 5 组，分别反映流量大小、发生时间、频率、持续时间和变化率等水文特征。生境特征值可以用水文特征值的大小来表征，特定生物的生命过程需求是否得到满足可以用特殊水文事件的发生时间来表征，与生物繁殖或死亡事件可以用特殊水文事件的发生频率来表征，某特殊生命循环是否能完成可以通过特定水文事件的持续时间来判定，生物承受变化的能力可以用水文站的变化率来表征。

RVA 法以 IHA 法为基础计算河流生态需水，具有可操作性，并可根据最新研究结果及时更新改进河流流量模式，因此可满足河流管理部门的需要。

表 3-2 IHA 法的水文参数及其特征

水文参数	特征	参数个数
月平均值	数量、时间	12
年最小 1d、3d、7d、30d、90d 平均值	数量、持续时间	10
年最大 1d、3d、7d、30d、90d 平均值		
年最大一天发生日期	时间	2
年最小一天发生日期		
每年高流量脉冲、低流量脉冲次数、 平均持续时间	数量、频率和持续时间	4
涨幅年平均值	频率、变化率	4
降幅年平均值		
上涨次数		
下降次数		

3.4.2 水力学方法

水力学方法将生物区的栖息地要求以及在不同流量水平下栖息地的变化性纳入了考虑之中。该类方法由于对实地数据的需要将耗费大量的时间和财

力，同时也提现不出季节变化因素。其代表方法为湿周法。

湿周法利用湿周作为衡量栖息指标的质量，来估算河道内流量的最小值。该法基于这样的假设^[61]：湿周与水生生物栖息地的有效性有直接联系，保证一定水生生物栖息地的湿周，也就满足了水生生物正常生存的要求。河道湿周法是根据河道的水力特性参数，如湿周、水力半径、平均水深、水面宽、流速等，由实测的河道断面湿周与断面流量之间的对应关系，绘制 P~Q 湿周流量关系曲线。通过建立河道断面 P~Q 关系曲线，依据该曲线确定突变点的位置，该突变点对应的流量值即为河道最小生态环境需水量。P~Q 关系曲线可从单一河道断面的几何尺寸~流量关系实测数据、多个河道断面的几何尺寸~流量关系实测数据或者借助曼宁公式求得^[62]。

P~Q 关系曲线是河流断面几何形态、流量和水深的函数。P~Q 关系曲线的数学表达式为：

$$Q = AV \quad (3-3)$$

式中：A 为过水断面面积 (m^2)，V 为过水断面的平均流速 (m/s)。

假设河流为明渠恒定均匀流，由谢才公式：

$$V = C\sqrt{RS} \quad (3-4)$$

式中：R 为水力半径 (m)，S 为水面坡降，C 为谢才系数。

由曼宁公式：

$$C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}} \quad (3-5)$$

式中：n 为粗糙系数，将 (3-5)、(3-4) 式代入 (3-3) 式得到：

$$Q = \frac{1}{n}AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}} \quad (3-6)$$

根据水力半径为过水断面面积 A 与湿周 P 的比值的定义，湿周~流量关系式即 (3-6) 式可以写成：

$$Q = \frac{1}{n}A^{\frac{5}{3}}P^{-\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}} \quad (3-7)$$

式中：Q 为流量 (m^3/s)，n 为粗糙系数，A 为过水断面面积 (m^2)，R 为水力半径 (m)，S 为水面坡降，P 为湿周 (m)。

不同河流断面形态，具有不同的 P~Q 关系曲线 (见表 3-3)，P~Q 关系曲线拟合时需要根据不同的断面形态来选择相应的拟合关系。

表 3-3 不同河流断面的 P~Q 湿周~流量关系

河流断面	湿周流量关系	说明
矩形	$Q = \frac{\sqrt{S}}{3.17n} [(P-B)B]^{\frac{5}{3}} P^{-\frac{2}{3}}$	Q 为流量, S 为水面比降, n 为糙率, B 为宽度, P 为湿周
梯形	$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \left[\frac{b(P-b)}{2\sqrt{1+m^2}} + \frac{m(P-b)^2}{4(1+m^2)} \right]^{\frac{5}{3}} P^{-\frac{2}{3}}$	b 为河底宽度, m 为边坡系数, 其余 同上
三角形	$Q = \frac{\sqrt{S}}{32n} (\sin \theta)^{\frac{5}{3}} P^{\frac{8}{3}}$	θ 为断面夹角, 其余同上
抛物线形	$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \left(\frac{2}{3} B \sqrt{\frac{3B(P-B)}{8}} \right)^{\frac{5}{3}} P^{-\frac{2}{3}}$	B 为河宽, 其余同上

为消除确定变化点时坐标轴比例的影响, 本文将流量和湿周无量纲化, 分别取相对值 Q' 、 P' , 即:

$$\begin{cases} Q' = Q / Q_{\max} \\ P' = P / P_{\max} \end{cases} \quad Q', P' \in [0, 1] \quad (3-8)$$

P~Q 关系曲线拟合完毕后, 确定曲线上突变点则成为最小生态流量计算的关键。一般认为, 在 P~Q 关系曲线上, 流量的增加只会引起湿周细微的变化的点就是突变点, 且第一个突变点所对应的流量就是最小生态流量。目前突变点确定方法主要有: 斜率为 1 法和最大曲率法。

斜率为 1 法: 取 P~Q 关系曲线上斜率为 1 的点为临界点, 根据数学表达式 (3-9), 可求得最小生态流量;

$$\frac{dP'}{dQ'} = 1 \quad (3-9)$$

最大曲率法: 由高等数学知识可知, 曲线上曲率最大的点, 其曲率对流量的导数为零。由此可得 P~Q 关系曲线上的最大曲率公式 (3-10), 进而可计算最小生态流量。

$$k = \frac{\frac{d^2 P'}{dQ'^2}}{\left[1 + \left(\frac{dP'}{dQ'} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-10)$$

3.4.3 栖息地方法

通常来说,河流的时空可变性和生物多样性是密切联系的。栖息地法不仅考虑物理栖息地(自然栖息地)伴随河流流量的变化机制,还将这些信息与给定物种的栖息地偏好结合起来,确定在一定的河流流量范围内可用的栖息地的数量。该方法的结果通常是以一个曲线的形式表示可用的栖息地面积与河流流量之间的关系,从这个曲线上可以确定大量特定物质的最优河流流量,作为推荐的环境流量。最著名的栖息地法就是河道内流量增加法(IFIM)。

3.4.4 综合法

综合法,亦称整体法,在近年来计算生态需水量时得到了越来越广泛的应用。综合法的本质上是利用与流量相关的数据和信息的力量框架。该方法不受分析工具的限制,可以利用多种不同的方法。综合法相对来说比较注重对于整个生态系统的考虑,利用所有可利用的信息,其中一些信息可能是假定的。比较常用的综合法有:南非建筑块法(BBM)、澳大利亚整体法(HEA)等。

3.5 永定河官厅水库河道内生态需水量计算

本文选取官厅(坝下)、雁翅 2 个水文站数据,包括官厅(坝下)站和雁翅站 1970-1991 共 22 年的逐日平均流量数据为实例,分别采用流量历时曲线法、RVA 法和湿周法,计算河道内生态需水量。

3.5.1 流量历时曲线法

应用流量历时曲线法,分别计算官厅(坝下)站、雁翅站的多年平均最小生态需水量、典型年最小生态需水量、汛期非汛期最小生态需水量和各月最小生态需水量,得到各月的最小生态需水量,作为最小生态需水量的年内分配。

3.5.1.1 多年平均最小生态需水量

统计各水文站点所有逐日流量数据,绘制得到各站点总流量历时曲线,如图 3-1 所示。根据该流量历时曲线,取保证率为 95%所对应的流量 Q_{95} 作为多年平均最小生态需水量的参考流量,计算结果见表 3-4。

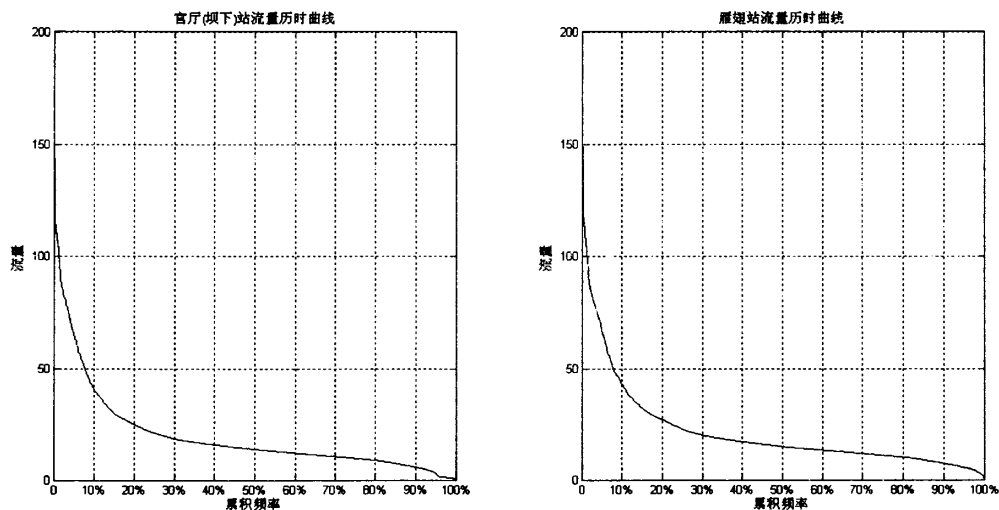


图 3-1 官厅(坝下)站和雁翅站总流量历时曲线

表 3-4 多年平均最小生态需水量计算结果

水文站点	$\bar{Q}$ (m³/s)	Q_{95} (m³/s)	$Q_{\min}$ (亿 m³)
官厅(坝下)站	19.99	2.81	0.87
雁翅站	21.49	5.49	1.73

3.5.1.2 典型年最小生态需水量

统计各水文站点所有逐日流量数据，确定各水文站点 5%丰水年、50%平水年、95%枯水年 3 个典型年份，绘制 3 个典型年的流量历时曲线。根据该流量历时曲线，取保证率为 95%所对应的流量 Q_{95} 作为该典型年最小生态需水量的参考流量，计算结果见表 3-5。

表 3-5 典型年最小生态需水量计算结果

水文站点	典型年份	$\bar{Q}$ (m³/s)	Q_{95} (m³/s)	$Q_{\min}$ (亿 m³)
官厅(坝下)站	5%丰水年	42.16	11.7	3.69
	50%平水年	17.78	3.60	1.14
	95%枯水年	8.89	3.05	0.96
雁翅站	5%丰水年	40.85	10.65	3.36
	50%平水年	18.26	10.30	3.23
	95%枯水年	9.81	1.82	0.57

3.5.1.3 汛期非汛期最小生态需水量

永定河为季节性河流，按各月平均流量（如图 3-2 所示）将其分为：非汛

期（10 月~次年 3 月）、汛期（4~9 月），统计水文站点所有逐日流量数据并按汛期非汛期分类，分别绘制流量历时曲线，并根据流量历时曲线，取保证率为 95%所对应的流量 Q_{95} 作为汛期非汛期最小生态需水量的参考流量，计算结果见表 3-6。

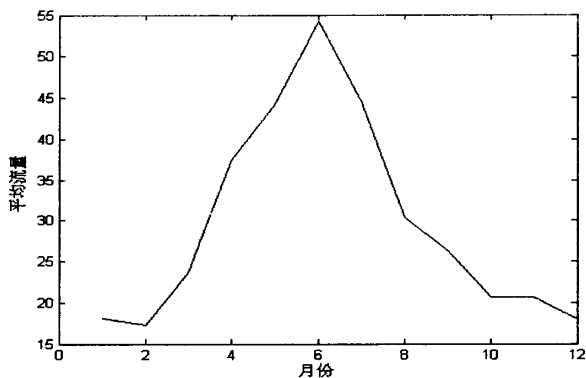


图 3-2 官厅(坝下)站各月多年平均流量

表 3-6 汛期非汛期最小生态需水量计算结果

水文站点	时期	$\bar{Q}$ (m ³ /s)	Q_{95} (m ³ /s)	$Q_{\min}$ (亿 m ³)	$Q_{\text{全年}}$ (亿 m ³)
官厅(坝下)站	汛期	26.68	1.29	0.20	0.92
	非汛期	13.35	4.59	0.72	
雁翅站	汛期	28.37	5.58	0.88	1.73
	非汛期	14.58	5.39	0.85	

3.5.1.4 月最小生态需水量

统计各水文站点所有逐日流量数据并按自然月分类，绘制各站点各月流量历时曲线，如图 3-3 所示。根据月流量历时曲线，取保证率为 95%所对应的流量 Q_{95} 作为该月最小生态需水量的参考流量，计算结果见表 3-7、3-8。

