

华北水利水电学院

硕士学位论文

北运河生态影响评价及水质水量联合调度研究

姓名：徐敏

申请学位级别：硕士

专业：地质工程

指导教师：陈南祥

2010-05

北运河生态影响评价及水质水量联合调度研究

摘 要

水资源是一项基础性的自然资源和战略性的经济资源，它代表着一个国家的综合实力。现在社会经济迅猛发展，人口也在不断增加，与其相生伴随的就是水资源的过度开发利用，过度开采利用水资源进而就会产生一系列的环境问题，像生态系统平衡被破坏、水资源短缺、水污染加剧、洪水泛滥等。面对出现的这些现象，于是专家和学者们开始研究水资源，探讨水资源的适宜开发强度及其怎样合理配置利用水资源，将人类的活动控制在生态、资源与环境允许的范围内，以保障社会的可持续发展及水资源的可持续利用，禁止无限制的开发利用水资源，进而忽略环境与生态，这是当前一项艰巨而且刻不容缓的工作。

目前，我国对生态需水方面的研究尚处于起步阶段，还没有形成一套比较完整的计算方法和理论体系。基本上都是理论探讨方面的资料比较多，在创新成果和实例研究方面还相对较少。这就使得在重大工程实例研究时缺乏基本的水资源调度依据，进而无法合理分配生态水资源。当前我国的水资源问题比较严重，建国初期偏重社会经济发展，忽略了生态环境。因此我国的生态需水问题与其他国家相比，它更复杂和严重。我们有必要对于传统的水利工程设计、运行理念与方法进行反思，进一步吸收生态学方面的知识，探索水利工程与生态、环境相结合的技术体系，这不仅满足了经济与生态环境及社会的协调发展，也实现了与自然和谐相处目标的时代要求。

北运河水系属海河流域，位于永定河与潮白河水系之间，发源于北京太行山脉的西山与燕山山脉的军都山相会处，即昌平区境内的关沟。本文是在查阅了大量国内外文献资料的基础上，针对北运河当前的情况，对北运河水量管理进行生态影响评价，根据评价结果，结合河流当前的水质状况，提出了基于闸坝控制的保障北运河生态用水的水质水量联合调度模型。 研究内容主要为以下几个方面：

（1）通过阐述生态需水量的国内外发展状况及目前生态水利方面存在的不足，基于北运河实际情况，确定了本文的技术路线。

（2）对北运河基本情况介绍，针对当前的洪水管理体系及当前的生态环境问题，提出了北运河水量生态影响评价模型。通过评价，得出北运河处于“非常严重”级别，应该采取措施对其加以治理，以保护流域水资源的可持续利用和生态系统的健康发展。

展。

(3) 针对北运河生态水量评价结果, 结合近几年北运河水质状况, 提出了水量水质联合调度模型方案, 此方案结合多目标函数, 建立了水量水质联合优化调度模拟模型。以综合河道内外生态需水量缺失率最小、对防洪安全影响程度最小, 河道水环境最优为目标, 确定水量的时空分配方案, 采用最小费用最大流量原理实现水量水质模型与多目标优化调度模型的耦合。

关键词：生态需水，模糊层次，综合评价，水质水量，联合调度

ECOLOGICAL IMPACT ASSESSMENT AND JOINT REGULATION OF WATER QUALITY AND QUANTITY BASED NORTH CANAL

ABSTRACT

Water is a basic natural resource and strategic economic resource. At the same time, it represents the overall strength of the country. As the population and economy develop, humans exploit water resources unlimitedly. As a result, the balance of the ecosystem is seriously altered and destroyed. This brings a series of environmental problems. For example, destruction of ecosystem balance, water shortage, worsening water pollution, flooding and so on. Along with the occurrence of these phenomena, experts and scholars begin to study water resources and they discuss appropriate intensity of development based on water resources how to allocate it. This aim is to control ecology, resources and environment within permission. We can't exploit and utilize water resources unlimitedly. Then people ignore the environment and ecology. So protection of water resources and environment is a urgent task.

Now ecological water demand of the domestic research work is in its infancy, it is still the exploratory stage for theory, method and its application, calculations and theoretical system are still not mature. Generally speaking, qualitative description and repeated research are more, but theoretical research and innovations are less. Due to lack of theoretical methods and quantitative analysis for ecology demand water, this makes lack of basic water resources regulation in major engineering research and can not be reasonably allocated environmental water demand. At present, China's ecological water requirements is more complicated and more serious. Our country emphasis on social and economic development and ignore the ecological environment when the country is founding. Compared with other countries, China's ecological water requirements is more complicated and more serious. Along with the traditional water to the sustainable development of ecological water changed, we need to reflect on traditional water project design, operation concepts and methods. Based on this, we absorb further ecological knowledge and explore the link of water conservancy, ecology, environment. This not only meet economic and ecological environment and the harmonious development of society but also achieve the goal of the times for harmony.

North Canal in Haihe River Basin is located between the Yongding River and the Chaobai River, it rises Xishan Hills of Taihang Mountains in Beijing and Army Mountain of Yanshan Mountains within the ditch clearance Changping District. Based on the basis of a large number of literature data researched, the article use Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for assessing ecological water impact in North Canal aiming at the actual North Canal. according to the evaluation results and combined with the current water quality in rivers, the model is proposed for water quality and quantity joint regulation to ensure ecological protection based on dam control. Many aspects are included in it.

(1) By describing the development of ecological water demand at home and abroad, The technical line of this article is determined based on the actual situation in the North Canal.

(2) Basic information on the North Canal is described based the current flood management system and environmental problems, water ecological impact assessment model is proposed. By assessment, the result is very serious. So we should make measures to protect water resources and ecological environment's sustainable development.

(3) For the results of North Canal based ecological assessment and water quality in recent years, the model is proposed for water quality and quantity joint regulation. The spatial and temporal distribution of water problems is determined based the minimum ecological loss rate in (out) river, the minimum impact on the flood security, the optimal target for water environment. The process apply the minimum and maximum flow principle to achieve water quality-quantity model and multi-objective optimization model coupling.

KEY WORDS: ecological water demand, fuzzy, general evaluation, quality and quantity, joint regulation

独立完成与诚信声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的科研成果并撰写完成的。没有剽窃、抄袭等违反学术道德、学术规范的侵权行为。文中除已经标注引用的内容外，本学位论文中不包含其他人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北水利水电学院或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示了谢意。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

保证人（导师）签名：

签字日期：

签字日期：

学位论文版权使用授权书

本人完全了解华北水利水电学院有关保管、使用学位论文的规定。特授权华北水利水电学院可以将学位论文的全部或部分内容公开和编入有关数据库提供检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段复制、保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文原件或复印件和电子文档。（涉密的学位论文在解密后应遵守此规定）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

第1章 绪论

1.1 问题的提出

水是人类及其它一切赖以生存的生物不可缺少的宝贵的自然资源，它在地球上以不同的形态存在，在地球表面、土壤内、大气层中、生物体内都有其存在，由此构成了一个完整的水系统，即是水环境系统。水资源对人类社会的发展有有利的一面，但反过来人类行为又会对水环境系统产生负面的影响，特别是随着现代社会的快速发展，使得像干旱、洪水、水污染、地面沉降等问题日益突出。这些生态环境的严重破坏使人类的生存环境进一步恶化。因此我们在合理利用水资源的时候也要兼顾生态环境需水，这样才能更有利于人类水资源的可持续利用和社会的可持续发展。

在我国，随着社会经济的快速发展，人类的活动范围也在不断扩大。与此同时人类活动对周围生境的破坏、对河流的水质及水生生物的影响、对生态的影响也越来越严重，水资源开发利用与生态环境需水如何合理分配、和谐利用成为一个突出的问题。筑坝、筑梯、调水、河流渠道顺直化、断面规则化、水库运行等水利工程措施泛滥，扰乱了河流自然流态与水文循环过程，人类不当的行为致使河道干涸断流、水体污染、河床淤积堵塞、水土流失、河道内生态环境用水被挤占、生物多样性减少，导致生态环境这个天然系统被破坏，严重影响了社会经济发展和人民生活水平的提高。对生态需水的研究正是在这样的情形下被提上日程，并逐渐成为研究的热点问题之一。

人们容易看到水利工程在发电、灌溉、供水等方面所带来的直接效益，却难以看到水利工程在生态系统功能方面暗藏的负面影响，对长远利益造成的巨大损害。生态需水量与水利工程同时兼顾，是目前研究的热点问题之一，但由于在生态需水理论体系和创新方面的成果少，对于水资源联合调度就缺乏了成熟完备的理论依据，更无法准确合理分配生态环境需水量。因此，结合水利工程研究生态环境的需水规律、方法，是目前亟需解决的问题之一。

河流治理中出现的水利工程会对生态系统造成的负面影响，因此，在进行河流治理，修建水利设施时，要符合河流本身的自然原理。近几年来，为改善流域的水环境，恢复生态系统，水利部加强了流域的综合治理，通过利用水利工程进行调度，使一些流域趋于恶化的生态环境系统得到了恢复^[1]。于是人们逐步认识到水利工程除了满足人类的需求外，还要满足生物多样性的要求。因此，生态水利这个概念逐渐被提出，并成为当今研究的一个热点问题。本项目拟开展的北运河生态需水量评价及在此基础上提出的水质水量联合调度研究，就是基于水利工程的研究。它作为新兴学科，具有重要的理论意义和广泛的实际应用价值，为水利科学的发展提出了新的研究方向。

1.2 国内外研究状况

1.2.1 国内研究状况

我国是在 20 世纪 80 年代初开始对生态需水量这方面研究的,方子云^[2]在 1988 年就已经提到过生态用水这方面的内容,但并没有正式提出这一词语。直到 1993 年在“江河流域规划环境影响评价”这一标准中,才开始正式将生态用水这个词语作为其研究的内容被考虑进去^[3]。

在生态需水的计算上,每位专家和学者也都有不同。陈敏捷^[4]根据质量守恒定律从生态效应循环角度研究生态用水。后来随着工业化社会经济的发展,水污染问题变得越来越严重,1995 年汤奇成^[5]提出水资源中应该包括生态用水,刘昌明^[6~7]就是这方面的资深学者,他先后提出“生态水利”问题和“四大平衡”(水热平衡、水盐平衡、水沙平衡、水量平衡与供需平衡)与生态需水之间的相关关系,探讨与生态水之间的联系性。崔保山和杨志峰^[8]以典型湿地为例分析了生态环境需水,对它的存在特征、关键指标等方面进行了探讨。随着专家和学者的呼吁,政府部门也开始重视这一问题,水利部也逐步提出水资源配置中应该考虑生态需水的内容。

对于涉河设施与生态水量之间的研究,它是在提出生态需水量之后最近几年发展起来的新兴学科,从 2000 年以后,生态水利建设才开始出现在媒体面前。水利建设开始之后,生态水利才开始引起人们的关注。刘汉桂在报告“北京市水利现状及展望”中第一次提出了兴建水利工程保障了首都的经济繁荣和社会的发展,但同时对市民的生活和周围的生活环境也造成了一定的影响,针对这种现象他提出“跨流域调水”是以后工作的重点^[9]。2002 年,陈勋儒提出从水利工程系统自身建设方面入手,加强生态环境保护,注重生态用水,保障生态和谐平衡,实现由传统水利向生态水利的转变的问题^[10]。2002 年,水利部副部长索立生提出了闸坝与生态的问题。2007 年,陈庆伟,刘兰芬等^[11]提出筑坝对河流生态系统的影响并根据实例采取措施进行闸坝生态调度来减少对其生态的影响。2008 年刘玉年,夏军^[12]等提出采用生物指数法对淮河流域典型闸坝断面的生态系统现状进行了综合评价。之后,可素娟,薛云鹏等^[13]对黄河下游水资源短缺、缺少权威的河口生态需水指标体系等问题,提出并实施了黄河下游生态需水调度。2009 年,郭文献,夏自强^[14]等针对三峡水库的实际情况指出了三峡水库的调度目标,为三峡水库正式运行后制定合理的调度运行方案提供了依据。同年,张永勇,陈军锋^[15]等从流域尺度上探讨了闸坝库群对河流水质水量的影响,这为以后基于水利工程设施的水质水量联合调度提供了一定的基础依据。

1.2.2 国外研究状况

牛津大学 B. H. Seghrs 曾提出这样的口号“只要经济发展计划忽视生态原理,环境恶化的问题必将进行下去”^[16]。基于这种认识,国外对生态环境需水方面的研究始于 20 世纪 40 年代^[17],上世纪 70 年代又将生态水利问题纳入研究的范围。美国于 20 世纪

70 年代初就提出河道内基本流量的概念,在 20 世纪 80 年代初期全面调整对河流流域的开发利用和管理规划目标,初步形成生态环境需水研究,特别在河道内流量计算方面已形成了较完备的计算方法,只是当时对于“生态需水”这样的概念术语还没有正式提出^[18]。1962 年 H.T.Odum 提出将生态系统自组织行为 (self-organizing activities) 运用到工程之中,他首次提出“生态工程”(ecological engineering)一词,旨在促进生态学与工程学结合^[19]。英国、澳大利亚等其他国家对河流生态流量的研究是从 80 年代开始的。到 90 年代开始成为人们关注的热点^[20]。具体研究成果如下:

1995 年 Gleick^[21]提出了基本生态需水的概念(basic ecological waterrequirement)。他是以生态系统自身发展为平衡出发点,提出保障一定水量和质量的水给天然生态系统来保护生物多样性的科学生态用水。Rashin (1996)、Whipple 和 Whipple 等^[22~24]提出了类似的概念,即在水资源利用和规划管理中,要提供一定的水给生态环境,供人们娱乐、航运及景观使用。但没有明确提出生态用水及完善的理论计算方法。

近几年来,国际之家加强了生态与水利工程建设之间的合作,在非洲南部的津巴布韦,研究人员在 odzi 河的 osborne 水库观测站开展研究,运用 Desktop 模型,估算河流的生态需水量,为水库调度提供切实可行的指导^[25]。在澳大利亚,要求每个州和地区都要对“水依赖的生态系统”做出评价,并提出水的持续利用和恢复生态系统的分配方案。水的分配方案必须要考虑到 5-10 年之后可能出现的情况,通过一些数据来指导重新调整径流的季节变化特征以达到最佳的生态状态。在日本, Hirose shin-ichi^[26]、M. Zalewski^[27]等也对生态与生物之间的相互关系进行了研究,提出生态水利系统的概念并进行了概念外延,这是实现水资源管理及保护的一种新方法。

1.3 本文研究的主要内容

本课题以水资源优化调配的北运河河流为研究实例,北运河发源于北京市昌平区燕山南麓,西界永定河,东临潮白河,流域面积 6166 km²。北运河地处温带半干旱、半湿润季风气候区,多年平均年降水量 548mm。年内降水量 80%左右,主要集中在 6-9 月份,丰水年可达 800mm 以上,枯水年仅 270mm 左右。流域年平均气温在 0~14 之间;年平均相对湿度 50%~70%。但近几年由于人口增加、科技进步和经济社会的发展,北运河河流功能在不断发生变化,随着上游地区水资源的开发利用,北运河来水量日益减少乃至断流,航运功能全部消失,加上工业废水和城镇生活污水的排入,河流生态环境不断恶化。本文主要针对北运河的水利枢纽工程,从行洪排涝出发,优先保障工农业用水,进行北运河水量生态影响评价。在分析评价结果基础上进行水质水量联合生态调度,以满足北运河生态需水和正常功能的需要。

主要步骤如下:

- (1) 介绍河流生态需水问题提出的背景并对国内外的研究现状进行简单的综述。
- (2) 介绍研究区域的自然地理概况和主要水利工程,指出北运河现行洪水管理体制

系中存在的问题及缺水引起的生态环境问题。

(3) 从河流健康的概念出发, 确定北运河水量管理评价指标体系, 采用层次分析法确定指标权重, 评价过程中采用模糊层次综合评价模型进行评价。

(4) 通过对北运河水量管理进行评价, 提出了北运河需要进行调度才能缓解当前河流状况。在讨论北运河水资源量质特点及变化规律的基础上, 提出了保障生态用水的北运河水质水量联合调度模型, 并给出多目标求解方法。

(5) 结论与展望。针对北运河流域生态需水量在现有污染的情况下, 根据水量管理生态影响评价结果, 提出量质联合评价模型。对论文取得的主要成果进行总结, 并指出今后需要进一步加强研究的内容。

1.4 研究的技术路线

采用层次分析法 (AHP) 和模糊综合评价方法, 把水利工程对生态影响的主要因素进行分解, 通过每一层次各个不同影响元素的对比, 根据影响的重要性做出判断; 然后构造判断矩阵, 确定各个元素指标权重, 构建隶属函数; 进行水利工程的水量生态评价。

利用最小费用最大流量原理, 根据事先设定的优先规则, 建立水质水量联合调度的水资源网络系统模型, 并对模型进行模拟。

论文研究的技术路线如下图 1.1:

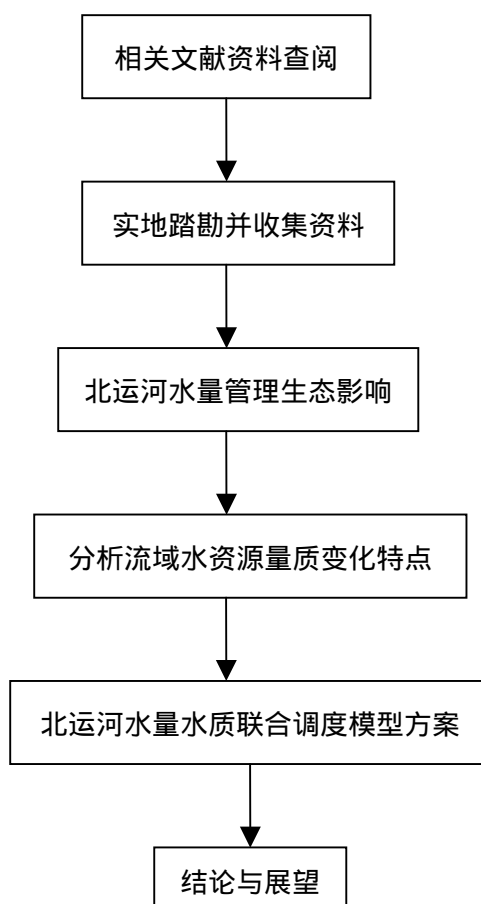


图 1.1 研究技术路线图

Fig.1.1 Technology figures of research

第 2 章 河流生态需水原理

2.1 生态需水量概念

目前,对于生态需水的概念、意蕴及延展相关的内容,国内外专家学者还没有形成共识,也就没有给予其统一明确的定义^[28]。甚至在名称上也大有不同,有人称之为生态需(用)水,也有人称之为环境需(用)水,还有学者合两者之名称之为生态环境需(用)水。Covich^[29]所说的生态需水是在保障和维持生态系统健康发展的条件下所需要的水量。Peter .H. Gleick^[30]则认为生态需水是供给天然环境一定数量和质量的水,目的是最大程度地改变天然生态系统,并保证物种多样性和生态的完整性。同时,他还提出了基本生态需水应是一个变量,可以在一定范围内变动,而非一个定值。钱正英^[31]等人从广义和狭义上分别定义了生态需水,认为广义的生态环境需水是指用于保证全球生物地理生态系统水分平衡的水,狭义的生态环境需水是指用于使生态环境不再继续变坏,在此基础上逐步改善生态环境需要消耗的水资源量。以上综述了众多学者对生态需水的定义,经分析,本文认为生态需水应具有水资源的性质(即水量、水质),有“量”无“质”,或者有“质”无“量”,二者只具其一,均不能称之为水资源^[32]。

因为生态需水具有水资源的性质,所以在考虑需水量多少的同时,还应该考虑在此水量下水质的好坏与否。确定生态需水量,首先应满足维持生态系统水分平衡所需要的水量,其次还要满足改善人类居住环境及其水环境所需要的水量。只有如此,生态系统才处于健康状态。另外,生态需水量具有临界值现象,当现实生态系统水质、水量处于某一临界值附近时,表明生态系统基本稳定健康;当现实生态系统所需要的水量大于这一值且水质好于这一临界值时,生态系统就向更好的、进步的方向演替,使生态系统处于良性循环发展状态;反之,生态系统就会恶化,最后干涸,可能导致沙漠化发生^[33]。

2.2 生态水利工程学

生态水利工程学^[34] (eco-hydraulic engineering) 是水利工程学中的一个新的分支和新发展起来的学科,是研究水利工程在满足人类社会需求,带给人们利益的同时,要兼顾水域生态系统健康与可持续性需求的原理与技术方法的工程学。发展生态水利工程的目的,是促进人类与自然的和谐相处,保证水资源的可持续利用。

2.3 河流健康内涵及主要标志

2.3.1 河流健康内涵

河流健康概念,源于人类对河流环境退化的关注,是人们要求从水质、生物、生态等众多角度科学评价河流生态系统状况、改进河流管理而提出的一种崭新的评价工具和技术手段。目前对河流健康还没有统一的概念,缺乏明确的定义,随着人们对河流健康理解的逐步加深,河流健康概念也正在逐步发展。

一般说来，健康的河流是指在河流基本生命功能存在的前提下，与其相应的人类社会利益和其它生物利益尽最大程度地取得和谐平衡的河流。河流的生态环境保护和服务功能，二者是辩证统一的，如果只重其一，都是片面的。目前大多数学者认为河流健康是指河流生态系统不仅能保持化学、物理及生物上的完整性，还能维持其惠及人类社会的各种功能。健康的河流，它应该是生态良好的河流，是造福人类的河流，不仅应维持其生态环境功能，而且能可持续的满足人类经济社会发展对其服务功能的需求。

有很多的因素影响河流健康，一般情况下，分为两大类即自然变化和人类活动，河流健康影响因子如图 2.1 所示。

自然变化对河流健康状况的影响因素，顾名思义是指自然界繁衍变化的过程中能够影响到河流健康的环境因子，如：温度、流速、营养、光强、光周期、溶解氧等，此外还包括呈时间性、规律性的变化因素。这些因子的变化所产生的影响，轻则导致水环境在组分与功能上的改变，重则可能引起河流生态系统功能的削弱甚至消失；人类活动对河流健康状况的影响因素是指人为干扰对河流健康状况的影响，如：工业废水和生活污水是改变河流生态系统的结构和功能的重要因素；某些河流的涉河设施(如防洪墙的建立、堤坝的设置等)不但改变河流结构还破坏了水生生态系统，并且引起生物生存环境的变化，从而降低了生物的多样性；此外，不合理的开发利用水资源及外来物种的入侵等外在自然条件的变化也在一定程度上对河流的健康状态造成了影响。