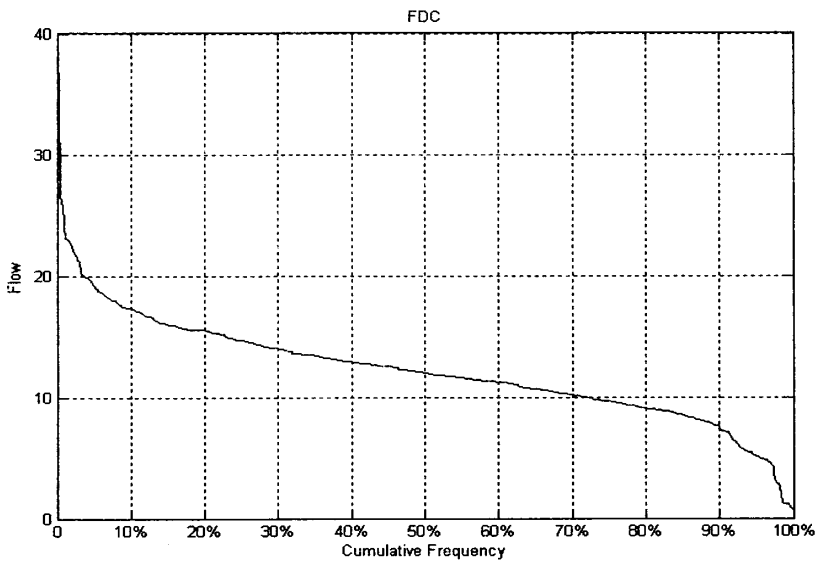


图 3-3 官厅（坝下）站 1 月份流量历时曲线

表 3-7 月最小生态需水量计算成果表（官厅(坝下)站）

	$\bar{Q}$ (m³/s)	Q_{95} (m³/s)	Q_{min} (亿 m³)
1 月	12.27	5.14	0.14
2 月	12.17	5.28	0.13
3 月	14.24	4.76	0.13
4 月	24.87	4.86	0.13
5 月	31.14	2.59	0.07
6 月	38.65	5.40	0.14
7 月	28.79	1.11	0.03
8 月	20.09	0.86	0.02
9 月	16.51	1.14	0.03
10 月	14.46	3.57	0.10
11 月	13.43	3.96	0.10
12 月	13.39	5.15	0.14
全年	20.00	-	1.16

表 3-8 月最小生态需水量计算成果表（雁翅站）

	$\bar{Q}$ (m ³ /s)	Q_{95} (m ³ /s)	$Q_{\min}$ (亿 m ³)
1 月	13.37	6.95	0.19
2 月	13.33	6.96	0.17
3 月	15.06	6.20	0.17
4 月	25.32	6.38	0.17
5 月	32.38	6.72	0.18
6 月	39.37	7.04	0.18
7 月	31.22	5.05	0.14
8 月	22.76	4.58	0.12
9 月	19.12	4.88	0.13
10 月	16.43	4.74	0.13
11 月	14.93	4.86	0.13
12 月	14.25	5.95	0.16
全年	23.89	-	1.87

由流量历时曲线法计算得到：官厅（坝下）站断面最小生态需水量为 1.16 亿 m³，雁翅站断面最小生态需水量为 1.87 亿 m³。

3.5.2 RVA 法

本文以永定河官厅水库（坝下）站为实例，选取官厅水库（坝下）站 1970-1991 年共 22 年的流量数据进行分析计算，见图 3-4 所示。

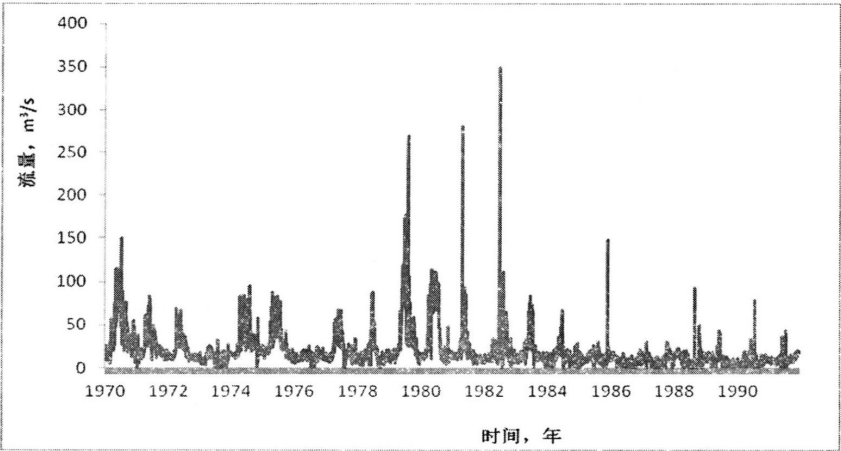


图 3-4 永定河官厅水库(坝下)站 1970-1991 年逐日流量

3.5.2.1 IHA 指标计算

统计永定河官厅水库(坝下)站 1970-1991 年流量数据各项指标的变化趋势。RVA 指标阈值,即可接受的环境流量范围,通常指该指标平均值±1 标准差或是其频率为 75%~25%所对应的流量。计算得到的 5 组、33 个指标如表 3-9 所示。

表 3-9 官厅(坝下)站 IHA 指标计算结果

生态流量谱系		均值	RVA 阈值	
			下限	上限
月均流量 m ³ /s	1 月	12.27	9.71	14.80
	2 月	12.17	9.53	14.90
	3 月	14.24	10.10	17.30
	4 月	24.87	10.00	30.15
	5 月	31.14	11.90	41.95
	6 月	38.65	14.40	54.10
	7 月	28.79	8.46	36.80
	8 月	20.09	6.46	25.10
	9 月	16.51	7.71	22.25
	10 月	14.46	9.11	18.10
	11 月	13.43	8.82	16.95
	12 月	13.39	10.50	15.85
年均极值 m ³ /s	年均 1d 最小流量	2.09	0.68	4.35
	年均 3d 最小流量	10.23	2.33	20.57
	年均 7d 最小流量	37.20	9.38	67.13
	年均 30d 最小流量	244.66	134.67	356.29
	年均 90d 最小流量	946.76	596.63	1276.50
	年均 1d 最大流量	105.53	43.15	130.50
	年均 3d 最大流量	219.85	90.69	296.20
	年均 7d 最大流量	435.30	176.15	583.90
	年均 30d 最大流量	1395.49	560.41	1850.90
	年均 90d 最大流量	3285.01	1368.80	4527.30
年极端水文条件的出现时间	零流量日数	0	0	0
	基流指数	1.71	0.78	2.75
	1 天最大平均流量的儒略日, 天	198	161.5	219
	1 天最小平均流量的儒略日, 天	-	-	-
	每一水文年中的低脉冲次数, 次	25.68	9.50	37.50
	低脉冲的平均持续时间, 天	3.12	1.39	5.05
	每一水文年中的高脉冲次数, 次	11.73	6	18
	高脉冲的平均持续时间, 天	7.09	1.44	11.08
	水文条件变化的速率及频率	日间流量平均增加率	0.61	0.26
		日间流量平均减少率	-0.21	-0.25

注:1、表中的儒略日表示的是在公历的一年中的第多少天,如 1 月 1 日的儒略日为 1,最大值为 366。

3.5.2.2 生态流量计算

维持河流健康生态系统，则正常水文特征值（均值）的变动范围应不超过天然可变范围（即 RVA 阈值差）。因此，基于 RVA 法的生态流量估算方法：

$$S_{ecology} = \bar{S} - (S_{上限} - S_{下限}) \quad (3-10)$$

式中： $S_{ecology}$ 为流量生态值； $\bar{S}$ 为均值； $S_{上限}$ 为 RVA 的上限阈值； $S_{下限}$ 为 RVA 的下限阈值。

根据公式(3-10)可算出官厅（坝下）站各月的生态流量均值如表 3-10 所示。

表 3-10 官厅水库(坝下)站各月生态流量值

	均值 (m^3/s)	RVA 阈值 (m^3/s)		生态流量值 (m^3/s)
		下限	上限	
1 月	12.27	9.71	14.80	7.18
2 月	12.17	9.53	14.90	6.80
3 月	14.24	10.10	17.30	7.04
4 月	24.87	10.00	30.15	4.72
5 月	31.14	11.90	41.95	1.09
6 月	38.18	14.40	54.10	-1.52
7 月	28.79	8.46	36.80	0.45
8 月	20.09	6.46	25.10	1.45
9 月	16.51	7.71	22.25	1.97
10 月	14.46	9.11	18.10	5.47
11 月	13.43	8.82	16.95	5.3
12 月	13.39	10.50	15.85	8.04
全年	19.96	-	-	4.00

由 RVA 方法计算得到，官厅（坝下）站断面最小生态流量为 $4.00m^3/s$ ，最小生态需水量为 1.26 亿 m^3 。

同法可计算得雁翅站各月的生态流量均值如表 3-11 所示。

表 3-11 雁翅站各月生态流量值

	均值 (m^3/s)	RVA 阈值 (m^3/s)		生态流量值 (m^3/s)
		下限	上限	
1 月	13.37	11.10	15.50	8.97
2 月	13.33	10.90	15.60	8.63
3 月	15.06	11.30	17.10	9.26
4 月	25.32	10.35	30.30	5.37
5 月	32.38	12.45	42.70	2.13
6 月	39.37	15.10	55.90	-1.43
7 月	31.22	10.55	38.65	3.12
8 月	22.76	9.72	27.45	5.03
9 月	19.12	9.68	25.55	3.25
10 月	16.43	10.10	21.30	5.23
11 月	14.93	9.79	19.80	4.92
12 月	14.25	11.50	16.20	9.55
全年	21.46	-	-	5.34

由 RVA 方法计算得到，雁翅站断面最小生态流量为 $5.34\text{m}^3/\text{s}$ ，最小生态需水量为 1.68 亿 m^3 。

3.5.3 湿周法

3.5.3.1 控制性河道断面选取

首先，选取永定河官厅水库（坝下）水文站 1970 年实测大断面和实测水位流量资料作为分析的基础，计算永定河官厅水库以下河道最小生态环境需水量。官厅水库（坝下）水文站 1970~1991 年典型断面如图 3-5 所示。

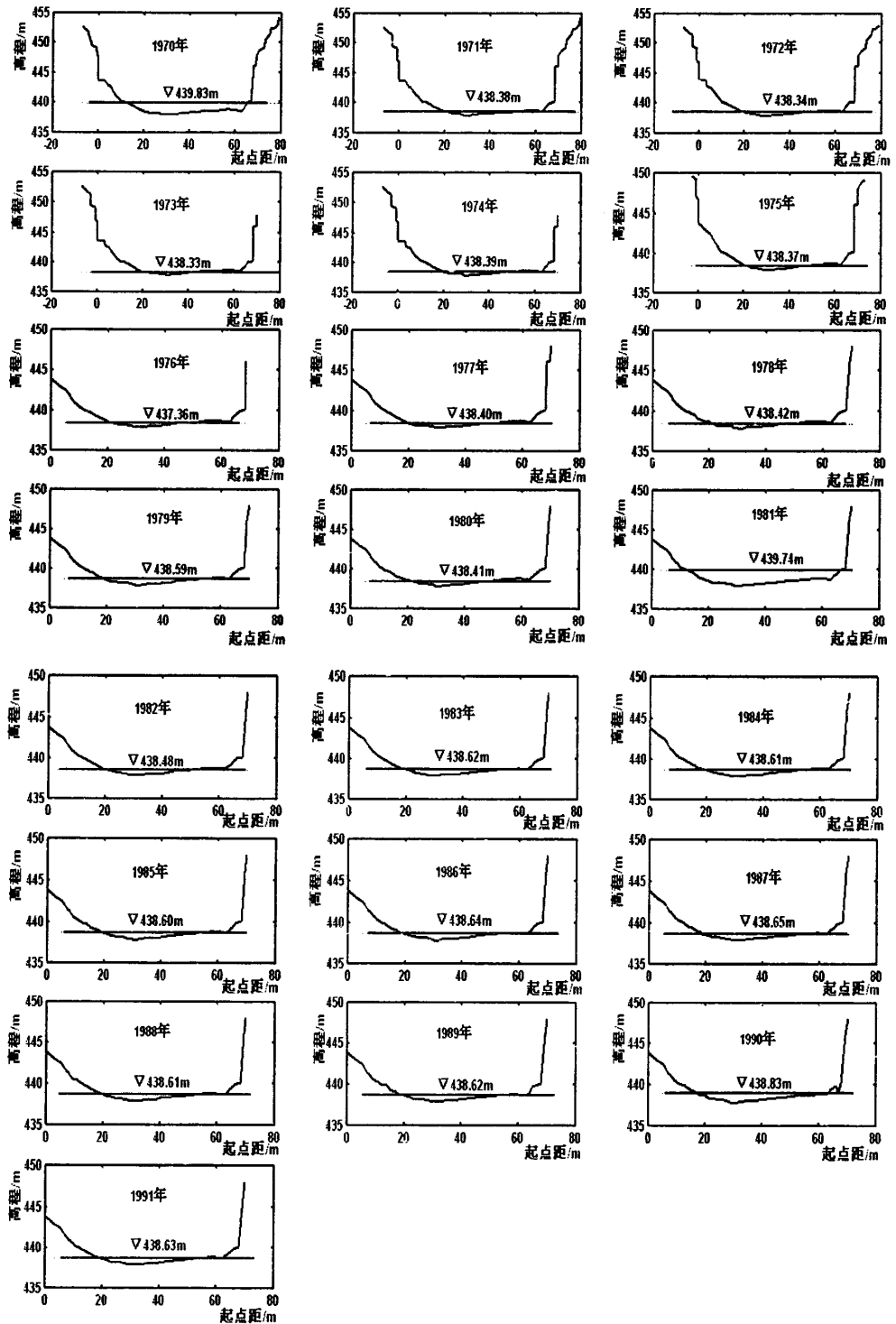


图 3-5 官厅水库(坝下)站 1970-1991 年典型断面图

3.5.3.2 建立河流断面湿周流量关系

官厅水库（坝下）水文站实测大断面近似为梯形断面，依此建立河道计算湿周与估算湿周、流量与流速、流量与水面宽度、流量与平均水深之间的关系。

（1）河道计算湿周 $P_{\text{计}}$ 和估算湿周 $P_{\text{估}}$ 之间的关系

从图 3-5 可以清晰的看到官厅水库（坝下）水文站 1970~1991 年典型断面以及当年测时水位，根据官厅水库（坝下）水文站实测大断面现有数据，用 Matlab 编程，计算河道湿周（ $P_{\text{计}}$ ）；再根据实测流量成果表里的数据估算河道湿周（ $P_{\text{估}}$ ）：

$$P_{\text{估}} = H_{\text{水面宽度}} + 2H_{\text{平均水深}} \quad (3-11)$$

然后对 $P_{\text{计}}$ 和 $P_{\text{估}}$ 进行关系拟合，官厅水库（坝下）水文站断面 $P_{\text{计}}$ 和 $P_{\text{估}}$ 之间的关系为 $P_{\text{计}} = 0.3138\ln(P_{\text{估}}) + 0.9236$ ，相关系数的平方为 0.8953。 $P_{\text{计}}$ 和 $P_{\text{估}}$ 关系曲线图见图 3-6 所示，作 $P_{\text{计}}$ 和 $P_{\text{估}}$ 关系曲线图时， $P_{\text{计}}$ 和 $P_{\text{估}}$ 分别取相对值。从图 3-6 可以看出官厅水库（坝下）水文站断面处的 $P_{\text{计}}$ 和 $P_{\text{估}}$ 的相关系数还是很高的。