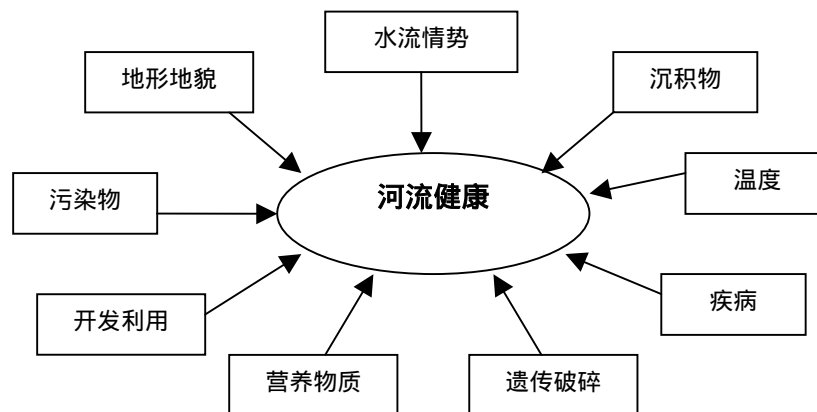


图2.1 河流健康状况的影响因素

Fig.2.1 The influential factors of rivers health

2.3.2 河流健康的主要标志

对于行洪排涝河道，防洪安全是最重要的，为防止洪涝灾害发生，必然需要河流干流、支流、蓄滞洪区、左右岸、上下游、分别承担一定的洪水风险，堤防上确保重点，兼顾一般。因此，“重要堤防不决口”是其主要标志。

水域功能的实现，要求控制排污总量，满足水质保护要求。因此，“水质污染不超标”是其主要标志。

一个生态系统要保持良好状态，不仅涉及到河流非生物环境、自然变化、洪枯水过程等多种因素，维持河流的近自然水流情势，主要表现为流量幅度、频率、历时、出现时间和变化率 5 个方面，这些变化过程影响着河流生物物种的分布和构成，决定了河流生物多样性和生态系统完整性。因此，“维持近自然水流情势”是其主要标志。

河流区域内修建的大量拦河闸，在防洪同时也要满足两岸灌区的灌溉需要，因此，“灌溉供水有保障”也是其主要标志。

2.4 保障生态需水的水量水质联合调度的概念及目的

2.4.1 节点的概念

节点是水资源系统中最基本的计算单元，在计算中是将河流系统和水利工程等概化为节点。

2.4.2 水资源网络系统

水资源系统是由分流节点、汇水节点、水库节点、各类取水节点和河网连线组成的复杂网络系统。将河流系统和水利工程等概化为节点，节点之间的连线是河流的一个河段或引水渠道，将各类节点用连线组成网络，把一个实际的流域、区域系统概化为由节点和相互关联的连线组成的网络系统，以此反映流域实际水资源系统的主要特征及各组成部分之间的联系，这就构成了水资源网络系统。

2.4.3 研究保障生态需水的河流水质联合调度的目的

自然系统中水的数量与质量受到了社会经济系统中水循环的影响而发生改变，这种改变会引发诸多生态与环境问题，由此认为，生态需水的本质就是质与量的和谐统一。若二者只满足其一，就不能实现保护生态系统需水的目的。只有将生态需水的质与量进行联合调度^[35~39]，才能真实科学的反映出河流流域的生态需水量，从而满足生态系统的需水要求。

使人类全面了解水资源并合理高效开发利用水资源是研究河流生态需水的目的之一。在实现此目的的同时要考虑河流流域的生态需水量，河流流域现有的水量是否满足当前生态系统和河流健康发展的需要，以及其在现状水质条件下能否适宜当前生态系统和自然环境健康发展，这些都要考虑，是因为研究河流生态需水的意义是使河流的自然功能和社会功能有机统一，和谐发展。为此，我们要意识到生态需水的重要性，重视生态需水、重视生态系统和环境的健康发展，不能只考虑社会经济发展的需要而过度开发利用水资源及污染水资源，以致造成流域内生态系统恶性循环，生态环境严重破坏，最终影响人类社会的健康和阻碍社会经济的发展。

第 3 章 研究区域基本概况

3.1 自然地理

3.1.1 地形地貌

北运河发源于北京市昌平区燕山南麓，西界永定河，东临潮白河，北京市通州区北关闸以上称温榆河，北关闸以下始称北运河。河流自西北向东南先后经过北京市大部分地区、河北省廊坊市香河县和天津市武清区、北辰区和红桥区，在北京境内先后穿行昌平、海淀、顺义、朝阳、至通州区后流出，再经过河北廊坊和天津市，在屈家店处与永定河相交汇合，向北注入海河。河流流经途中，有通惠河、凉水河、凤港减河等平原河流汇入，流域面积为 6166 km^2 。其中山区面积 952 km^2 、占 16%，平原面积 5214 km^2 、占 84%。

北运河流经北京北部和东部地区，在北京境内北运河干流总长 90.3 km ，流域面积 4293 km^2 。北运河是 7 世纪初隋朝开凿的南北大运河的最北段。北京城近郊区的清河、凉水河等河流差不多都注入北运河，它是北京最主要的排水河道。北运河是我国南北大运河的北段，自北京通县至天津最后汇入海河，流域总长度 186 公里，系元朝利用白河下游河道修竣而成。北运河河身狭窄，洪水期宣泄不畅，故下游多以减流分洪、洼淀放淤为主。

3.1.2 水文气象

北运河地处温带半干旱、半湿润季风气候区，多年平均年降水量 548 mm ，是我国东部沿海降水量最少的地区之一。由于气候和地形等因素的影响，降水的时空分布呈明显的地带性、季节性和年际间的差异性。降水量年内分配很不均匀，80%左右集中在 6~9 月份，且往往集中在几次强降雨过程；降水的年际变化很大，丰水年可达 800 mm 以上，枯水年仅 270 mm 左右。由于受地形地貌及纬度高低的影响，地区间气候差异很大，流域年平均气温在 $0 \sim 14$ 之间；年平均相对湿度 $50\% \sim 70\%$ ；年平均无霜期 $150 \sim 220$ 天；年平均日照时数 $2500 \sim 3000$ 小时。一年四季分明，寒暖适中，适宜许多动植物的自然生长和繁殖。

北运河上游山区建有十三陵等多座中小型水库。多年平均(1956~2000 年系列)径流量为 4.81 亿 m^3 ，其多年平均径流量包括平原和山区径流量：平原年均径流量为 3.52 亿 m^3 、山区为 1.29 亿 m^3 。多年平均出境水量(含废污水)为 9.03 亿 m^3 ，出境水量主要包括城区涝水和废污水等。

3.1.3 流域水系概况

北运河属于海河流域北部的北三河水系，界于永定河与潮白河之间，是京杭大运河北端的一段。通县以上称温榆河，以下称北运河。温榆河上游有北沙河、东沙河、南沙

河,以下主要有支流清河、坝河等,以下又纳凉水河、凤港减河、龙凤新河等平原河道,至天津屈家店与永定河汇流,后经屈家店节制闸至大红桥同子牙河汇合后入海河。北运河河流全长 238 km,流域面积 6166km²。流域长 160 km,平均宽度 38 km,流域平均比降 6.23‰,河道平均比降 4.64‰。山区面积 952 km²,多年平均年径流量 1.49 亿 m³,最大 6.41 亿 m³ (1956 年),最小 0.069 亿 m³ (1965 年)。北运河水系简图见图 3.1。

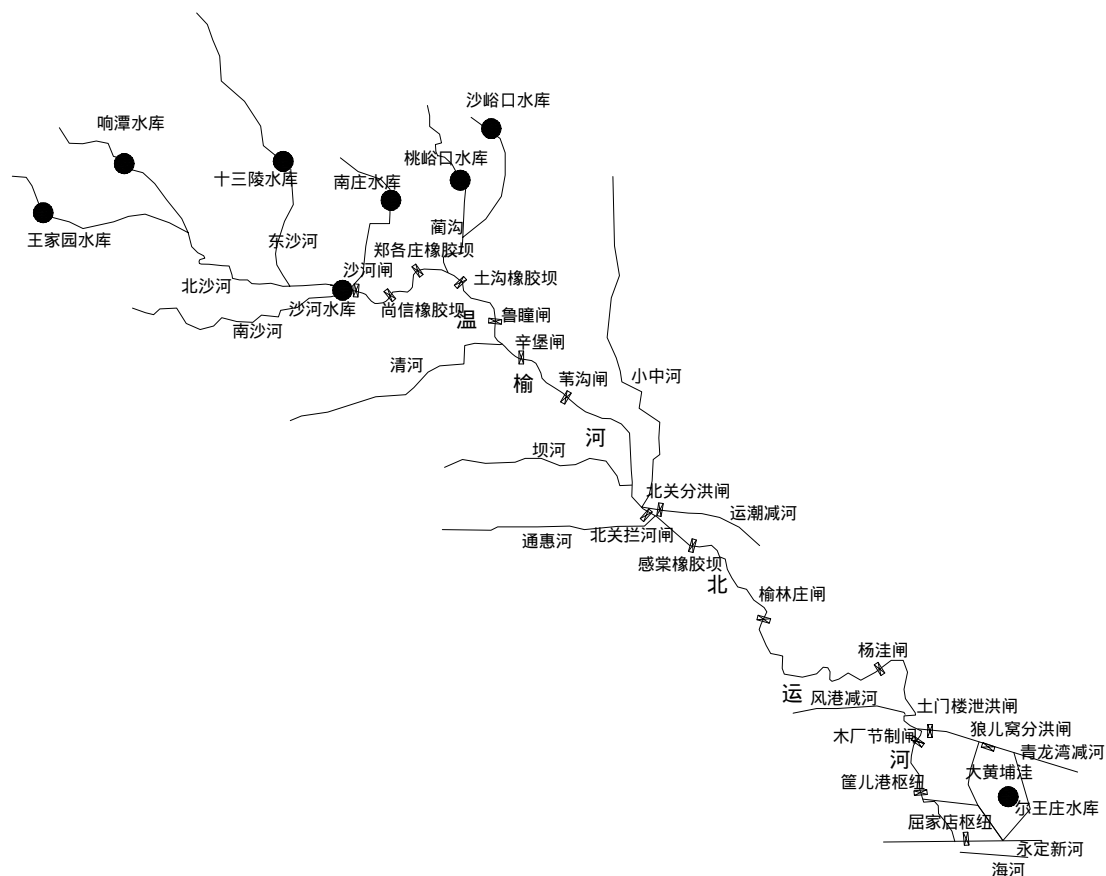


图 3.1 北运河水系简图

Fig.3.1 River diagram of North Canal

北运河大概包括支流 130 条左右，其中一级支流 20 条，二、三级支流 110 余条。总流域面积为 6166km²，北运河中沙河闸以上流域长 1110km²，流域面积 2478km²，北关闸至河北香河县土门楼拦河闸，流域控制面积 3095km²。

上游支流南沙河、北沙河和东沙河汇合于沙河镇后称温榆河。沙河闸下温榆河沿途汇入有蔺沟河、清河、坝河、小中河等支流。1963 年在通州镇北关开挖了运潮减河，分泄上游温榆河的部分洪水入潮白河；北关闸以下沿途纳入通惠河、凉水河、凤港减河等支流，至河北省香河县土门楼闸以上又开辟青龙湾减河，北运河洪水由此入潮白新河，并以大黄蒲洼为滞洪区，以减少潮白新河的洪水压力。土门楼闸以下纳龙凤新河，在天津市武清县的筐儿港入北京排污河；筐儿港至屈家店闸段流量较小，屈家店闸上纳永定河洪水入永定新河，屈家店闸下北运河主要承泄部分永定河洪水，以下至天津市区红桥纳子牙河，随后至金钢桥入海河，最后由海河闸入渤海。