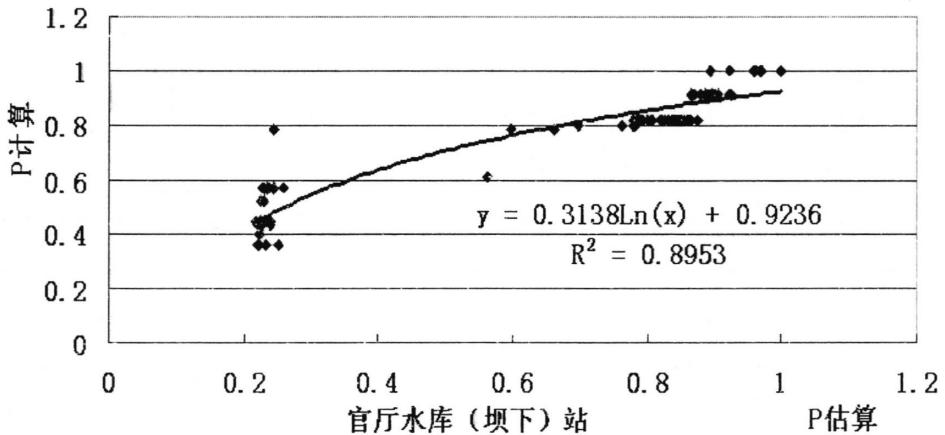


图 3-6 官厅水库(坝下)站 $P_{\text{计}}$ 和 $P_{\text{估}}$ 关系曲线

（2）流量 Q 与流速 V 之间的关系

本研究选取官厅水库（坝下）水文站 1970 年的水文数据资料作为分析的基础，根据实测流量成果表中流量和流速的数据建立对应的相互关系。一年之内河流分丰水期和枯水期，根据实测数据可以归纳出 1970 年官厅水库（坝下）水文站从 4 月份到 9 月份为丰水期，从 10 月份到 3 月份为枯水期。我们要对丰水期和枯水期分别建立流量与流速之间的关系进行拟合。官厅水库（坝下）水文站 1970 年丰水期内流量与流速之间的关系为 $Q = 55.409\ln(v) + 76.293$ ，相关系数的平方为 0.5981；枯水期内流量与流速之间的关系为 $Q = 40.478\ln(v) + 56.255$ ，相关系数的平方为 0.6735。官厅水库（坝下）水文站 1970 年丰水期、

枯水期流量与流速关系曲线见图 3-7 和图 3-8 所示。从这两个图中我们可以看出枯水期的相关度比丰水期的高。

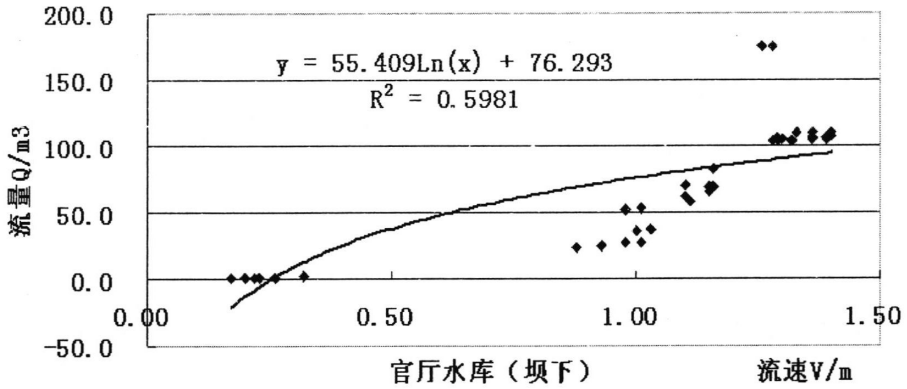


图 3-7 官厅水库(坝下)站 1970 年丰水期流量与流速关系曲线

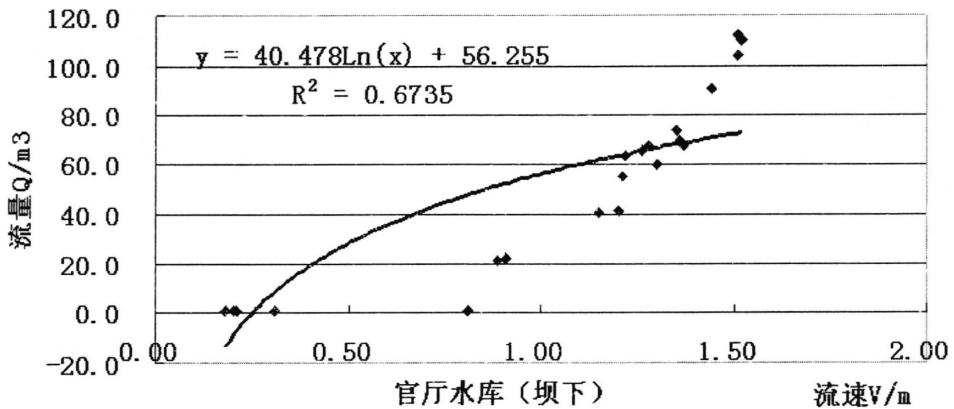


图 3-8 官厅水库(坝下)站 1970 年枯水期流量与流速关系曲线

(3) 流量 Q 与水面宽度 B 之间的关系

该关系的建立与流量与流速之间关系的建立道理相同，也分为丰水期和枯水期。官厅水库（坝下）水文站 1970 年丰水期内流量与水面宽度之间的关系为 $Q = 58.272\ln(B) - 54.211$ ，相关系数的平方为 0.916；枯水期内流量与水面宽度之间的关系为 $Q = 18.44\ln(B) - 22.501$ ，相关系数的平方为 0.7657。官厅水库（坝下）水文站 1970 年丰水期、枯水期流量与水面宽度关系曲线见图 3-9 和图 3-10 所示。从这两个图中可以看出丰水期和枯水期的关系拟合都比较高，并且丰水期的相关度比枯水期的高。

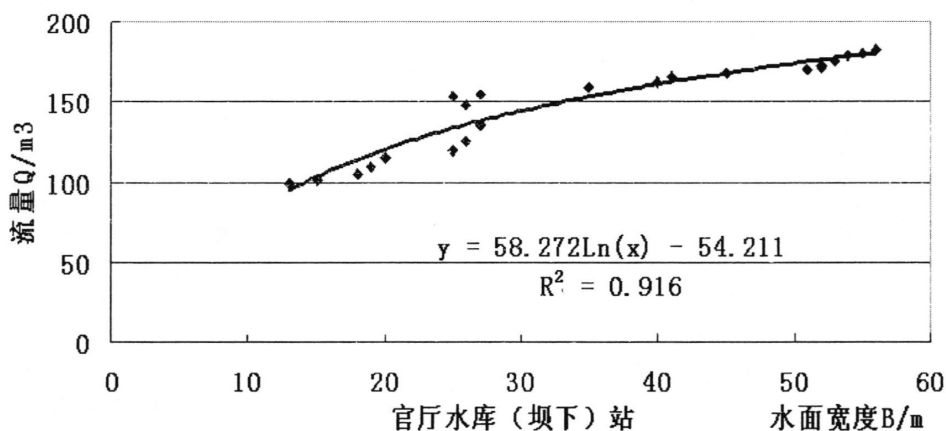


图 3-9 官厅水库(坝下)站 1970 年丰水期流量与水面宽度关系曲线

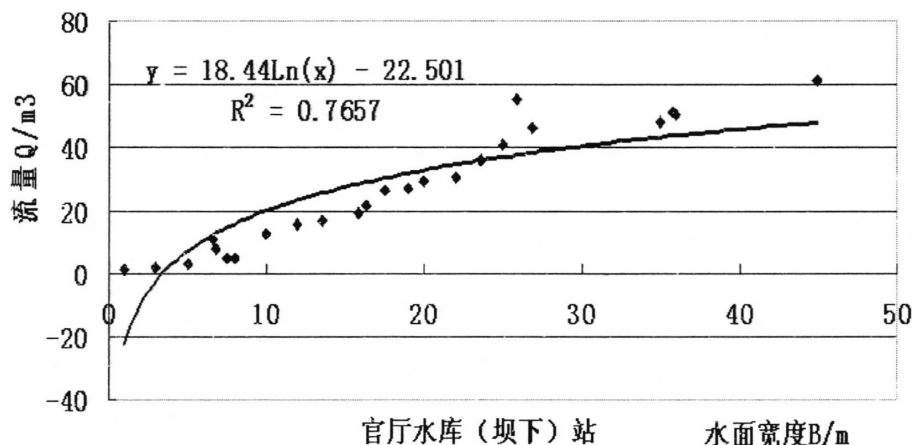


图 3-10 官厅水库(坝下)站 1970 年枯水期流量与水面宽度关系曲线

(4) 流量 Q 与平均水深 h 之间的关系

该关系的建立与流量与流速之间关系的建立道理相同，也分为丰水期和枯水期。官厅水库（坝下）水文站 1970 年丰水期内流量与平均水深之间的关系为 $Q = 60.705\text{Ln}(h) + 107.07$ ，相关系数的平方为 0.3008；枯水期内流量与平均水深之间的关系为 $Q = 69.105\text{Ln}(h) + 70.428$ ，相关系数的平方为 0.9362。官厅水库（坝下）水文站 1970 年丰水期、枯水期流量与平均水深关系曲线见图 3-11 和图 3-12 所示。从这两个图中可以看出枯水期的关系拟合比较高，而丰水期的关系拟合则比较低。

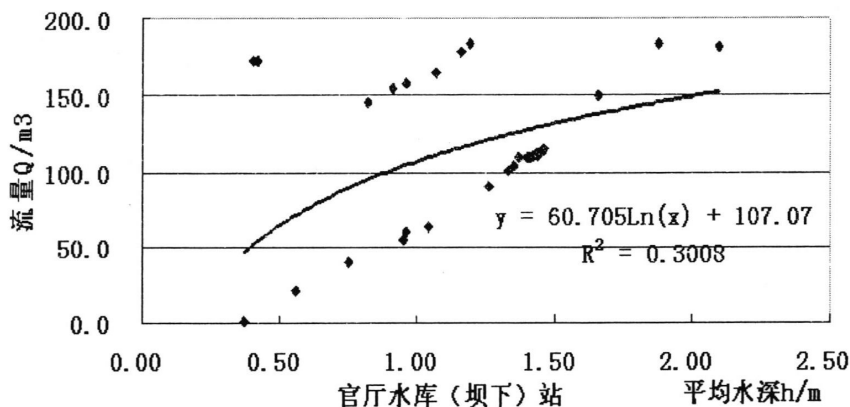


图 3-11 官厅水库(坝下)站 1970 年丰水期流量与平均水深关系曲线

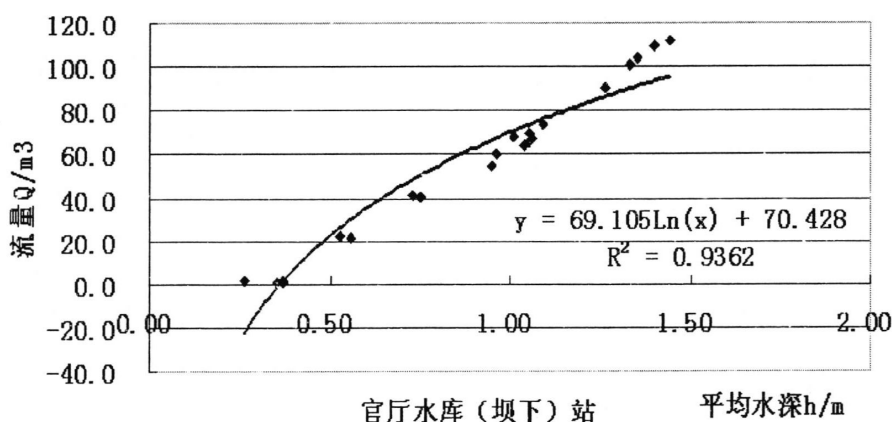


图 3-12 官厅水库(坝下)站 1970 年枯水期流量与平均水深关系曲线

(5) 流量 Q 与湿周 P 之间的关系

官厅水库(坝下)水文站断面近似为梯形断面。由表 3-3 可知, 梯形断面的湿周与流量呈现出对数关系, 湿周流量关系可以按照对数关系进行拟合。由之前得到的有关流量与流速、流量与水面宽度、流量与平均水深及计算湿周与估算湿周之间的对应关系, 可以求出官厅水库(坝下)水文站 1970~1991 年的流量与湿周之间的关系。官厅水库(坝下)水文站断面的流量湿周关系为 $P_{\text{相对}} = 0.0897 \text{Ln}(Q_{\text{相对}}) + 0.9048$, 相关系数的平方为 0.6281。官厅水库(坝下)水文站断面湿周流量关系曲线图见图 3-13 所示, 作湿周流量关系曲线图时, 湿周、流量分别取相对值。从图 3-13 可以看出, 官厅水库(坝下)水文站湿

周流量关系曲线存在突变点。

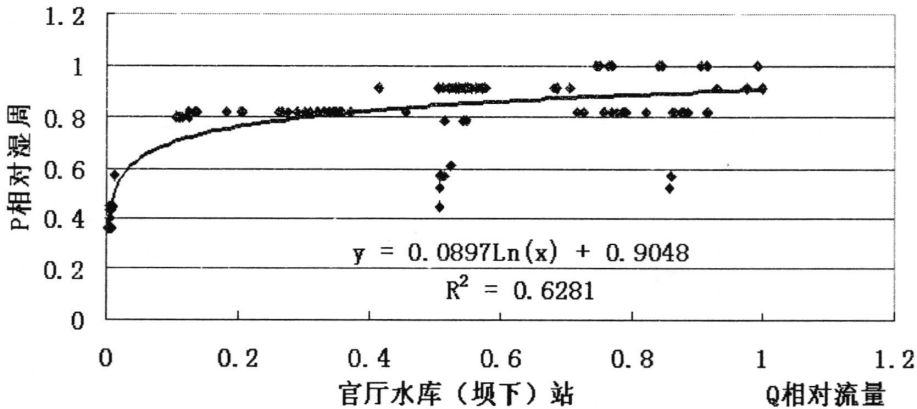


图 3-13 官厅水库(坝下)站湿周流量关系拟合曲线

3.5.3.3 突变点的确定

根据官厅水库（坝下）水文站断面湿周流量关系，分别采用斜率为 1 法和曲率法来计算河道最小生态流量。

（1）斜率为 1 法。官厅水库（坝下）水文站断面属于梯形断面，梯形断面的湿周与流量呈现出对数关系，其斜率为 $\frac{dP_{\text{相对}}}{dQ_{\text{相对}}} = \frac{a}{Q_{\text{相对}}}$ ，令 $\frac{dP_{\text{相对}}}{dQ_{\text{相对}}} = 1$ ，则 $Q_{\text{相对}} = a = 0.039$ ，所以官厅水库（坝下）水文站断面河道最小生态流量为 $10.95 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最小生态需水量为 3.45 亿 m^3 ，占多年平均流量 54.78%。

（2）最大曲率法。官厅水库（坝下）水文站断面计算河道最小生态流量为 $2.74 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最小生态需水量为 0.86 亿 m^3 ，占多年平均流量 13.69%。

3.5.3.4 最小生态需水量确定

根据曲线上斜率为 1 法和曲率最大法分别求取 $Q \sim P$ 关系曲线的突变点所对应的最小生态需水量存在较大差异。为了最终确定最小生态需水量，本研究参照 Tennant 法计算结果进行比较分析。枯水期取多年平均月流量的 10%作为河道内的最小生态需水量，丰水期取多年平均月流量的 30%作为河道内的最小生态需水量，在此假定将多年平均流量的 20%作为河道内的最小生态需水量。由此可以看出：曲率最大法计算结果比较合理，斜率为 1 法计算结果偏大。

官厅水库（坝下）站断面河道最小生态流量为 $2.74 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最小生态需水量为 0.86 亿 m^3 。

同理，根据永定河雁翅站河段的实际情况，遵循典型性、稳定性、实用性的原则，选取雁翅站作为控制性水文断面。通过对永定河雁翅水文站 1970-1991

年实测大断面资料的分析,水文站断面的地形除局部发生轻微的变动外,基本保持稳定。本文选取 1970 年实测大断面和实测水位流量资料作为分析的基础,计算永定河官厅水库以下河道最小生态环境需水量。雁翅水文站 1970-1991 年典型断面如图 3-14 所示。

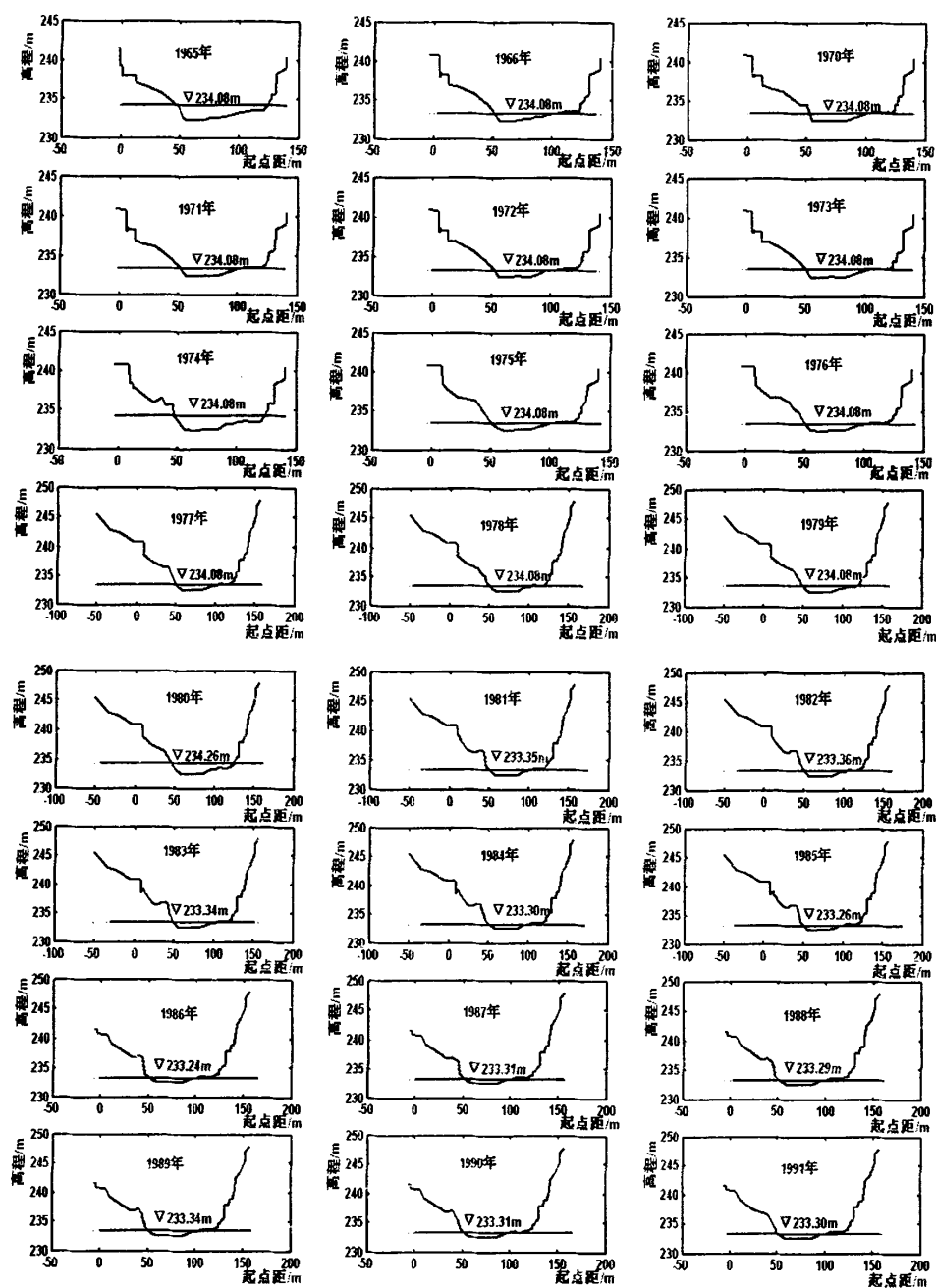


图 3-14 雁翅水文站 1970-1991 年典型断面图

根据对雁翅水文站实测大断面图的分析,可知雁翅水文站断面可近似为梯形断面。在计算河道最小生态需水量之前,先建立河道计算湿周与估算湿周、流量与流速、流量与水面宽度、流量与平均水深之间的关系。雁翅站各水文数据之间的关系具体见表 3-12 所示。

表 3-12 雁翅站各水文数据之间的关系

名称	相互关系		相关系数的平方
计算湿周与估算湿周 ($P_{计}$ 与 $P_{估}$)	$P_{计} = 1.784\ln(P_{估}) + 0.8505$		0.6522
流量与流速 (Q 与 V)	丰水期	$Q = 138.61\ln(v) + 100.74$	0.8801
	枯水期	$Q = 35.532\ln(v) + 75.961$	0.8583
流量与水面宽度 (Q 与 B)	丰水期	$Q = 560.52\ln(B) - 2341.6$	0.2449
	枯水期	$Q = 134.0\ln(B) - 517.04$	0.7361
流量与平均水深 (Q 与 h)	丰水期	$Q = 4.1918\ln(h) + 106.04$	0.4341
	枯水期	$Q = 50.247\ln(h) + 52.95$	0.9077

从表 3-12 中可以得到雁翅水文站断面计算湿周与估算湿周、流量与流速、流量与水面宽度、流量与平均水深之间的关系,及其相关系数的平方。由于一年内流量数据差距很大,所以在建立流量与平均流速、流量与水面宽度、流量与平均水深之间的关系时,将一年分为丰水期和枯水期,根据实测数据我们可以归纳出 1970 年雁翅水文站从 5 月份到 7 月份为丰水期,从 8 月份到 4 月份为枯水期。各水文数据之间的关系具体为: $P_{计}$ 和 $P_{估}$ 之间的关系为 $P_{计} = 1.784\ln(P_{估}) + 0.8505$,相关系数的平方为 0.6522,计算时 $P_{计}$ 和 $P_{估}$ 分别取相对值;从相关系数的平方可以看出雁翅水文站断面处的 $P_{计}$ 和 $P_{估}$ 的相关系数没有官厅水库(坝下)水文站的高。丰水期内流量与流速之间的关系为 $Q = 138.61\ln(v) + 100.74$,相关系数的平方为 0.8801;枯水期内流量与流速之间的关系为 $Q = 35.532\ln(v) + 75.961$,相关系数的平方为 0.8583;可以看出雁翅站丰水期和枯水期流量与流速的相关系数比较接近。雁翅站丰水期内流量与水面宽度之间的关系为 $Q = 560.52\ln(B) - 2341.6$,相关系数的平方为 0.2449;

枯水期内流量与水面宽度之间的关系为 $Q = 134.0\ln(B) - 517.04$ ，相关系数的平方为 0.7361；从相关系数我们可以看出丰水期的关系拟合比较低，而枯水期的关系拟合则比较高。丰水期内流量与平均水深之间的关系为 $Q = 4.1918\ln(h) + 106.04$ ，相关系数的平方为 0.4341；枯水期内流量与平均水深之间的关系为 $Q = 50.247\ln(h) + 52.95$ ，相关系数的平方为 0.9077；和流量与水面宽度的拟合关系一样，流量与平均水深之间也是丰水期的关系拟合比较低，而枯水期的关系拟合则比较高。具体的各水文数据之间关系拟合曲线见图 3-15 所示。

根据对雁翅水文站实测大断面图分析，可得知雁翅水文站断面近似为梯形断面。该站湿周流量关系可以按照对数关系进行拟合。由之前得到的有关流量与流速、流量与水面宽度、流量与平均水深及计算湿周与估算湿周之间的对应关系，可以求出雁翅水文站 1970 年的流量与湿周之间的关系。雁翅水文站断面的流量湿周关系为 $P_{\text{相对}} = 0.1619 \ln(Q_{\text{相对}}) + 0.7668$ ，相关系数的平方为 0.3417。雁翅水文站断面湿周流量关系曲线图见图 3-15 所示，作湿周流量关系曲线图时，湿周、流量分别取相对值。从图 3-15 可以看出，雁翅水文站湿周流量关系曲线存在突变点。