北运河穿越北京、天津和河北廊坊地区，是海河流域重要的行洪排涝河道，在历史上是连通着京津冀的社会经济、文化发展的纽带，且在航运、供给水、景观建设、防洪、排涝等方面发挥着巨大的作用。新中国成立后，随着人口增加、科技进步和经济社会发展，国家开始偏重于经济的发展和社会的进步，失于生态环境的保护，造成上游水资源的过度开发利用，使北运河来水量日益减少甚至出现断流现象，加之工业发展产生的工业废水和城镇生活污水的大量排入，使北运河航运功能全部消失，河流生态环境也不断恶化，河流逐渐变成纳污河道，不复古观。

3.1.4 社会经济

在北京市五大水系中，北运河是唯一的一条发源于北京境内的河流，流域内包括 12 个区，40 多个乡镇，1600 多个行政村。总人口达到 963.5 万，占据了整个北京市人口的 70%以上，GDP 占全市的 80%以上。该流域是北京市重要的经济发展基地，对北京市发展起着举足轻重的作用。此外，北运河流域粮食、蔬菜、水果等作物的总种植面积 80 多万亩，年均产量近 2800 万吨，是保障北京市粮、菜、水果供应的重要基地，是北京市农业体系的重要支柱，对全市的繁荣发展扮演着重要的角色。

北运河流域是北京市人口集中、产业聚集、城市化程度最高的区域，对北京城市经济和社会发展起着举足轻重的作用。根据《北京城市总体规划（2004 年～2020 年）》，北京市的城市体系中绝大部分区域属北运河流域。北运河水系主要区县社会经济基本情况见表 3.1。

表 3.1 北运河流域主要区县社会经济基本情况（北京段）

Tab.3.1 Basic socio-economic situation of the main district of North Canal Basin (Beijing)

行政区	土地面积 (km ²)	总人口 (万人)	城市人口 (万人)	农业人口 (万人)	人口密度 (人/km ²)	GDP (亿元)
中心城及 海淀山区	1232	765.5	754	11.5	7332	3116
昌平区	1273.8	78	39	39	578	439
顺义区	412.6	25	8	17	648	506
通州区	828.4	55	25	30	610	188
大兴区	481	40	16	24	381	230
合计	4227.8	963.5	842	121.5	2310	4478

注：表中为 2005 年北京段数据。

香河县位于北京与天津之间，隶属河北省廊坊市，有“京畿明珠”之称。香河县总人口大约 30.5 万人，包括 9 个乡镇，300 多个行政村。区域总面积 458km²。该县的经济的发展是以农业发展为主，力争发展绿色农业和优质高效农业，现在正不断努力打造京津农副产品供给线。工业以传统工业为主，像金属制造业、包装业等。近几年来，发展了一批新兴产业，像服装纺织业和汽车配件业。由于该县具备了京津冀都市圈的有利优势，实施“工业强县、特色立县、开放活县”战略，使该县的经济的发展在廊坊市处于领先地位。

武清区位于京津两大城市之间，素有“京津走廊”之称，区位、交通优势得天独厚。武清区包括 29 个乡镇，741 个行政村，面积 1570 km²。2007 年，全区人口 82.49 万人，全区国内生产总值（GDP）156.26 亿元。武清为全国首届农林牧渔总产值百强县。近期加快实施城市化为主导的率先发展战略，建成京津之间最具实力和竞争力地区，开发区规划面积 24.8 km²，现有企业 5200 余家，建起了新型建材、电子等一批新兴行业，创出了一批名优产品。

3.2 主要水利工程

水利工程体系主要包括水库、大坝、堤防、蓄滞洪区、分洪道、溢流堰、水闸、泵站等。由于北运河流域洪涝灾害频繁发生，从 20 世纪 50 年代起，先后在上游山区修建中小型水库 12 座，控制山区流域面积的 79%；后来又对北运河进行了综合治理，沿河修建近 10 余座大型拦河闸，大大增加了年蓄水量，达到 1.2 亿 m³/a，可灌溉农田 54 万亩，减少淹涝面积 100 余万亩。为解决洪水威胁问题，同时为减轻北运河及支流通惠河、凉水河和下游的防洪负担，60 年代初在北关拦河闸的东侧修建了分洪闸及 11.5km 长的运潮减河，向潮白河分洪，其最大泄洪量达 900m³/s。为确保安全，1992 年对北运河堤防等进行了加固，使北运河防洪标准达到 20 年一遇洪水设计，50 年一遇洪水校核。

3.2.1 现有主要水库工程

（1）十三陵水库，其总库容 8100 万立方米，防洪库容 5150 万立方米，兴利库容 3336 万立方米，死库容 764 万立方米，汛限水位 93.0 米，溢洪道最大泄量 1091 立方米/秒，输水洞泄量 28.5 立方米/秒。

（2）桃峪口水库，水库总库容 1008 万立方米，防洪库容 548 万立方米，兴利库容 744 万立方米，死库容 151 万立方米，汛限水位 67.70 米，溢洪道最大泄量 682 立方米/秒，输水洞泄量 4.8 立方米/秒。

3.2.2 北运河干、支流主要闸坝工程

（1）北关分洪枢纽，北关分洪枢纽包括拦河闸及分洪闸，当枢纽上游温榆河遇 10 年一遇洪水时水位 21.23 米（流量 1010 立方米/秒），拦河闸下泄 510 立方米/秒，北运河分洪闸下泄 500 立方米/秒，经运潮减河入潮白河，遇 20 年一遇洪水时水位 22.40 米（流量 1450 立方米/秒），拦河闸下泄 850 立方米/秒，分洪闸下泄 600 立方米/秒；遇 50 年一遇洪水时水位 23.13 米（流量 2055 立方米/秒），拦河闸下泄 1155 立方米/秒，分洪闸下泄 900 立方米/秒。

（2）榆林庄、杨洼闸控制运用，北关枢纽以下的榆林庄闸、杨洼闸，汛期以泄洪排涝为主，大汛期间开闸泄洪。入汛后，如有灌溉需要，且上游无洪水发生时，可适当控制闸上水位；若流域内有大雨发生洪水时，两闸全部提起，洪水由主河道下泄。

（3）温榆河各闸的控制运用：a. 马坊及曹碾橡胶坝：入汛后如有灌溉要求，可适当

蓄水，当坝高控制在 30 米、27.5 米以下，到 7 月 1 日必须落坝待洪。b.鲁疃、辛堡、苇沟闸由小闸调节，如果流域内遇大雨成大水时，自上而下拉倒中孔闸泄洪，其它闸门待流量增加自行翻倒，鲁疃、苇沟两座翻板闸第一次洪水过后，将所有闸门拉倒锁定待洪。

(4) 支流各闸坝控制运用，北运河支流各闸坝（蔺沟河、清河、坝河、小中河、通惠河、凉水河等）进入汛期后，当上游发生洪水时，水位上涨迅速或开闸泄洪时，应提前通知下游各闸坝和北运河防汛办公室，做到合理控制，下泄安全。

3.3 水资源开发利用情况

由于目前干旱缺水，北运河上游的十三陵水库、桃峪口水库入库水量特别少，桃峪口水库已成干库，十三陵水库需从外流域调水，水库蓄水量主要是用于农业灌溉。北运河河道内现状来水主要为城市污水和污水处理厂的废水及雨季涝水，因为水质极差的原因，所以很少被利用。

总体上来说，北运河以安全下泄上游洪水、排除城区和农田涝水、下游农业灌溉，以及中下游的景观娱乐等为其主要功能。

3.4 北运河现行洪水管理体系状况

3.4.1 水利工程老化

北运河流域上的涉河设施，大都建于上世纪 60、70 年代左右，这些涉河设施现在看来设计标准较低，况且经过长时间的运行，许多水闸、坝已经老化，需加固整改或拆除重建。北运河流域的鲁疃闸、辛堡闸、苇沟闸、榆林庄闸、杨洼闸均被鉴定为 IV 类病险闸，都已经失去了拦蓄雨洪水和进行洪水调度的能力；北关分洪洪枢纽为 类病险闸，它的运行能力也大大降低；运潮减河失去原有蓄水能力。况且，随着 30 多年来河道一直进行洪水、污水的交错调度，从未进行过河道大规模的治理，导致河道内淤积严重，甚至有的河段已经形成“地上河”，造成河道的蓄水能力大大下降，蓄水量和行洪能力消减严重。

从北运河现在的情况来看，其水利工程严重老化、水利基础设施建设滞后失效，水资源配置能力和抗御水旱灾害能力低下，无法为北运河洪水资源化利用提供必要的工程保障。

3.4.2 管理体制不顺

北运河河道受北京市水务局直属的北运河管理处管辖，但目前北运河存在管理体制不清晰、分块管理等问题，这就使得北运河不利于集中式控制，即合理分配和调度水资源。

在北运河上的水利工程管理方面，北运河流经北京市内的昌平、海淀、顺义、朝阳、通州区，途中许多河段和涉河建筑物隶属于当地水务部门管辖，像沙河闸、尚信橡胶坝等是由昌平区防汛抗旱分指挥部办公室负责调度；兴各庄、于辛庄橡胶坝则由通州区防

汛抗旱分指挥部办公室负责调度；类似的还有其他闸坝。当出现大洪水时，则需要整个流域进行洪水调度达成一致意见，这就影响了实时防洪调度的决策，延误了时间。

3.4.3 河道堤防存在隐患

北运河流域多数河道堤防为沙土填筑，抗冲刷能力和基础防渗较差，堤身质量差，内部隐患多，主槽不稳定，多处为 S 形河道，受环向水流作用，凹岸冲刷，凸岸淤积，日渐形成险工地段；此外，地下水严重超采，引发大范围地面沉降，致使河道泄洪能力大幅度的降低。此外，由于泥沙淤积造成河床不断抬高，因此加重了洪水威胁。

3.5 北运河引起的生态环境问题

3.5.1 河道断流

北运河位于海河流域，该流域山区大型水库控制山区面积 85%。遇到干旱年份，山区径流绝大部分被水库拦蓄，水库下游几乎全年无水。对北运河中下游河道进行调查，结果表明，流域内常年有水河段仅占整个河段的 16%，常年断流天数超过 300 天的占整个河段达 45%左右。大清河、子牙河近 20 年来年年断流，多年平均断流天数基本都在 300 天之上；漳河、漳卫新河年断流 280 天以上；京杭大运河（南运河段）差不多常年都是干涸无水，只有到引黄河水时才会见到水。

3.5.2 地质环境恶化

在大力开发地表水资源的同时，地下水开采量也在不断的增加。1964 年开始大规模打井，1972 年大旱，全流域掀起更大规模的打井高潮。至 1979 年，流域机井数量猛增到 60 万眼，10 年间增加了 2 倍。目前，全流域共有各类机井 120 万眼，平均每平方公里 8.2 眼。目前，地下水漏斗成片，地下水资源面临枯竭，引发了区域性地面沉降、地面变形、塌陷、及地表裂缝等地质灾害、海水入侵、淡水咸化、咸淡水界面下移等一系列地质环境问题。

3.5.3 水污染加剧

随着近代交通运输业的迅速发展，同时伴随着上游来水量的逐渐减少，河道经常出现断流、干涸，沿河又修建了大型拦河闸和橡胶坝，航运功能逐渐下降，逐步沦为北京市主要泄洪和排污河道，水污染严重，河流生态系统遭到破坏。

北运河是北京市的主要排水河道，每年都会有大量的水资源排出，是目前北京市境内特别少见的常年有水河流之一。上世纪六七十年代，北运河的出境水量中，清、污水相当，然而，自八十年代以来，呈现了清水减少、污水增加的趋势。时至今日，河水浑浊、发黑、发臭，北运河河道内水质基本都为劣 Ⅴ 类水，这已经严重威胁了河流生态系统的健康和周围居民的生活，不断造成河流生态环境退化、水中基本无生物生存，且对地下水也造成了严重的威胁，制约着当地社会经济的可持续发展。