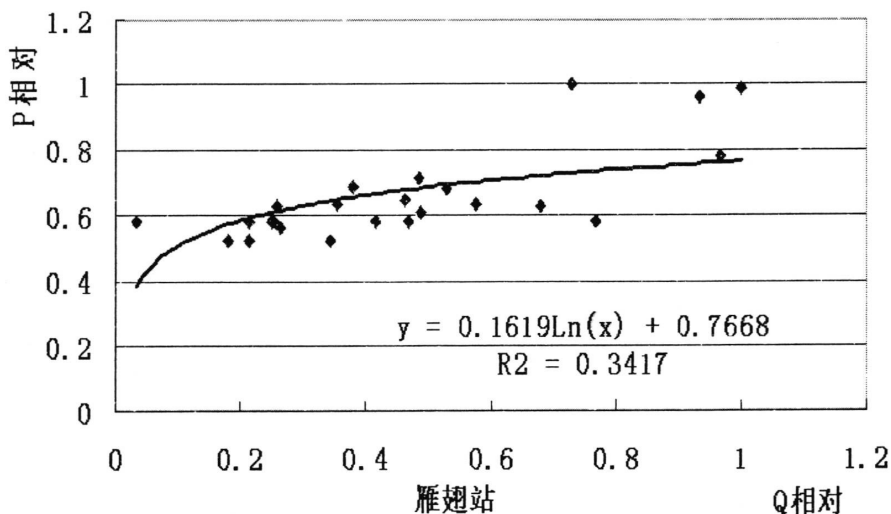


图 3-15 雁翅站湿周流量关系拟合曲线

根据雁翅水文站断面湿周流量关系，分别采用斜率为 1 法和曲率法来计算河道最小生态流量。采用斜率为 1 法计算出河道最小生态流量为 $7.14\text{m}^3/\text{s}$ ，最小生态需水量为 2.25 亿 m^3 ，占多年平均流量 33.22%；采用最大曲率法计算出

河道最小生态流量为 $5.05\text{m}^3/\text{s}$ ，最小生态需水量为 1.59 亿 m^3 ，占多年平均流量 23.5%。根据 Tennant 法假定的将多年平均流量的 20% 作为河道内的最小生态需水量，可以得到采用曲率最大法计算所得河流最小生态需水量比较合理，采用斜率为 1 法计算结果偏大。

因此，雁翅水文站断面的河道最小生态流量为 $5.05\text{m}^3/\text{s}$ ，最小生态需水量为 1.59 亿 m^3 。

3.6 本章小结

本章主要介绍了河道内生态需水量的相关内容，包括生态需水的特点、分类及计算方法，同时运用流量历时曲线法、RVA 法以及湿周法，计算了永定河官厅水库河道内生态需水量，结果见表 3-13。

表 3-13 不同方法计算生态需水量对比（单位：亿 m^3 ）

	流量历时曲线法	RVA 法	湿周法	Tennant 法
官厅(坝下)站	1.16	1.26	0.86	1.26
雁翅站	1.87	1.68	1.59	1.36

通过比较可知：官厅（坝下）站的使用流量历时曲线法和 RVA 法得到的结果与 Tennant 法相近，而湿周法得到的结果相差较大。究其原因，是因为 Tennant 法、历时曲线法及 RVA 法计算所用的流量数据基本一样，都采用水文站的基本流量数据，处理过程也相类似，因此得到的结果也较相近；而湿周法的数据处理过程明显与其他三种方法相异，它结合了河道典型断面数据，因此计算得到的结果差距较大。

由此可见，由流量历时曲线法及 RVA 法得到的最小生态需水量年内分配方案是可行，其适用于永定河流域的实际情况，可以用于接下来的流域水资源优化配置当中。

此页不缺内容

第 4 章 水资源优化配置研究

4.1 概述

水资源优化配置是实现水资源合理开发利用的基础,是水资源可持续利用的根本保证。在中国,实施水资源合理配置具有更大的紧迫性,其主要原因:一是水资源的天然时空分布与生产力布局不相适应,二是在地区间和各用水部门间存在着很大的用水竞争性,三是近年来的水资源开发利用方式已经导致产生许多生态环境问题。

4.2 永定河水源结构

永定河水源包括:地表水、地下水和外调水源。当地水源的地表水主要为天然降水,特别是官厅山峡上游段的降水来源。永定河流域北京段的来水量主要由三部分组成:官厅水库来水量、官厅山峡区间产水量、平原地区集水量。由于永定河流域在官厅山峡区间面积 1357km^2 ,在北京市平原为 677km^2 ,所占永定河总流域面积合计仅 4%,且卢沟桥以下平原河道常年河干,而官厅水库流域面积 43402km^2 ,控制了流域 92% 以上面积,因此,本文来水量分析主要以官厅水库以上流域来水量为主。外调水源主要为南水北调工程的应急调水。

4.3 永定河供水及用水分析

永定河是北京的母亲河,它曾经为北京的发展建设提供了大量水资源。永定河水系属大陆性季风气候,干燥寒冷多风,流域内降水时空分布极不均匀。永定河流域自然地理复杂,水土流失严重,河道渗漏明显。永定河山区已建各类水库 240 座,总库容 56.61 亿 m^3 。其中大型水库 3 座,中型水库 25 座,小型水库 212 座。随着永定河流域社会经济的不断发展,森林植被破坏严重,沿途用水不断增加,截水和引水工程大量修建,永定河来水急剧衰减。

官厅水库来水量 50 年代多在 20 亿 m^3 左右,之后衰减迅速,见图 4-1。特别是进入二十一世纪以后,来水量连创新低,自 2001 年后来水量均在 2 亿 m^3 以下,2005 年以后,若除去调水,来水量均不足 1 亿 m^3 ,特别是 2009 年,官厅水库来水量仅为 0.22 亿 m^3 ,是历史最小值。从各年代来看,来水量也呈现递减的趋势。五十年代的来水量(20.39 亿 m^3)是二十一世纪初来水量(0.98

亿 m^3) 的 20 倍, 官厅水库的来水量急剧衰减。

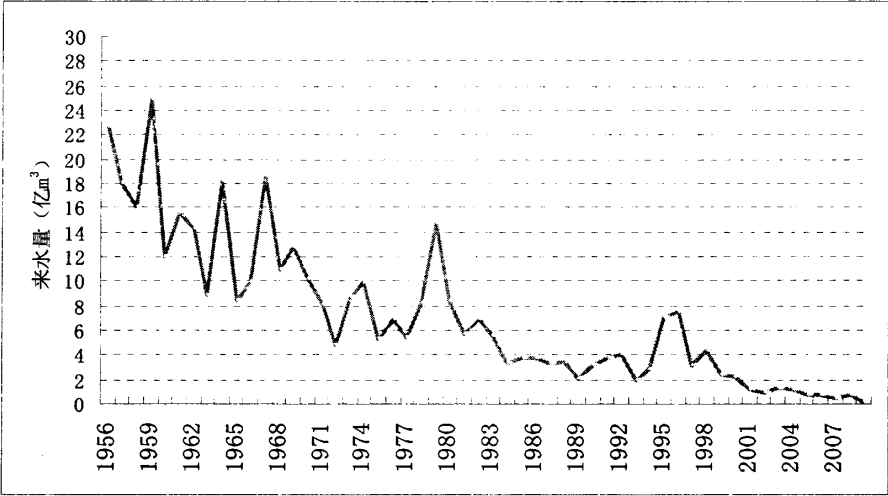


图 4-1 永定河官厅水库来水量

4.4 多水源配置模型

4.4.1 模型概述

水资源优化配置是为了水资源在时间、空间、数量、质量以及用途上合理分配以发挥出最大效益, 具有多水源、多要素、多用户、多目标等属性^[64-66], 如图 4-2 所示。统筹考虑水资源类型、要素、用户、目标的属性, 确立各属性的重要程度和优先序, 是实现水资源合理配置的关键。

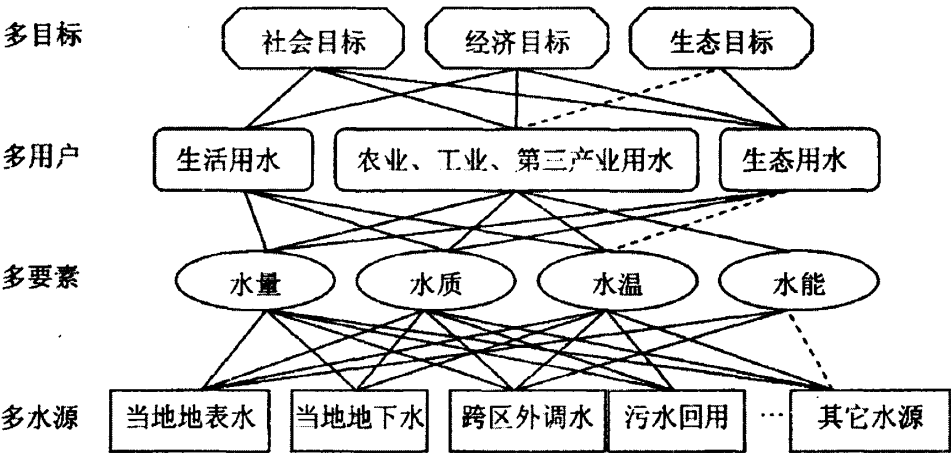


图 4-2 水资源优化配置属性关系示意图

4.4.2 模型建立

4.2.2.1 系统概化

进行水资源优化配置首先对实际水资源系统进行抽象和概化，并绘制系统网络图。概化原则有：反应水量传递关系、揭示供需矛盾、适应资料状况并便于供需分析计算。永定河流域水资源优化配置要支撑北京门头沟、石景山、丰台、房山、大兴五个区县的资源、社会、经济、环境的可持续发展，其配置目标应包含经济效益目标、成本目标、生态目标和社会目标四个方面，故考虑采用多目标优化模型。

4.2.2.2 划分用户及水源级别

结合永定河流域研究区域，可将用户分为：第一级为生活用水和生态用水，第二级为工业生产用水，第三级为农业灌溉用水。各供水目标及优先级依次为：

- (1) 保证生活用水；
- (2) 满足生态用水；
- (3) 尽量完成工业产值；
- (4) 尽量完成农业产值；
- (5) 供水成本尽可能低。

根据永定河流域各水源调节能力等的不同，确定不同水源的供水次序为：先提引水库水和地表水，其次地下水，最后为外调水源。

4.2.2.3 约束条件

将生活用水量 and 生态需水量设为绝对约束，以保证这两种需水要求，其余供水目标转化为目标约束，为软约束。

- (1) 生活用水量约束

$$W_i + H_i + T_{gi} + T_{ui} \geq S_i \quad (4-1)$$

式中： W_i 为 i 时期水库蓄水中可作为生活用水的水量 (10^4m^3)； H_i 为 i 时期南水北调水中可作为生活用水的水量 (10^4m^3)； T_{gi} 为 i 时期地表水中可作为生活用水的水量 (10^4m^3)； T_{ui} 为 i 时期地下水中可作为生活用水的水量 (10^4m^3)； S_i 为 i 时期生活用水的总需水量 (10^4m^3)。

- (2) 生态需水量约束

$$T_{gi} \geq E_i \quad (4-2)$$

式中： E_i 为 i 时期生态需水量 (10^4m^3)。

(3) 工业产值约束

$$a_i[W_i + H_i + T_{gi} + T_{ui}] - \delta_v^+ + \delta_v^- = V_i \quad (4-3)$$

式中： a_i 为单位供水量产值（元）； V_i 为规划工业产值（元）。

(4) 供水成本约束：

$$\theta_i W_i + \lambda_{hi} H_i + \lambda_{gi} T_{gi} + \lambda_{ui} T_{ui} - \delta_f^+ + \delta_f^- = F_i \quad (4-4)$$

式中： θ_i 为水库供水水价（元）； λ_{hi} 、 λ_{gi} 和 λ_{ui} 分别为南水北调水、地表水、地下水的单位取水成本（元）； F_i 为规划供水成本（元）。

(5) 农业需水量约束

$$W_i + H_i + T_{gi} + T_{ui} - \delta_a^+ + \delta_a^- = A_i \quad (4-5)$$

式中： A_i 为农业需水量（ 10^4m^3 ）。

(6) 水资源量约束

取各水源多年平均可供水量作为约束条件右端的资源项，有资源约束：
官厅水库全年可供水量约束：

$$Q_e \leq Q_p \quad (4-6)$$

南水北调水量约束：

$$H_i \leq Q_h \quad (4-7)$$

地表水量约束：

$$T_{gi} \leq Q_g \quad (4-8)$$

地下水量约束：

$$T_{ui} \leq Q_u \quad (4-9)$$

式中： Q_e 为水库实际供水量； Q_p 、 Q_h 、 Q_g 和 Q_u 分别为水库的年可供水量、南水北调水量、地表水可供水量和地下水可开采量（ 10^4m^3 ），可供水量为多年平均值。

(7) 水量平衡约束

$$V_{le} = V_{lb} + Q_{lin}T - Q_{lsa}T - Q_{lqi}T \quad (4-10)$$

式中： V_{le} 和 V_{lb} 为水库在时段 T 的初、末库容（ 10^4m^3 ）； Q_{lin} 为水库的入库

流量, Q_{lsa} 为供水流量, Q_{lqi} 为弃水流量 (m^3/s)。

(8) 其他约束: 变量非负约束等。

4.2.2.4 目标函数

用 P_i 表示第 i 级优先因子, 则由模型准则和以上约束条件可确定多目标规划的各目标函数如下:

(1) 经济目标: 尽可能完成区域的规划工业产值, 由式 (4-3) 可知, 要求负偏差最小化, 即:

$$Z_1 = P_1 \sum \delta_v^- \quad (4-11)$$

(2) 供水成本目标: 供水费用越少越好, 由式 (4-4) 可知, 要求正偏差最小化, 即:

$$Z_2 = P_2 \sum \delta_f^+ \quad (4-12)$$

(3) 农业需水目标: 尽可能满足农业需水量, 由式 (4-5) 可知, 要求负偏差最小化, 即:

$$Z_3 = P_3 \sum \delta_a^- \quad (4-13)$$

由以上 3 个目标函数得线性目标规划的目标函数:

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (4-14)$$

4.5 模型的应用及求解

永定河流域现有供水水源主要包括官厅水库蓄水量、地表水、地下水和南北调来水, 由北京市水资源公报可知, 各水源可供水量见表 4-1、4-2 所示。

表 4-1 官厅水库可供水量 (单位: 10^4m^3)

	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2020 年
年末蓄水量	16300	11900	17000	14400	19000
可利用来水量	8000	2200	11300	4600	10000

表 4-2 永定河流域水资源量 (单位: 10^4m^3)

水源类别	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2020 年
地表水	32200	6900	11700	7600	14600
地下水	35200	22800	27000	27800	28200
水资源总量	67400	29700	38700	35400	42800

南水北调中线北京段工程于 2007 年底主体工程完工，2008 年 4 月具备接收河北四水库来水条件。南水北调中线工程全线计划 2014 年底通水，实现长江水进京。2008 年起，南水北调中线工程开始向北京供水，供水量见表 4-3。

表 4-3 南水北调中线工程北京段调水量（单位： 10^4m^3 ）

	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2020 年
调水量	7300	26000	26000	26000	26000

官厅水库蓄水、地表水、地下水及南水北调水的 2010 年及 2020 年的年内分配见表 4-4、4-5。

表 4-4 各水源 2010 年供水年内分配成果（单位： 10^4m^3 ）

	水库蓄水	地表水	地下水	南水北调水	合计
1 月	587.6	70.2	2250.0	2166.7	5074.5
2 月	678.0	117.0	2250.0	2166.7	5211.7
3 月	1469.0	292.5	2250.0	2166.7	6178.2
4 月	858.8	538.2	2250.0	2166.7	5813.7
5 月	384.2	959.4	2250.0	2166.7	5760.3
6 月	644.1	1743.3	2250.0	2166.7	6804.1
7 月	1344.7	2983.5	2250.0	2166.6	8744.8
8 月	1943.6	2691.0	2250.0	2166.6	9051.2
9 月	1130.0	1462.5	2250.0	2166.6	7009.1
10 月	1017.0	585.0	2250.0	2166.6	6018.6
11 月	610.2	198.9	2250.0	2166.7	5225.8
12 月	632.8	58.5	2250.0	2166.7	5108.0
全年	11300.0	11700.0	27000.0	26000.0	76000.0

表 4-5 各水源 2020 年供水年内分配成果 (单位: 10^4m^3)

	水库蓄水	地表水	地下水	南水北调水	合计
1 月	520.0	87.6	2350.0	2166.7	5124.3
2 月	600.0	146.0	2350.0	2166.7	5262.7
3 月	1300.0	365.0	2350.0	2166.7	6181.7
4 月	760.0	671.6	2350.0	2166.7	5948.3
5 月	340.0	1197.2	2350.0	2166.7	6053.9
6 月	570.0	2175.4	2350.0	2166.7	7262.1
7 月	1190.0	3723.0	2350.0	2166.6	9429.6
8 月	1720.0	3358.0	2350.0	2166.6	9594.6
9 月	1000.0	1825.0	2350.0	2166.6	7341.6
10 月	900.0	730.0	2350.0	2166.6	6146.6
11 月	540.0	248.2	2350.0	2166.7	5304.9
12 月	560.0	73.0	2350.0	2166.7	5149.7
全年	10000.0	14600.0	28200.0	26000.0	78800.0

由北京市国民经济和社会发展统计公报数据可知,永定河流域北京段的经济数据见表 4-6。

表 4-6 永定河流域北京段经济数据 (单位: 亿元)

宏观经济指标	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2020 年
生产产值	1223.6	1454.7	2442.5	2815	5056.0
财政收入	111	143.1	539.3	573.5	1116.4
固定资产投资	585.6	1315.1	1809.2	2066.5	3745.0
规模以上工业总产值	2205.8	2178.1	4755	4720	9842.9

结合第 3 章的官厅水库(坝下)水文站生态需水量计算结果,以及北京市国民经济与社会发展统计公报数据,可计算出永定河流域北京段的需水成果。永定河流域 2010 年及 2020 年需水成果见表 4-7、4-8。

表 4-7 永定河流域北京段 2010 年需水量成果表（单位： 10^4m^3 ）

项目	生活需水量	生态环境需水量	农业需水量	工业需水量	总需水量
1	3000	1400	20	850	5270
2	3000	1300	430	850	5580
3	3000	1300	3000	850	8150
4	3000	1300	3600	850	8750
5	3000	700	4500	850	9050
6	3000	1400	2650	850	7900
7	3000	300	2100	850	6250
8	3000	200	2600	850	6650
9	3000	300	1900	850	6050
10	3000	1000	900	850	5750
11	3000	1000	800	850	5650
12	3000	1400	500	850	5750
全年	36000	11600	23000	10200	80800

表 4-8 永定河流域北京段 2020 年需水量成果表（单位： 10^4m^3 ）

项目	生活需水量	生态环境需水量	农业需水量	工业需水量	总需水量
1	3450	1680	25	1300	6455
2	3450	1560	550	1300	6860
3	3450	1560	3750	1300	10060
4	3450	1560	4500	1300	10810
5	3450	840	5600	1300	11190
6	3450	1680	3325	1300	9755
7	3450	360	2650	1300	7760
8	3450	240	3300	1300	8290
9	3450	360	2400	1300	7510
10	3450	1200	1200	1300	7150
11	3450	1200	1000	1300	6950
12	3450	1680	650	1300	7080
全年	41400	13920	28950	15600	99870

该优化配置模型涉及到多水源、多用户，属于多目标规划问题，根据以上数据确定该模型的目标函数、约束条件，采用目标规划算法程序来求解，计算结果见表 4-9、4-10。

表 4-9 永定河流域 2010 年水资源优化结果表（单位：10⁴m³）

	水源类别	供水量	项目	生活	生态	工业	农业	合计
1 月	水库蓄水	587.6	需水量	3000	1400	850	20	5270
	地表水	70.2	供水量	3000	1280	780	14.5	5074.5
	地下水	2250	缺水量	0	120	70	5.5	195.5
	南水北调水	2166.7						
2 月	水库蓄水	678	需水量	3000	1300	850	430	5580
	地表水	117	供水量	3000	1115	730	366.7	5211.7
	地下水	2250	缺水量	0	185	120	63.3	368.3
	南水北调水	2166.7						
3 月	水库蓄水	1469	需水量	3000	1300	850	3000	8150
	地表水	292.5	供水量	3000	804	525	1849.2	6178.2
	地下水	2250	缺水量	0	496	325	1150.8	1971.8
	南水北调水	2166.7						
4 月	水库蓄水	858.8	需水量	3000	1300	850	3600	8750
	地表水	538.2	供水量	3000	638	417	1758.7	5813.7
	地下水	2250	缺水量	0	662	433	1841.3	2936.3
	南水北调水	2166.7						
5 月	水库蓄水	384.2	需水量	3000	700	850	4500	9050
	地表水	959.4	供水量	3000	320	388	2052.3	5760.3
	地下水	2250	缺水量	0	380	462	2447.7	3289.7
	南水北调水	2166.7						
6 月	水库蓄水	644.1	需水量	3000	1400	850	2650	7900
	地表水	1743.3	供水量	3000	1088	660	2056.1	6804.1
	地下水	2250	缺水量	0	312	190	593.9	1095.9
	南水北调水	2166.7						
7 月	水库蓄水	1344.7	需水量	3000	300	850	2100	6250
	地表水	2983.5	供水量	3000	300	850	2100	6250
	地下水	2250	缺水量	0	0	0	0	0
	南水北调水	2166.6	弃水量					2494.8
8 月	水库蓄水	1943.6	需水量	3000	200	850	2600	6650
	地表水	2691	供水量	3000	200	850	2600	6650
	地下水	2250	缺水量	0	0	0	0	0
	南水北调水	2166.6	弃水量					2401.2
9 月	水库蓄水	1130	需水量	3000	300	850	1900	6050
	地表水	1462.5	供水量	3000	300	850	1900	6050
	地下水	2250	缺水量	0	0	0	0	0
	南水北调水	2166.6	弃水量					959.1
10 月	水库蓄水	1017	需水量	3000	1000	850	900	5750
	地表水	585	供水量	3000	1000	850	900	5750
	地下水	2250	缺水量	0	0	0	0	0
	南水北调水	2166.6	弃水量					268.6

表 4-9 (续表) 永定河流域 2010 年水资源优化结果表 (单位: 10^4m^3)

	水源类别	供水量	项目	生活	生态	工业	农业	合计
11 月	水库蓄水	610.2	需水量	3000	1000	850	800	5650
	地表水	198.9	供水量	3000	840	714	671.8	5225.8
	地下水	2250	缺水量	0	160	136	128.2	424.2
	南水北调水	2166.7						
12 月	水库蓄水	632.8	需水量	3000	1400	850	500	5750
	地表水	58.5	供水量	3000	1074	652	382	5108
	地下水	2250	缺水量	0	326	198	118	642
	南水北调水	2166.7						
全年	水库蓄水	11300	需水量	36000	11600	10200	23000	80800
	地表水	11700	供水量	36000	8959	8266	16651.3	69876.3
	地下水	27000	缺水量	0	2641	1934	6348.7	10923.7
	南水北调水	26000						

表 4-10 永定河流域 2020 年水资源优化结果表 (单位: 10^4m^3)

	水源类别	供水量	项目	生活	生态	工业	农业	合计
1 月	水库蓄水	520	需水量	3450	1680	1300	25	6455
	地表水	87.6	供水量	3450	938	726	10.3	5124.3
	地下水	2350	缺水量	0	742	574	14.7	1330.7
	南水北调水	2166.7						
2 月	水库蓄水	600	需水量	3450	1560	1300	550	6860
	地表水	146	供水量	3450	830	692	290.7	5262.7
	地下水	2350	缺水量	0	730	608	259.3	1597.3
	南水北调水	2166.7						
3 月	水库蓄水	1300	需水量	3450	1560	1300	3750	10060
	地表水	365	供水量	3450	646	538	1547.7	6181.7
	地下水	2350	缺水量	0	914	762	2202.3	3878.3
	南水北调水	2166.7						
4 月	水库蓄水	760	需水量	3450	1560	1300	4500	10810
	地表水	671.6	供水量	3450	530	442	1526.3	5948.3
	地下水	2350	缺水量	0	1030	858	2973.7	4861.7
	南水北调水	2166.7						
5 月	水库蓄水	340	需水量	3450	840	1300	5600	11190
	地表水	1197.2	供水量	3450	283	438	1882.9	6053.9
	地下水	2350	缺水量	0	557	862	3717.1	5136.1
	南水北调水	2166.7						
6 月	水库蓄水	570	需水量	3450	1680	1300	3325	9755
	地表水	2175.4	供水量	3450	1016	787	2009.1	7262.1
	地下水	2350	缺水量	0	664	513	1315.9	2492.9
	南水北调水	2166.7						

表 4-10（续表） 永定河流域 2020 年水资源优化结果表（单位：10⁴m³）

	水源类别	供水量	项目	生活	生态	工业	农业	合计
7 月	水库蓄水	1190	需水量	3450	360	1300	2650	7760
	地表水	3723	供水量	3450	360	1300	2650	7760
	地下水	2350	缺水量	0	0	0	0	0
	南水北调水	2166.6	弃水量					1669.6
8 月	水库蓄水	1720	需水量	3450	240	1300	3300	8290
	地表水	3358	供水量	3450	240	1300	3300	8290
	地下水	2350	缺水量	0	0	0	0	0
	南水北调水	2166.6	弃水量					1304.6
9 月	水库蓄水	1000	需水量	3450	360	1300	2400	7510
	地表水	1825	供水量	3450	346	1247	2298.6	7341.6
	地下水	2350	缺水量	0	14	53	101.4	168.4
	南水北调水	2166.6						
10 月	水库蓄水	900	需水量	3450	1200	1300	1200	7150
	地表水	730	供水量	3450	875	948	873.6	6146.6
	地下水	2350	缺水量	0	325	352	326.4	1003.4
	南水北调水	2166.6						
11 月	水库蓄水	540	需水量	3450	1200	1300	1000	6950
	地表水	248.2	供水量	3450	636	689	529.9	5304.9
	地下水	2350	缺水量	0	564	611	470.1	1645.1
	南水北调水	2166.7						
12 月	水库蓄水	560	需水量	3450	1680	1300	650	7080
	地表水	73	供水量	3450	788	610	301.7	5149.7
	地下水	2350	缺水量	0	892	690	348.3	1930.3
	南水北调水	2166.7						
全年	水库蓄水	10000	需水量	41400	13920	15600	28950	99870
	地表水	14600	供水量	41400	7488	9717	17220.8	75825.8
	地下水	28200	缺水量	0	6432	5883	11729.2	24044.2
	南水北调水	26000						