综上所述，北运河水资源面临十分严重的局面，即不能满足生态需水量的要求，也

不能满足水功能区水质达标率的需求。所以，开展北运河生态影响评价，定量评价其存在的状况，对北运河流域的下一步的规划实施具有重要的作用和现实意义。

第 4 章 北运河水量管理生态影响评价

4.1 北运河水量管理生态影响评价指标体系

4.1.1 指标体系选取原则

从行洪排涝河道水量生态影响以及北运河河流健康内涵出发,明确水量管理生态影响评价指标体系应能够反映河流水文条件、水质条件、栖息地质量和生物状况,反映系统总体的生态影响现状以及变化趋势。因此,在借鉴国内外生态影响评价研究的基础上,以科学、实用、简明的选取原则,具体考虑以下方面:

(1) 全面性和概括性相结合。河流生态系统是一个复杂的系统,其水量管理生态影响状况受很多因素的影响。在研究和评价过程中,应全面反映河流系统状况,但同时又要求指标简洁、精练,尽量避免指标之间的信息重叠性。

(2) 系统性和层次性相结合。所建立的指标要从整体上对整个系统具有重要影响,且在每个目标层次上要具有条理化。指标体系层次要简单、清晰、明朗的表达出来,简单明了的展示出水量生态影响的状况。

(3) 可比性与灵活性相结合。水量管理生态影响评价是一项长期工作,所获取的数据和资料无论在时间上还是空间上,都应具有可比性。因此,指标的选取和计算尽量做到统一和规范,指标体系能在统一的基础上比较各个河流的健康状况。同时,指标的选取还应具备灵活性,根据各河流的具体情况进行相应调整。

(4) 可行性与可操作性相结合。所建立的指标大多数情况下在理论上反映很好,但应用到实例中却不强。所以,在对指标进行选择时,不能把与指标相关的资料信息条件脱离开。且指标的物理意义必须明确,数据易采集,并且具有各自独立的内涵。

(5) 连续性和动态性。指标体系能够在一个较长的时期内保持其连续性,有效反映不同发展阶段对健康河流的要求,并且能够根据不同时期经济社会发展对评价指标体系进行修改。

4.1.2 评价指标体系的选取方法

对于评价指标的选取过程中既要全面考虑上述原则,又要考虑到各项原则的特殊性以及目前研究认识上的差异性,根据实际情况确定生态影响状况。指标选取结合采用了频度统计法、理论分析法和专家咨询法。结合国内外相关论著,对采用频率高的指标进行分析、筛选、提炼和归纳,提出关键指标,进而采用理论分析法对关键指标进行分析,根据每个指标的代表性、综合性和系统性,对指标再进行取舍,最后采用专家咨询法,综合专家意见,调整完善指标体系结构。

理论分析法主要应用的理论知识是与水量管理生态影响评价相关的学科知识,如:生态水文学、环境学等相关理论,对指标体系进行综合比较分析,选择密切相关、针对

性强的指标。

4.1.1.3 评价指标体系结构

针对前面描述的河流健康的概念及其基本理论，结合国内外最新研究成果，并咨询相关国内外资深专家、学者的基础上，结合北运河研究区域的实际情况，将北运河水量管理生态影响评价指标体系划分为三个层次，即目标层、准则层和指标层。目标层（A）为单一目标—水量管理生态影响指数，准则层（B）包括 5 个子目标，指标层（C）共有 15 个，全面反映水量管理生态影响的各个方面，其构成见表 4.1。

（1）目标层：目标层是对北运河水量管理生态影响评价指标体系的高度概括，用以反映水量管理生态影响程度，是根据准则层和指标层聚合的结果。

（2）准则层：准则层从不同侧面反映水量管理生态影响的河流状况，包括河流水文状况、河流水环境状况、河流形态结构状况、河岸带状况和河流水生物状况 5 个方面，较为全面的涵盖了水量管理对河流生态影响的特性。

（3）指标层：指标层是在准则层下选取若干指标所组成，在北运河流域上，所选取的指标以定量为主，定性为辅，容易得到数据的指标通过对该指标进行数据监测、采集等方法进行量化，不能量化的指标则通过定性的描述来对其进行反映，指标层基本包括 15 个指标，见下表 4.1。

表4.1 水量管理生态影响评价指标体系

Tab.4.1 Water management ecological impact assessment of Index system

目标层（A）	准则层（B）	指标层（C）
水量管理生态影响指数	河流水文状况	年均水量变化率
		相对断流天数
	河流水环境状况	河流生态需水保证率
		水功能区水质达标率
		水土流失比例
		水体自净率
	河流形态结构状况	河床、河岸稳定性
		纵向连续性
		横向连通性
		垂向透水性
	河岸带状况	河岸带植被覆盖度
		景观多样性指数
		水域湿地状况
	河流水生物状况	水生生物存活状况
		生物多样性指数

4.1.1.4 评价指标说明

（1）年均水量变化率

该指标反映了河流水资源开发和利用对天然河流的改变程度和影响范围，间接反映

了人类活动对河流生态系统的影响，其指标可以表达为：现状年均水量/历时年均水量 $\times 100\%$ 。

(2) 相对断流天数

该指标主要反映人类活动对河流的影响，使其断流、干涸情况发生的变化，其指标表达为：现状断流天数/历时断流天数 $\times 100\%$ 。

(3) 河流生态需水保证率

河流生态需水反映的是维持河流基本功能所需要的最小流量，其计算公式可采用：
河流生态需水保证率 = 实际河道内生态需水/理论河道内生态需水 $\times 100\%$ 。

(4) 水功能区水质达标率

水功能区水质达标率指某水功能区水质达到水质目标的个数占水功能区总数的比例，其反映了河流水质满足水资源开发利用和生态环境保护需要的状况。其表达式为：
水质达标河流长度/评价河长总长 $\times 100\%$ 。

(5) 水土流失比例

其指标反映人类活动对水土流失影响程度，表达式为：水土流失面积/土地面积 $\times 100\%$ 。

(6) 水体自净率

与水质达标率意义相同，其指标可以表示为：满足水功能要求的水面面积/总水面面积 $\times 100\%$ 。

(7) 河床、河岸稳定性

反映河床、河岸在水量较大时的冲刷程度，以及分流、分沙的变化程度。

(8) 纵向连续性

指在河流系统内生态要素在空间结构上的纵向联系，也反映人类活动如河流上修建拦河闸工程对河流系统影响，可用每百公里闸坝个数来表示。

(9) 横向连通性

表示河流横向连通的程度，反映开发建设对河流横向连通的干扰状况，其表达式为：具有连通性的水面个数占统计的水面总数之比。

(10) 垂向透水性

主要表征地表水同地下水的连通程度，表达式为：河道透水面积占河道总面积之比。

(11) 河岸带植被覆盖度

可以表示为：植被超过一定宽度的河岸与总河岸线长度之比。

(12) 景观多样性指数

反映了河岸带范围内景观不同组分状况，其表达式为：景观内不同生态系统类型总数/景观最大可能丰富度。

(13) 水域湿地状况

根据水域湿地状况分为一级、二级、三级、四级和五级，分别表示水域湿地优、良、中、差和很差 5 个等级。

(14) 水生生物存活状况

指在评价区域内，水生生物在河流中生存繁衍，物种存活质量与数量的状况。

(15) 生物多样性指数

指评价区域内生物物种的种类及组成，反映生物物种的丰富程度。可以采用 Shannon - wiener 多样性指数进行全面衡量。该指标既可以说明种数，又可以表征组成，

$$H_b = -\sum_{i=1}^S (p_i) \times \log_2(p_i) , \text{ 其中 } p_i \text{ 代表第 } i \text{ 种个体数 } n_i \text{ 占总个体数 } N \text{ 的比例。}$$

4.2 水量管理生态影响评价模型

4.2.1 评价的技术路线

北运河水量管理生态影响评价受多种因素的影响和制约，具有层次性和动态性的特点，涉及的评价指标较多，只有对这些评价指标的结果进行整合，才能合理给出影响评价结果。

对于水量管理生态影响评价，首先要进行资料收集和调查研究，收集有关研究成果、统计资料和观测数据。在收集资料基础上，对评价对象进行分析，建立包括目标层、准则层及指标层的水量管理生态影响指标体系。根据建立的指标体系，采用由下至上的评价方式，从指标层开始逐层计算，先评价各分层的指标状况，在此基础上对水量管理生态影响的总目标层进行评价。对各层的评价对象进行评价，包括评价方法的选取、评价指标的量化和标准化、指标权重的确定和指标评价值的合成。最后根据评价过程中得到的信息，对生态影响评价进行整体评价，为北运河河流管理提供决策依据。

4.2.2 评价步骤

为了克服指标权重确定的主观性与大量指标同时赋权的混乱，提高评价的简便性和准确性，通过层次分析法确定权重，采用模糊层次综合评价模型进行评价，具体评价模型步骤如下：

(1) 建立评价指标集 $I = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ，分别代表评价指标的集合， n 代表各指标的数目。

$$(2) \text{ 建立评价标准 } H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nm} \end{bmatrix} , \text{ 指水量管理生态影响程度分级，分别}$$

代表 m 个级别。

(3) 指标权重确定。采用层次分析法确定各要素及类别权重，与各具体指标的层次总排序权重集 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

(4) 建立单因素评判矩阵 R 。根据各指标特征, 拟定各具体指标的隶属函数, 由隶属函数计算出准则层包含各类指标的评判矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

隶属函数采用梯形隶属函数, 等级评价标准取值范围的平均值。隶属度的计算分为正向指标和负向指标。

正向指标的隶属函数为:

$$\begin{cases} r_{ij} = 1 & (0 < x_i < h_{ij}) \\ r_{ij} = \frac{h_{ij+1} - x_i}{h_{ij+1} - h_{ij}} & (h_{ij+1} < x_i < h_{ij}) \\ r_{ij+1} = \frac{x_i - h_{ij}}{h_{ij+1} - h_{ij}} & (h_{ij+1} < x_i < h_{ij}) \\ r_{ij} = 1 & (x_i > h_{ij}) \end{cases} \quad (4-2)$$

负向指标的隶属函数为:

$$\begin{cases} r_{ij} = 1 & (x_i > h_{ij}) \\ r_{ij} = \frac{h_{ij+1} - x_i}{h_{ij+1} - h_{ij}} & (h_{ij} < x_i < h_{ij+1}) \\ r_{ij+1} = \frac{x_i - h_{ij}}{h_{ij+1} - h_{ij}} & (h_{ij} < x_i < h_{ij+1}) \\ r_{ij} = 1 & (0 < x_i < h_{ij}) \end{cases} \quad (4-3)$$

(5) 进行模糊层次综合评判。采用模糊合成加权线性变换完成模糊合成, 即:

$$B = W \bullet R = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) \begin{bmatrix} r_{11}, \cdots, r_{15} \\ \vdots, \ddots, \vdots \\ r_{n1}, \cdots, r_{n5} \end{bmatrix} = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5) \quad (4-4)$$

根据以上公式可以计算出生态影响评价 5 个影响程度的隶属度矩阵, 并对结果进行归一化处理, 从而评价水量管理生态影响程度。

4.2.3 权重的确定方法

目前, 对于计算多指标综合评价的方法有许多, 像德尔菲法、层次分析法 (AHP)、熵值确定法、均方差法、主成分分析法等等。本文拟采用层次分析法确定评价指标的权重, 其步骤如下:

(1) 分析系统中各因素之间关系, 建立系统的递阶层次结构。

(2)对同一层次各元素关于上一层次中某一准则(或要素)的重要性进行两两比较,构造判断矩阵。在咨询有关专家的基础上,运用 1~9 标度评分方法对其重要性进行评判。评分方法见表 4.2。

表 4.2 判断矩阵标度及含义

Tab.4.2 The scale and meaning of judgement matrix

标 度	含 义
1	表示两个因素相比,同等重要
3	表示两因素相比较,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两因素相比较,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两因素相比较,一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两因素相比较,一个因素比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	介于以上两相邻判断值的中间值
倒数	指标 B_i 与 B_j 相比得判断 λ_{ij} , 则 B_j 与 B_i 相比得判断 $\lambda_{ji} = 1/\lambda_{ij}$

(3)由判断矩阵计算层次单排序权重值,并进行一致性检验。

根据判断矩阵,计算出其最大特征值及其对应的特征向量。判断矩阵的特征向量即为各层次中相应元素对于上一层次某个元素相对重要性权值,即层次单排序。计算特征向量的方法采用乘积方根法(几何平均值法)。

1) 在判断矩阵 A 中,先按行将各元素连乘然后再开 n 次方,就得到了每行元素的几何平均值。

$$b_i = \left(\prod_{j=1}^n \delta_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4-5)$$

2) 再把 $b_i (i=1, 2, \dots, n)$ 归一化,即求得最大特征值所对应的特征向量:

$$w_j = \frac{b_j}{\sum_{k=1}^n b_k} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4-6)$$

3) 由 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 则判断矩阵 A 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 满足: $AW = \lambda_{\max} W$ 。即得到:

$$\sum_{j=1}^n \delta_{ij} w_j = \lambda_{\max} w_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4-7)$$

4) 计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n \delta_{ij} w_j}{w_i} \quad (4-8)$$

采用随机一致性比率 $C.R.$ 即 $C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$ 衡量判断矩阵的一致性。其中:一致性指标

$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, 平均随机一致性指标 $R.I.$ 在样本容量为 1000 下的均值见表 4.3。

表 4.3 指标 $R.I.$ 值
Tab.4.3 The $R.I.$ value of the index

n	2	3	4	5	6	7	8
$R.I.$	0	0.51	0.89	1.12	1.25	1.35	1.42
n	9	10	11	12	13	14	15
$R.I.$	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

衡量判断矩阵是否一致性的准则为 $C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} < 0.10$, 即当 $C.R. < 0.10$ 时 , 判断矩阵

有可接受的不一致性 ; 判断结果是令人满意的 ; 否则 , 则认为初步建立的判断矩阵是不能令人满意的 , 需要重新赋值 , 反复验算修正 , 指导达到上述要求通过为止。

(4)对层次单排序权重值进行综合 , 计算层次总排序权重值 ; 并进行层次总排序的一致性检验。

4.3 北运河水量管理生态影响综合评价

4.3.1 评价指标权重

本研究采用层次分析法对权重进行确定。对评价因素的重要程度进行两两比较 , 构造判断矩阵 , 通过计算及其一致性检验 , 其评价指标权重结果见表 4.4。

表4.4 权重确定值
Tab.4.4 The value of weight

目标层 (A)	准则层 (B)		指标层 (C)	
水量管理生态影响指数	河流水文状况	0.2	年均水量变化率	0.4
			相对断流天数	0.3
			河流生态需水保证率	0.3
	河流水环境状况	0.3	水功能区水质达标率	0.6
			水土流失比例	0.15
			水体自净率	0.25
	河流形态结构状况	0.15	河床、河岸稳定性	0.3
			纵向连续性	0.3
			横向连通性	0.2
			垂向透水性	0.2
	河岸带状况	0.15	河岸带植被覆盖度	0.4
			景观多样性指数	0.4
			水域湿地状况	0.2
	河流水生物状况	0.2	水生生物存活状况	0.6
			生物多样性指数	0.4

4.3.2 评价指标标准确定

水量管理生态影响评价是一个动态的不断变化的过程。参照其它评价模式 , 将水量

管理生态影响评价指数划分成 5 个等级：Ⅰ级水量管理生态影响很小，综合指数为 0~0.2；Ⅱ级水量管理生态影响较小，综合指数为 0.2~0.4；Ⅲ级水量管理生态影响一般，综合指数为 0.4~0.6；Ⅳ级水量管理生态影响严重，综合指数为 0.6~0.8；Ⅴ级水量管理生态影响非常严重，综合指数为 0.8~1.0。表 4.5 为水量管理生态影响评价分级体系及生态学意义。

表 4.5 生态影响评价分级体系
Tab.4.5 The grading system of ecological impact assessment

级别	生态学意义
级很小	表示河流系统没有受到任何的人为干扰，处于原始状态。
级较小	表示河流系统受到极小的人为干扰，不影响河流中水生生物的正常生存。
级一般	表示河流系统受到一定的人为干扰，对水生生物产生短期的影响。
级严重	表示河流系统因为人类的干扰已被破坏，对水生生物的生存和繁衍有很大的影响，生态系统平衡被破坏。
级非常严重	表示河流系统的结构和功能彻底被破坏，污染物对水生生物产生的污染效应具长期性和滞后性。

针对北运河的实际情况，确定各指标的评价等级标准，等级评价标准的选取是依据国家及国际适用标准并借鉴行业标准和与之相关的研究成果来确定的。各级指标标准值见表 4.6。

表4.6 指标标准特征值
The standard features of index

准则层（B）	指标层（C）	标准特征值				
		级	级	级	级	级
河流水文状况	年均水量变化率%	≤5	15	30	40	≥40
	相对断流天数%	0	20	40	60	≥60
	河流生态需水保证率%	≥90	80	65	50	≤50
河流水环境状况	水功能区水质达标率%	≥80	60	40	20	≤20
	水土流失比例%	≤5	10	20	40	≥40
	水体自净率%	≥80	60	40	20	≤20
河流形态结构状况	河床、河岸稳定性	优	良	中	差	很差
	纵向连续性	≤2	4	6	8	≥8
	横向连通性	≥80	60	40	20	≤20
	垂向透水性	≤10	20	35	50	≥50
河岸带状状况	河岸带植被覆盖度	≥80	60	40	20	≤20
	景观多样性指数	≥3	2	1.5	0.5	≤0.5
	水域湿地状况	一级	二级	三级	四级	五级
河流水生物状况	水生生物存活状况	优	良	中	差	很差
	生物多样性指数	≥4	3	2	1	≤1

4.3.3 水量管理生态影响模糊层次综合评价

50 年代以前北运河流域尚未开发，流域基本处于自然状态。进入 60 年代以后，北

运河流域进行了综合开发，兴建了系列蓄水、引水、提水工程，这些工程发挥了巨大的经济、社会和环境效益，但同时也对河流系统功能产生了巨大影响。因此，北运河水量管理生态影响评价标准的确定以 60 年代以前北运河自然特征为依据，并以此确定现状 2000 ~ 2008 年水量管理生态影响状况。表 4.7 为北运河水量管理生态影响指标现状。

根据确定的现状指标和评价标准，以及评价指标权重，采用模糊层次分析法，分别计算评价指标的模糊综合评价矩阵 R，逐层计算并对所有计算结果汇总，由各个指标模糊计算结果最后生成一级评价结果。按照最大隶属度的原则，综合指数的评分值越大，则影响越大，否则相反，北运河水量管理生态影响评价综合指数为 0.81，对照其划分的标准，其基本结论为：北运河水量管理生态影响处于“非常严重”级别下限，应当采取综合措施进行生态修复和保护。

表4.7 指标现状值
Tab.4.7 The current value of index

准则层 (B)		指标层 (C)		
河流水文状况	0.2	年均水量变化率	0.4	65%
		相对断流天数	0.3	59%
		河流生态需水保证率	0.3	55%
河流水环境状况	0.3	水功能区水质达标率	0.6	18%
		水土流失比例	0.15	30%
		水体自净率	0.25	25%
河流形态结构状况	0.15	河床、河岸稳定性	0.3	中
		纵向连续性	0.3	18 个
		横向连通性	0.2	25
		垂向透水性	0.2	30
河岸带状况	0.15	河岸带植被覆盖度	0.4	50%
		景观多样性指数	0.4	1.5
		水域湿地状况	0.2	四级
河流水生物状况	0.2	水生生物存活状况	0.6	差
		生物多样性指数	0.4	1

4.4 评价结果分析

本研究在分析北运河水量管理生态影响评价可行性基础上，提出了北运河河流健康内涵和主要标志，进一步建立了北运河水量管理生态影响评价指标体系和评价标准，采用模糊层次综合评价方法对北运河水量管理生态影响进行了综合评价，其评价结果为北运河处于“非常严重”级别下限，可见北运河河流生态系统已经遭受了严重破坏，急需采取综合措施进行生态治理，维持北运河健康可持续发展。

为保障北运河河流健康，可以采取以下基本措施，包括建设功能齐全的污水处理厂、采用节水设备提高水资源的利用效率、经过污水处理厂处理后再向河道内排放污水、对污水处理厂的污水设备及配套设施不断进行健全、注重绿化的建设、合理开发利用水资源

源、加强流域内的生态建设等。从单纯地改善水质向恢复河流生态系统思路转变，包括生态河道治理和河流生物栖息地重建；合理调节闸坝运行方式；以维护北运河河流健康可持续发展。

因此，为改善北运河现有河流的水环境状况，下文主要通过闸坝控制，进行北运河水质水量联合调度研究，以保障北运河生态用水，保持河道畅通和一定流速，在减轻河流水体污染的同时，使北运河水体自净能力得到加强，水生生态系统逐步得到改善。

第 5 章 生态用水保障的北运河水质水量联合调度

本章在前述水量管理生态影响评价研究的基础上,针对北运河上水利工程特点,提出了基于闸坝及水库的生态环境需水的水质水量联合调度的基本思路。研究中建立了基于生态用水保障的水质水量联合调度模型,选取典型年,根据调水目标和调水约束条件,研究北运河保障生态用水的分质水量水质联合调度水资源网络系统,分析北运河流域闸坝控制下水质水量变化。通过分析在生态用水保障水量的基础上的流域水质水量联合调度效果,提出水质水量联合调度方案。

5.1 水质特征

5.1.1 水质现状

依据《北京市环境质量报告书》,2007 年北京市环保局共监测北运河水系有水河流 41 条段,达标 4 条段,达标长度百分比为 20.5%。其中,II 类水质河长占监测河段总长度的 14.0%,III 类占 2.3%,IV 类占 5.2%,V 类占 0.8%,劣 V1 类~劣 V4 类占 77.7%。具体见图 5.1。

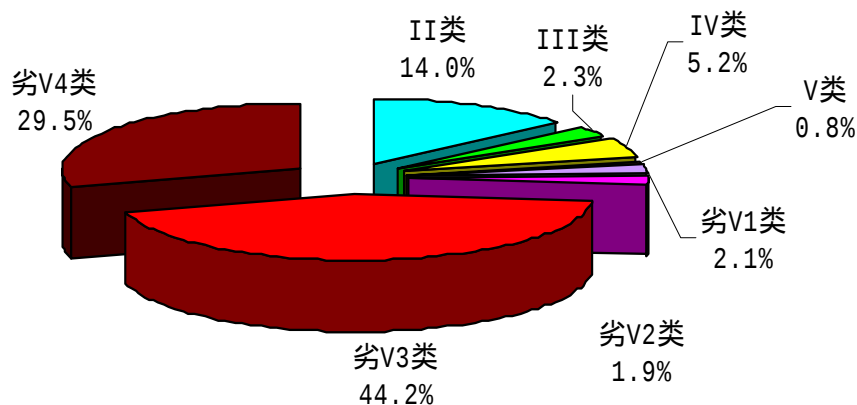


图 5.1 2007 年北运河系水质类别比例（河段长度百分比）

Fig.5.1 The proportion of department of water quality based North Canal in 2007
(percentage of river length)