4.6 配置方案的分析

利用模型通过计算，可以得到永定河流域的水资源优化配置方案，计算结果见表 4-9、4-10，供需效果图见图 4-3 至 4-10。从计算结果可以看出：

（1）由于永定河流域供水缺口比较大，供水年内分布不均匀，配置方案按生活用水>生态用水>工业用水>农业用水的优先度进行水量配置，优先保证了永定河流域居民的基本用水需求，同时也将大大改善流域生态环境，环境生态用水危机；工业供水得到基保证，保证流域经济发展用水；农业用水缺口最大，但是并不影响基本的农业生产。通过多水源联合调度配置，有效提高了流域地区的供水保证率，提高各种水源的利用率，大大缓解了水资源短缺的压力。

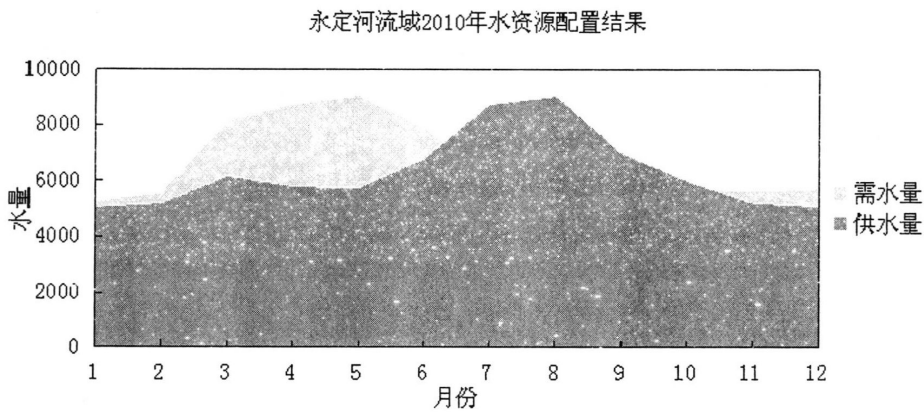


图 4-3 永定河流域 2010 年水资源配置结果

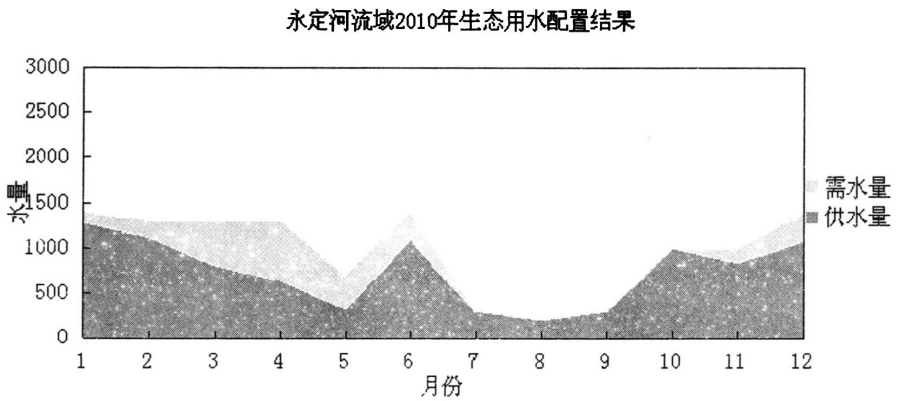


图 4-4 永定河流域 2010 年生态用水配置结果

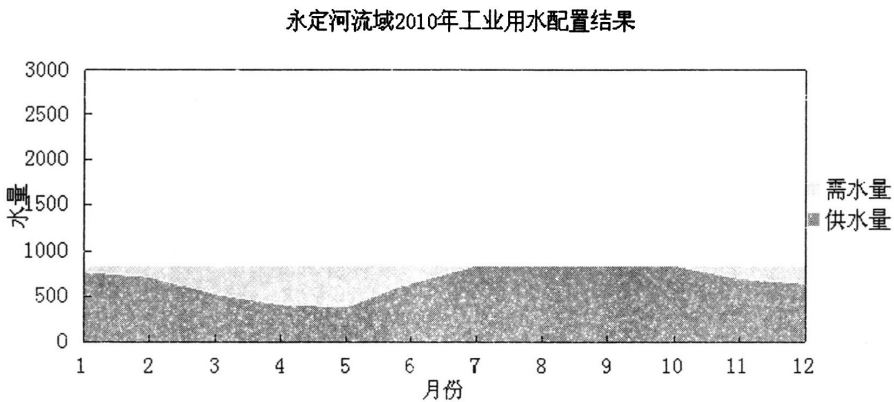


图 4-5 永定河流域 2010 年工业用水配置结果

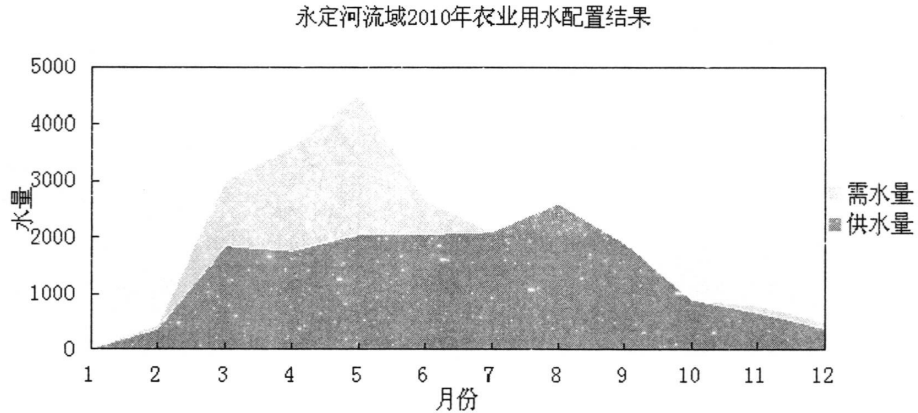


图 4-6 永定河流域 2010 年农业用水配置结果

(2) 由图 4-4 至 4-6 可知：优化配置结果直观地反映了各用水部门水资源短缺量，这为分析水资源供水和需水分配中存在的问题提供了极大的便利。分析可得永定河流域水量缺口最大的月份为 3 至 5 月，这一时期永定河流域降水稀少，又正值春耕时期，农业用水量大幅增加，造成供水紧缺。

(3) 配置方案表明：永定河流域北京地区资源性缺水严重，由图 4-7 至 4-10 可知，由于人口增长及经济的发展，未来缺水形势将会更加严峻。通过南水北调工程，在一定程度上缓解了北京地区用水紧张情况。但是南水北调供水量不可能无限制增加，这就必须加强需水管理，充分挖掘节水工程的潜力，进一步提高水资源利用效率。

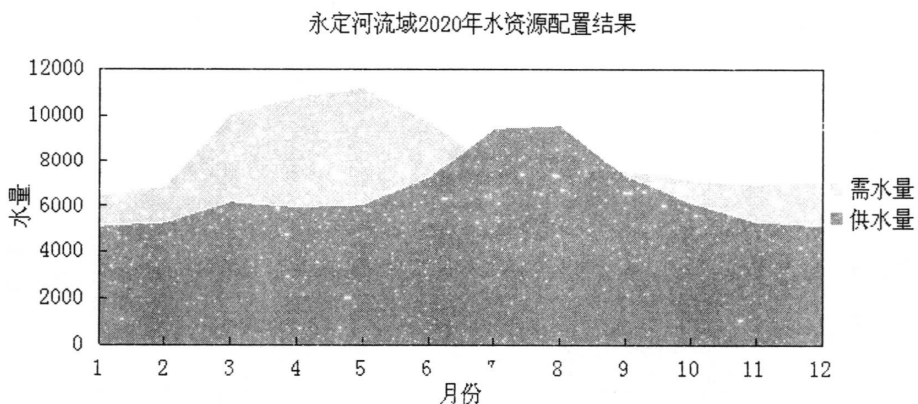


图 4-7 永定河流域 2020 年水资源配置结果

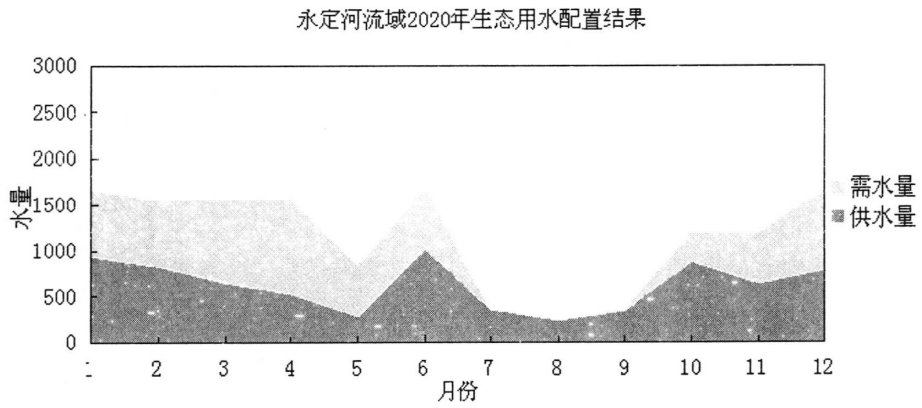


图 4-8 永定河流域 2020 年生态用水配置结果

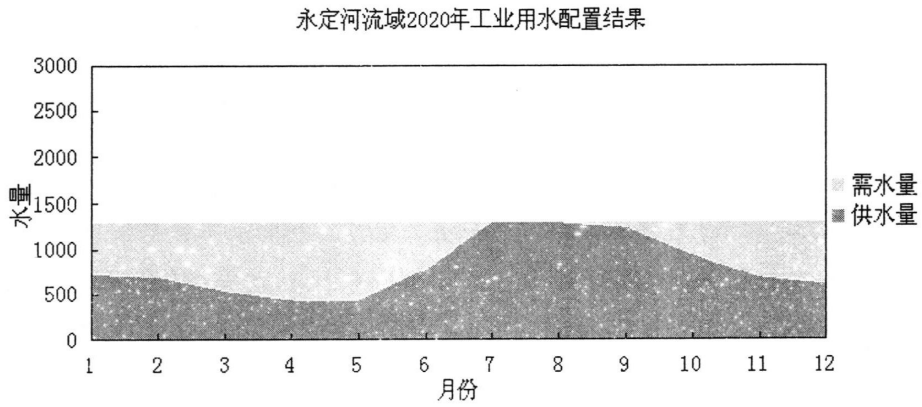


图 4-9 永定河流域 2020 年工业用水配置结果

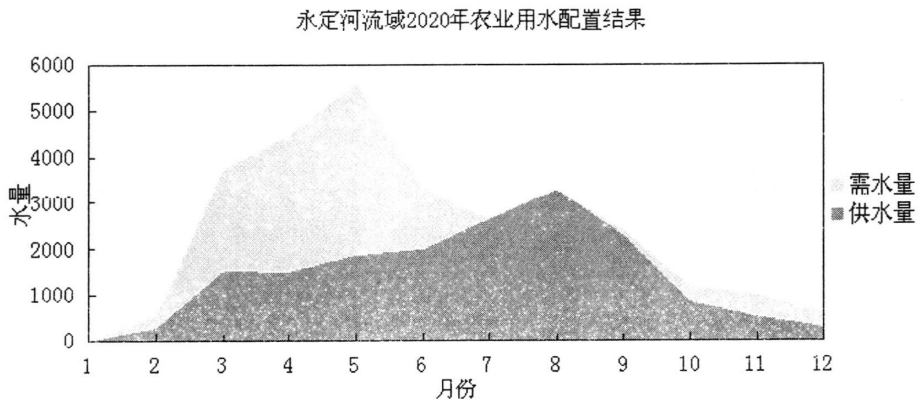


图 4-10 永定河流域 2020 年农业用水配置结果

4.7 本章小结

本章主要介绍了水资源优化配置相关理论，分析调查了永定河流域的水源结构，计算分析永定河流域的供水及用水情况，依此建立永定河多水源配置模型，结合永定河流域实际情况运用该模型进行求解计算，得到永定河流域水资源优化配置方案。最后，对该配置方案进行了可行性分析，其基本符合永定河流域的实际情况。

此页不缺内容

第5章 结 论

本文永定河流域北京地区河段为例, 分析比较 Tennant 法、流量历时曲线法、RVA 法、湿周法等几种生态需水计算方法在该地区应用的差异性, 研究了永定河流域多水源系统水资源优化配置的理论, 初步建立永定河多水源配置综合调控模型, 提出永定河水资源优化配置的调控方案, 取得了一些新的成果, 具有一定的实用价值。

本文主要进行了以下工作:

(1) 本文探讨研究了几种生态需水量的计算方法, 并进行分析比较。根据永定河流域水源结构及用水情况, 重点研究了河道内生态需水量计算方法中的流量历时曲线法、RVA 法、湿周法。根据永定河流域的实际规划, 结合特征水文断面观测资料, 综合计算确定永定河的生态需水量, 计算得到不同河段和尺度的河道生态需水量, 为水资源优化配置提供基础数据成果。