北运河河流污染物主要以有机物为主,原因在于北运河水系的四条排水河道清河、坝河、通惠河和凉水河接纳了北京市 90%的城市污水,随着不断地城市化以及人口的不断增长,大量未经处理的工业废水和生活污水的排放造成了北运河水质的严重污染,因此,北运河流域水环境的修复和改善刻不容缓。

5.1.2 水质变化规律

2000~2007 年,北运河水系各类水质河段所占比例见表 5.1,其中 2000~2005 年是河段个数百分比,2006~2007 年是河段长度百分比。

表 5.1 2000~2007 年北运河水系各类水质河段所占比例

Tab.5.1 The proportion of various types of water quality based North Canal in 2000~2007

序号	年份	类水质	类水质	类水质	类水质	劣 类水质
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	2000 年	2.4	2.4	9.5	4.8	81
2	2001 年	2.4	0	9.8	2.4	85.4
3	2002 年	2.4	2.4	12.2	2.4	80.5
4	2003 年	2.5	0	10	2	85
5	2004 年	0	2.5	10	0	87.5
6	2005 年	2.3	0	9.3	0	88.4
7	2006 年	10.8	1.8	6	0	81.4
8	2007 年	14	2.3	5.2	0.8	77.7

2000~2005 年，北运河水系 类、 类、 类水质河段个数所占比例变化趋势不显著， 类水质河段个数所占比例有所下降，劣 类水质所占比例有所上升；2006~2007 年，北运河水系 类、 类、 类水质河段长度所占比例有所上升，劣 类水质所占比例有所下降。

5.1.3 水功能区达标率变化

图 5.2 为 2000~2007 年北运河水系达标河段长度百分比。2000~2003 年北运河水系达标河段长度百分比变化不明显，2004 年达标河段长度百分比明显下降，只有 10%，2005~2007 年达标河段长度百分比逐年升高，从 2004 年的 10%上升到 2007 年的 20.5%，上升了 10.5 个百分点，平年每年上升 2.6 个百分点。

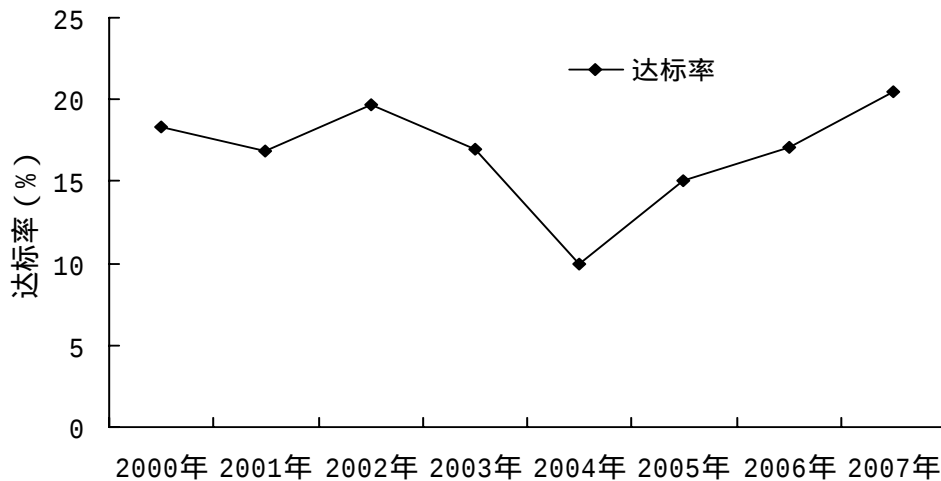


图 5.2 2000~2007 年北运河水系达标河段长度百分比

Fig.5.2 The percentage of standard river length based North Canal in 2000~2007

综上所述，北运河近年来水质基本都是劣 V 类水，水功能区水质达标率也不容乐观。急需采取措施改变当前状况，以改善北运河水质、水量，满足河流生态需水。

5.2 关键问题处理

5.2.1 流域水资源网络系统

一个完整的水资源网络系统一般是由水库节点、闸节点、坝节点、各类用水户取水节点、汇（分）流节点及节点之间连线组成的网络系统，北运河流域水资源的物理网络系统是建立以保障北运河生态用水的分质水量水质联合调度模型的基础。通过将河流系统和水利工程等概化为节点，节点之间的连线是河流的一个河段或引水渠道，将各类节点用连线组成网络，把一个实际的流域河流系统进行概化，概化后的网络系统是由节点和相互关联的连线组成的，以此来反映北运河流域实际水资源系统的主要特征及各组成部分之间的联系，采用网络流或数学方程式对节点之间的联系进行描述，通过模型进行模拟，水库蓄水量、下泄水量、生态缺水量、节点的取用水量等的变化过程，达到从时间上和空间上模拟各种水资源信息特征的目的。北运河流域水资源网络概念示意图如图5.3。

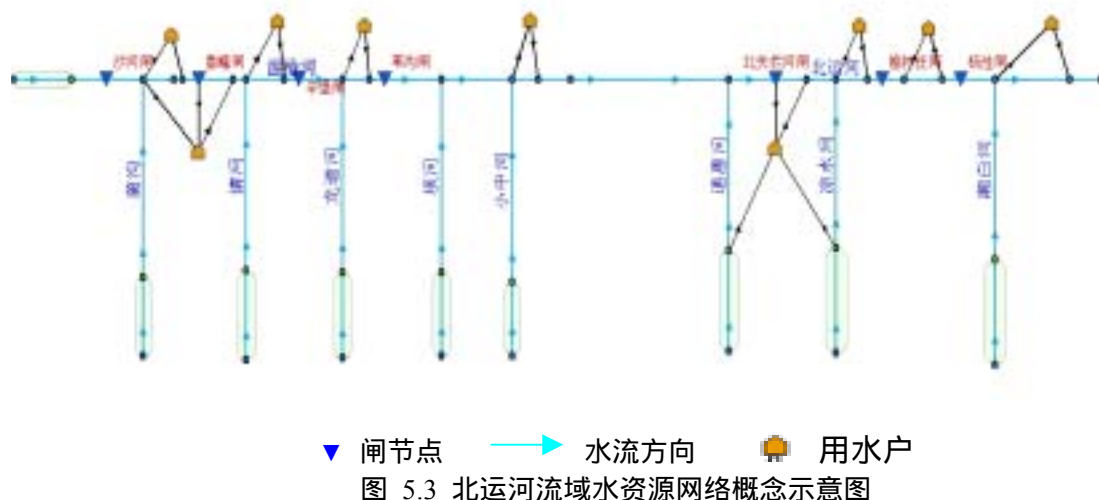


图 5.3 北运河流域水资源网络概念示意图

Fig.5.3 The concept diagram of North Canal basin water resources network

北运河流域水资源网络图的节点的类型主要包括以下几类。

区间汇流节点

汇流节点表示在此区间范围内，该节点为径流输入水量，它是流入水量的表征，所有区间的汇流节点的流量和为流域天然径流量。

分流节点

设置用于连接干流和支流，干流与引水渠、取用水户的控制节点。

用水户节点

此类节点代表其范围内的农业需水和生态环境需水。

水库（闸坝）节点

水库（闸坝）节点代表北运河流干流重要的水库（闸坝）。

回归水节点

在其代表范围内接受其他节点，如城市工业和生活、农业用水等的回归水。

5.2.2 模型简化处理

5.2.2.1 节点水量平衡方程

计算过程中节点水量平衡采用的是质量守恒原理，即流入量和流出量相等。

节点水量平衡方程如下：

$$Q_{sy} + Q_{qj} + Q_{hg} + Q_{dr} + QR_{t-1} - Q_{life} - Q_{ind} - Q_{agri} - Q_{dc} - QR_t - Q_{xx} - Q_{ks} = 0 \quad (5-1)$$

式中： Q_{sy} ——时段内上游节点来水量， m^3 ；

Q_{qj} ——时段内区间来水量， m^3 ；

Q_{hg} ——时段内节点接受其他节点回归水量， m^3 ；

Q_{dr} ——时段内调入节点水量， m^3 ；

Q_{life} ——时段内节点生活取水量， m^3 ；

Q_{ind} ——时段内节点工业取水量， m^3 ；

Q_{agri} ——时段内节点农业取水量， m^3 ；

Q_{dc} ——时段内节点调出水量， m^3 ；

Q_{xx} ——时段内节点的下泄水量， m^3 ；

QR_{t-1} ——时段初水库蓄水量，非水库节点此项为 0， $10^4 m^3$ ；

QR_t ——时段末水库的蓄水量，非水库节点此项为 0， $10^4 m^3$ ；

Q_{ks} ——水库的损失量，非水库节点此项为 0， $10^4 m^3$ 。

此类网络系统模拟模型在计算机自动计算过程中，所采用的计算原理是最小费用最大流量原理，算法的具体过程是，在某一时间段内，全流域内同时进行计算，因为模拟模型中每个节点的来水量和下泄水量都是未知的，所以就按照事先给定的优先原则逐次增加与之相关联的连线上的水量，循环进行模拟计算，最后找不到“最短路”，即得出了最小费用最大流量解。

5.2.2.2 节点水量平衡模型的要素介绍

节点水量平衡模型中的要素包括两部分：节点输入和结果输出。

1) 节点输入

在水量平衡方程式中，上游节点的来水量、其他节点的回归水量、调入节点水量、时段初期水库的蓄水量，这些数据是可以统计得到并输入进去，然后在给定的系统运行规则和优先序的前提下，不同的输入数据就会产生不同的反馈行为。

2) 节点输出

节点的输出也就是模拟模型最后模拟所得到的计算结果，具体过程：

各用水户实际引水的上限

流域内各节点调出水量，城市工业、农业、生活取水量、生态环境用水以及时段末水库（闸坝）蓄水变化量的上限，根据制定的实际数据进行输入。

各用水户实际引水量

按照事先给定的优先规则，通过模型进行模拟计算，最终计算得出各个用水户实际需要的引水量。

回归水的计算

回归水的回归途径可以是回归到一个节点，也可以回归到多个节点。回归比例系数一般由统计资料部门给出。城市生活和工业用水可不考虑其滞后的计算水量，然而农业灌溉要计算其回归滞后的水量，计算公式为：

$$Q_{hg}(i, j) = \sum_{n=1}^N Q_{agri}(i-1, n) \times \alpha_{agri}(n) \times \gamma_{agri}(n, j) \quad (5-2)$$

式中： $Q_{hg}(i, j)$ — i 时刻 j 节点的回归水量， m^3 ；

$Q_{agri}(i-1, n)$ — $i-1$ 时刻 n 节点的农业引水量， m^3 ；

$\alpha_{agri}(n)$ — n 节点农业引水回归系数，%；

$\gamma_{agri}(n, j)$ — n 节点农业引水回归到 j 节点的回归比例，%；

N —向 j 节点回归水量的节点个数。

5.3 模型的建立

5.3.1 水量模型建立

5.3.1.1 目标函数

根据综合利用要求，针对北运河水资源特点，从对北运河水质、水量联合调度的基础上出发，模型主要考虑四个目标函数：河道内生态需水量缺水率、河道外需水量缺水率、河道水环境状况、防洪安全影响程度。求解过程采用数学优化方法，最终得到最优的水质水量联合调度方案。