(2) 研究讨论了水资源优化配置的概念、范围、目标、原则、措施等, 分析水资源优化配置机制, 在充分考虑永定河流域特点的基础上, 确定水资源分配原则, 建立永定河多水源配置综合调控模型, 并应用于永定河流域, 提出永定河水资源优化配置的调控方案, 为水行政部门科学决策提供依据。

本文的主要创新成果有:

(1) 运用流量历时曲线法、变异范围法 (RVA)、Tennant 法以及湿周法对比计算最小生态需水量, 并计算生态需水量的年内分配方案。

(2) 在研究过程中提出了与水资源优化配置年内分配的时间尺度相一致的小尺度生态需水量计算方法, 即流量历时曲线法, 对生态需水进行年内分配, 并应用于永定河流域水资源优化配置。

(3) 结合永定河流域多水源结构的实际情况, 研究建立了永定河多水源配置综合调控模型, 并将该模型应用于研究区, 提出永定河水资源优化配置的调控方案, 为水行政部门科学决策提供依据。

由于生态需水理论及水资源优化配置的复杂性, 以及作者在论文工作过程中受资料、时间等因素的限制, 论文取得的成果在今后学习工作中还有待进一步深入研究:

(1) 生态需水的概念依然没有一个公认的界定, 生态需水、生态用水、生态耗水等概念容易产生混淆; 生态需水量时间尺度不协调, 多以年为单位, 无法直接应用于水资源优化配置, 虽然本文提出了月最小生态需水量的计算方法, 但还需要进一步改进。

(2) 多水源水资源优化配置模型只是初步提出并应用于永定河流域, 在其他流域的适应性还有待进一步验证。同时, 模型的求解算法也有改进的地方, 新优化方法的引入会促进该模型的自身完善。

参考文献

- [1]Tennant D.L.. Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources[C], in Orsborn J.F. and Allman C.H.(Eds), Proceedings of the Symposium and Speciality Conference on Instream Flow Needs II. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. 1976(4): 359-373
- [2]Gleick P.H.. Water in crisis: Paths to sustainable water use[J].Ecological Applications.1998,8(3):571-579
- [3]White R.G.. A Methodology for Recommending Stream Resource Maintenance Flows for Large Rivers[C]. In Orsborn J. F. and Allman C.H.(Eds), Proceedings of the Symposium and Speciality Conference on Instream Flow Needs II. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.1976(4): 376-386
- [4]Falkenmark M.. Coping with Water Scarcity Under Rapid Population Growth[C]. Conference of SADC Minsters, Pretoria, 1995: 223-224
- [5]Rashin P.D., Hansen E., Margolis R.M.. Water and Sustainability:Global Patterns and Longrange Problems[C]. Natural Researchs Forum. 1996, 20(1): 1-15
- [6]Richter B.D., J.V. Buamgartner, J. Powell etc.. A method of assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology.1996, 10(4): 1163-1174
- [7]Richter B.D., J.V. Buamgartner, R.Wigington etc.. How much water does a river need?[J].Freshwater Biology.1997, 37(2):231-249
- [8]Whipple W., DuBois J.D., Grigg N.. A Proposed Approach to Coordination of Water Resource Development and Environmental Regulations[J].Journal of the American Water Resources Association.1999,35(4):713-716
- [9]Baird A.J., Wilby R.L.. Eco-hydrology:Plant and water in terrestrial and aquatic environments[M].London and New York: Routledge Press.1999: 78-156
- [10]Mosely M.P.. The effect of changing discharge on channel morphology and instream uses and in a braide river,Ohau River,New Zealand[J].Water Resources Researches.1982, (18): 800-812
- [11]Nelson F.A.. Evaluation of seletced instream flow methods in Montana[C]. Proceedings of the Annual Conference of the Westerm Association of Fish and Wildlife Agencies.1980
- [12]Leathe S.A.,and Nelson F.A.. A literature evaluation of Montana's wetted perimeter inflection point method for deriving instream flow recommendations [R].1986

- [13]V.U.Smakhtin.Low flow hydrology:a review[J].Journal of Hydrology. 2001, 240: 147-186
- [14]汤奇成.绿洲的发展与水资源的合理利用[J].干旱区资源和环境,1995,9(3): 107-112
- [15]贾宝全,许英勤.干旱区生态用水概念和分类——以新疆为例[J].干旱区地理,1998,21(2):8-12
- [16]刘昌明.中国 21 世纪水供需分析:生态水利研究[J].中国水利,1999,(10):18-20
- [17]李丽娟,郑红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J].地理学报,2000,55(4):495-500
- [18]王让会,宋郁东,樊自立等.塔里木流域“四源一干”生态需水量的估算[J].水土保持学报,2001,15(1):19-22
- [19]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) [J].环境科学学报,2001,21(5):544-547
- [20]崔保山,杨志峰.湿地生态环境需水量研究[J].环境科学学报,2002, 22(2): 213-218
- [21]石伟,王光谦.黄河下游生态需水量及其估算[J].地理学报,2002, 57(5): 595-602
- [22]杨志峰,崔保山,刘静玲等.生态环境需水理论、方法与实践[M].北京:科学出版社.2003
- [23]杨志峰,崔保山,刘静玲.生态环境需水量评估方法与例证[J].中国科学(D辑). 2004, 34(11): 1072-1082
- [24]张远,杨志峰,王西琴.河道生态环境分区需水量的计算方法与实例分析[J].环境科学学报,2005,25(4): 429-436
- [25]门宝辉,刘昌明,夏军等.南水北调西线一期工程河道最小生态径流估算与评价[J].水土保持学报,2005,15(1): 19-22
- [26]刘静玲,杨志峰,肖芳等.河流生态基流量整合计算模型[J].环境科学学报,2005,25(4): 436-441
- [27]陈启慧,夏自强,郝振纯等.计算生态需水的 RVA 法及其应用[J].水资源保护,2005,21(3): 4-5
- [28]刘蕾.东北典型湿地及松辽流域河道内生态需水研究[D].武汉大学硕士学位论文,2005
- [29]吉利娜,刘苏峡,吕宏兴等.湿周法估算河道内最小生态需水量的理论分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(2): 124-130
- [30]仁杰.典型荒漠化草地 GSPAC 系统水分动态模拟与生态需水研究[D].内蒙

古农业大学硕士学位论文,2006

- [31]郭文献,夏自强.长江中下游河道生态流量研究[J].水利学报,2007,S1: 619-623
- [32]任江红.水库生态环境需水理论研究[D].华中科技大学硕士学位论文,2007
- [33]刘昌明,门宝辉,宋进喜.河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J].自然科学进展,2007,17(1): 42-48
- [34]陈南洋.复杂系统水资源合理配置理论与实践[D].西安理工大学博士学位论文,2006
- [35]杜守健.区域水资源优化配置研究[D].西安理工大学博士学位论文,2009
- [36]门宝辉,张士锋,夏军.永定河官厅水库下游河道内生态需水量研究[J].Journal of Resources and Ecology.2010,1(3): 211-215
- [37]杨志峰,刘静玲,孙涛等.流域生态需水规律[M].北京:科学出版社.2006
- [38]王庆国,李嘉,李克峰等.河流生态需水量计算的湿周法拐点斜率取值的改进[J].水利学报,2009,40(5): 550-555
- [39]吉利娜,刘苏峡,王新春.湿周法估算河道内最小生态需水量——以滦河水系为例[J].地理科学进展,2010,29(3): 287-291
- [40]SL/Z 479-2010.河湖生态需水评估导则[S].2010
- [41]徐志侠,王浩,董曾川等.河道与湖泊生态需水理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2006
- [42]宋进喜,李怀恩.渭河生态环境需水量研究[M].北京:中国水利水电出版社.2004
- [43]王西琴.河流生态需水理论、方法与应用[M].北京:中国水利水电出版社.2007
- [44]D. Pearson and P. D. Walsh. The Derivation and Use of Control Curves for the Regional Allocation of Water Resour[C]. Res. Optimal Allocation Water Resources (Proceedings of the Enter Symposium).1982,135
- [45]Bayer M.B.. A Modeling Method for Evaluating Water Quality Policies in Non-serial River System[J]. Water Resources Bulletin, 1997,33(6): 1141-1151
- [46]Forge Bielsa, Rosa Duarte.An Economic Model for Water Allocation in North Eastern Spain[J]. Water Resources Development, 2001, 17(3): 397-410
- [47]Sakhiwe Nkomo, Pieter van der Zaag. Equitable water allocation in a heavily committed international catchment area: the case of the Komati Catchment[J]. Physics and Chemistry of the Earth. 2004, 29: 1309-1317
- [48]Maja SchILTter, Andre G. Savitsky, Daene C. McKinney etc.. Optimizing long-term water allocation in the Amudarya River delta: a water management model for ecological impact assessment[J]. Environmental Modelling &

Software. 2005, 20: 529-545

- [49]王浩,秦大庸,王建华等.黄淮海流域水资源合理配置[M].北京:科学出版社,2003
- [50]许新宜,王浩,甘弘等.华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,1997
- [51]翁文斌,王忠静,赵建世.现代水资源规划——理论、方法和技术[M].北京:清华大学出版社,2004
- [52]裴源生.宁夏经济生态系统水资源合理配置研究[J].中国水利,2006,11: 19-25
- [53]邵东国,贺新春,黄显峰等.基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J].水利学报,2005,36(9): 1050-1056
- [54]门宝辉,林春坤,李智飞等.永定河官厅山峡河道内最小生态需水量的历时曲线法[J].南水北调与水利科技,2012,10(2): 52-56
- [55]季红飞.跨流域水资源系统模拟与优化调度研究[D].河海大学博士学位论文,2008
- [56]万译文.北京地表水中环境激素监测及健康风险评估[D].北京工业大学硕士学位论文,2009
- [57]陈月平.官厅水库水资源现状分析[J].北京水务.2007(6):7-11
- [58]王沛芳.城市水生态系统建设模式研究[D].河海大学博士论文,2003
- [59]郑志宏,张泽中,黄强等.生态需水量计算 Tennant 法的改进及应用[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(2): 34-39
- [60]英晓明.基于 IFIM 方法的河流生态环境模拟研究[D].河海大学硕士学位论文,2006
- [61]张丽.流域生态需水理论与量化方法研究——以洮儿河流域为例[D].中国科学院地理科学与资源研究所博士学位论文,2008
- [62]郭文献,夏自强.对计算河道最小生态流量湿周法的改进研究[J].水力发电学报,2009,28(3): 171-175
- [63]史方方,黄薇.用改进湿周法计算河道内最小生态流量[J].长江科学院院报,2009,26(4): 9-12
- [64]舒畅,刘苏峡,莫兴国等.基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J].生态环境学报,2010,19(5): 1151-1155
- [65]王卫光.咸水灌溉及区域水资源规划模型研究[D].武汉大学硕士学位论文,2003
- [66]崔东文.云南文山州区域水资源优化配置计算分析[J].黄河水利职业技术

学院学报,2011,23(2): 1-4

[67]康文智. 乐至县水资源供需平衡分析及对策研究[D].四川农业大学硕士学位论文,2011

[68]南水北调城市水资源规划组. 南水北调城市水资源规划简介[J]. 中国水利,2003,1B: 28-33

[69]李光远,李运来. 南水北调对北京地表水供水体系的影响及对策——以官厅、密云两大水库为例[J].中国水利,2008(5): 47-49

[70]李运来. 南水北调对北京供水体系的影响及对策[J].水工业市场, 2009(Z1): 31-33

[71]程卫华. 官厅水库水文特性统计分析[J]. 北京水务, 2012(5): 29-32

[72]张永祥,秦景华,王慧峰等. 北京市朝阳区多目标水量优化配置模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007,37(2): 243-248

此页不缺内容

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

（一）发表的学术论文

- [1]门宝辉,林春坤,孙波杨等.基于 DFA 的桑干河水文气象因子的趋势分析[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(4): 53~56
- [2]Men BaoHui, Liu ChangMing, Lin ChunKun. A new criterion for defining the breakpoint of the wetted perimeter-discharge curve and its application to estimating minimum instream flow requirements[J]. Science China Technological Sciences, 2012,55(10):2686~2693(EI 收录号:IP52151652)
- [3]Yang Nan, Men Bao-Hui, Lin Chun-Kun. Impact analysis of climate change on water resources[C]. Procedia Engineering, 2011, 24: 643~648 (EI 收录号: 20120314687557)

此页不缺内容

致 谢

衷心感谢导师门宝辉副教授对本人的精心指导，他的言传身教将使我终生受益。在作者攻读硕士学位期间，是在导师的严格要求和无微不至的关怀下，本论文的研究工作才得以不断进展。导师严谨的治学态度、深厚的学术造诣、丰富的工作经验、谦和的学者风范和高尚的品格，是作者一生立身处世的榜样。值此之际，再次向导师表示衷心的感谢！

衷心感谢华北电力大学可再生能源学院的老师们，他们在课程学习及论文工作中给予了大量的关心和指导。感谢研可再生 1029 班的全体同学，在 2.5 年的硕士研究生生涯中，他们的大力支持和帮助给予了作者莫大的动力。借此，一并向他们表示真诚的谢意！

本课题承蒙华北电力大学中央高校基本科研业务费基金资助，特此致谢。