(1) 河道生态需水量缺水率最小

$$\min F_1 = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n \frac{SX_{it} - SW_{it}}{SX_{it}} \quad (5-3)$$

式中： F_1 —河道内生态需水量缺水指标；

SW_{it} —第 t 时段给第 i 河段的供水量大小， m^3 ；

SX_{it} —第 t 时段第 i 河段的需水量大小， m^3 ；

i —河流分段编号， $i=1, 2, \dots, m$ ；

t —时间编号， $t=1, 2, \dots, n$ ；

若 $SX_{it} - SW_{it} < 0$ ，则缺水率按0处理。

(2) 河道外需水量缺水率最小

$$\min F_2 = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n \frac{X_{it} - W_{it}}{X_{it}} \quad (5-4)$$

式中： F_2 —河道外生态需水量缺水指标；

W_{it} —第 t 时段给第 i 用水户的供水量的大小， m^3 ；

X_{it} —第 t 时段第 i 用水户的需水量， m^3 ；

i —用水户编号， $i=1,2,\dots,m$ ；

t —时间编号， $t=1,2,\dots,n$ ；

若 $X_{it} - W_{it} < 0$ ，则缺水率按 0 处理。

(3) 河道水环境状况最优程度

$$\max F_3 = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n 1 - \frac{C_{it} - C_s}{C_s} \quad (5-5)$$

式中： F_3 —河道水环境质量衡量指标；

C_{it} —第 t 时段第 i 河段的水质指标值， mg/L ；

C_s —第 I 类水质标准值， mg/L ，水质指标主要包括 COD、 NH_3-N ；

i —河流分段编号， $i=1,2,\dots,m$ ；

t —时间编号， $t=1,2,\dots,n_0$ 。

(4) 防洪安全影响程度最小

防洪安全影响最直接的指标是水位，不同的控制断面所要求的控制水位也不相同，一般采用以下函数，来避免区域内高水位的持续时间。

$$\min F_4 = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n \frac{H_{it} - H_{di}}{H_{di}} \quad (5-6)$$

式中： F_4 —防洪安全度量指标；

H_{it} —第 i 水库（闸坝）第 t 时刻的计算水位， m ；

H_{di} —第 i 水库（闸坝）死水位（闸底高程）， m ；

i —水库（闸坝）编号， $i=1,2,\dots,m$ ；

t —时间编号， $t=1,2,\dots,n_0$ 。

5.3.1.2 约束条件

约束条件包括：河段水量平衡、需水要求等约束条件。

河段水量平衡约束

$$(Q_{f,st} - Q_{f,mt}) \cdot \Delta t + L_{f,t} + P_{f,t} - S_{f,t} - W_{f,t} = V_{f,t+1} - V_{f,t} \quad (5-7)$$

式中： $L_{f,t}$ —第 f 河段第 t 时段内的旁侧流入量；

$P_{f,t}$ —第 t 时段内第 f 河段面上净雨量，降雨量大于蒸发量为正，否则为负；

$S_{f,t}$ —第 t 时段内第 f 河段渗漏量；

$W_{f,t}$ —第 t 时段内第 f 河段的取水量；

$Q_{f,st}$ —第 f 河段首断面第 t 时段的平均流量；

$Q_{f,mt}$ —第 f 河段末断面第 t 时段的平均流量；

$V_{f,t}$ —第 f 河段第 t 时段初的水量；

$V_{f,t+1}$ —第 f 河段第 $t+1$ 时段末的水量。

(2) 需水量约束

$$W_{f,t} \in [X_{f,\min t}, X_{f,\max t}] \quad (5-8)$$

式中： $X_{f,\min t}$ —第 f 河段第 t 时段内最小需水量；

$X_{f,\max t}$ —第 f 河段第 t 时段内最大需水量。

5.3.2 水质模型建立

在水资源网络系统中，模拟过程中系统所采用的水质模型模拟的是影响水质的最重要物质反应的稳态传输过程，即所有物质的降解过程都被描述成反应转变。

(1) BOD₅ 模型公式

$$BOD_5 = BOD_d (1 - \exp(-k_{d3} 5[days])) \quad (5-9)$$

式中： BOD_5 —有机物 5 日生化需氧量；

k_{d3} —BOD 在 20°C 时的降解速率系数；

BOD_d —有机物的总需氧量。

注： BOD_5 与 COD 之间有一定的转换关系。

(2) NH₄ 模型公式

$$\frac{dNH_3}{dt} = Y_d k_{d3} BOD_d - k_4 NH_3 \quad (5-10)$$

式中： Y_d —有机物质中的氮含量；

k_4 —20°C 时硝化速率系数。

5.4 模型的求解方法

5.4.1 最小费用流求解步骤

求解方法是应用最小费用最大流量原理(MAXMIN 法，标准网络求解程序)，求解方法介绍如下：

(1) 从零流 f_0 开始， f_0 是可行流，也是相应的流量为零时费用最小的。

(2) 对可行流构造加权网络 W ，加权网络 W 的构建方法为：对可行流的流量小于该弧的容量时，给出相应弧的权数，即单位流量的费用，当为正向弧时费用为正，相反为负；当该弧流量已经饱和时，其费用为负；当该弧流量为零时，其费用值为正。

(3) 在加权网络 W 中，寻找费用最小的路径，即最短路。并且将该路径调整至允许的最大值，得到一个新的流量。

(4) 重复 2、3 两步，一直到加权网络找不出最短路，此时即为网络的求解结果。

5.4.2 水资源网络系统设置原则

代表工业、生活和农业的各类用水户，是以优先序进行赋值的，规定为优先序越高，即费用小的连线将优先通过流量。在此基础上，来保障北运河生态用水。因此，需要制定相应的供水原则，模拟模型供水节点的优先序，进行水资源的合理分配。实现水量分配首先确定供水原则，针对运行结果，需要对模型不断进行优先序调整，直到最后合理。

5.4.3 模拟模型过程

根据分质水量水质联合调度模型的概念及其调度原则，模型基本上有三部分组成，即：输入、输出信息和模型系统。如图 5.4。

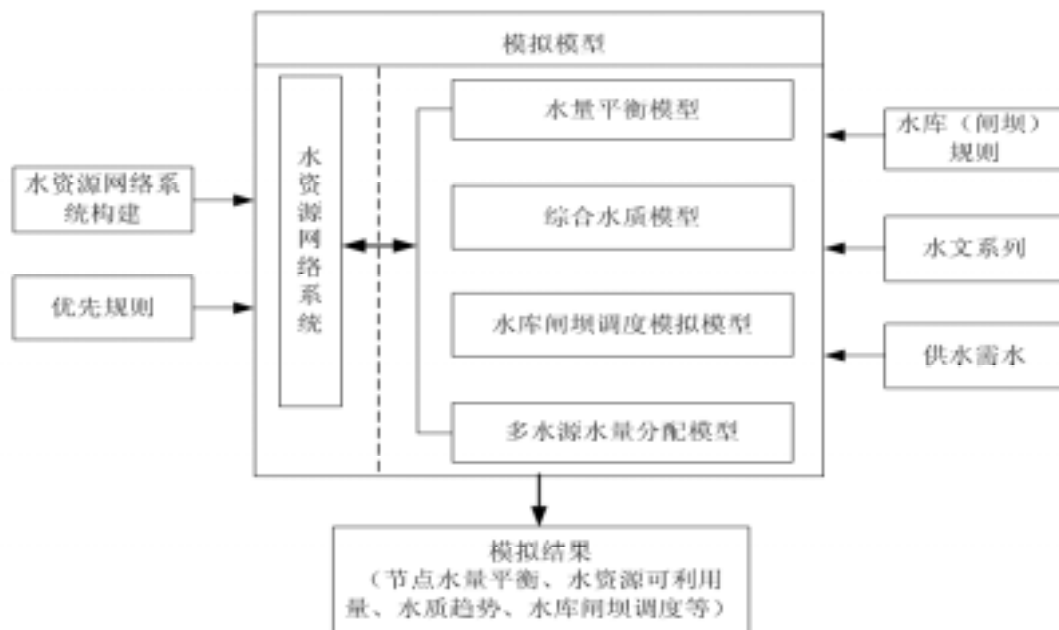


图 5.4 分质水量水质联合调度模型结构图

Fig.5.4 The model structure diagram of joint regulation based quantity and quality

(1) 模型输入

模型输入主要包括取用水节点水库、闸坝节点等的设置和输入，建立水文分析过程系列数据，水位 - 库容 - 面积、水位等信息的输入，水质数据的输入。水资源分配的原则是按照优先规则和生态环境目标约束条件进行输入的。

(2) 模拟模型系统

模型模拟过程是整个系统的核心部分，需要长时间的模拟计算、运行。网络系统模型有以下模型组合而成：

a、水量平衡模型 b、多水源水量分配模型 c、闸坝（水库）运行规则模拟模型。根据不同的目标要求，设置不同的参数进行模拟。

(3)模型输出

模型输出主要是各个节点的水量平衡结果、水资源可利用量、缺水程度，水质变化趋势、水库水位等信息，通过各种图形和数字反映出来，便于分析总结。

5.5 输入数据

模型模拟过程中，所需要的代表性的基础资料有北运河河道最小生态需水量、各用户农业需水量、各闸坝水位-面积-库容数据等，然后按照在保障生态用水的前提下，优先保障生活和工业用水、其次农业用水的优先规则进行模型模拟。

图表 5.2 ~ 5.4 为模拟过程中代表性的闸坝沙河闸、北关拦河闸、杨洼闸的水位—面积—库容数据表。

北运河河道最小生态需水量是保障河道不断流情况下的需水量。表 5.5 为北运河河段河道内各月不同断面间的河道基流量数据。

图表 5.6 为各用户农业实际引水量，农业用水主要集中在每年的 3、4、5 月份和 9 月份。

表 5.2 沙河闸水位-面积-库容数据

Tab.5.2 The water level-area-capacity of Shahe brake

序号	H	S [km ²]	V [10 ⁶ m ³]
1	24	0.0014	0.0006
2	30	0.842	1.5787
3	30.5	0.9345	2.0132
4	31	1	2.4917
5	31.5	1.0038	3.0049
6	32	1.0256	3.5496
7	32.5	1.196	4.1308
8	33	1.2322	4.7599
9	33.5	1.5459	5.4583
10	34	1.8929	6.29
11	34.5	2.4056	7.3454
12	35	2.949	8.6837
13	35.5	3.2959	10.2443
14	36	3.5227	11.9403
15	36.5	3.6048	13.7071
16	37	3.6856	15.5213
17	37.48	3.7643	17.3033
18	38	3.8494	19.277
19	38.5	3.9389	21

表 5.3 杨洼闸水位-面积-库容数据

Tab.5.3 The water level-area-capacity of Yangwa brake

序号	H (m)	S (km ²)	V (10 ⁶ m ³)
1	7.9	0	0
2	8.17073	0.012728	0.00084852
3	8.45462	0.054813	0.00688114
4	8.73192	0.3	0.042098
5	9.00923	0.43	0.13332
6	9.28654	0.6	0.251014
7	9.56385	0.78	0.409103
8	9.84115	0.95	0.605842
9	10.1185	1.10813	0.819117
10	10.3958	1.19398	1.04921
11	10.6731	1.29361	1.29785
12	10.9504	1.47	1.568
13	11.2277	1.68	1.88575
14	11.505	1.82419	2.24018
15	11.7823	2.12	2.61506
16	12.0596	2.34	3.02118
17	12.3369	2.5	3.55513
18	12.6142	2.65	4.0963
19	12.8915	2.75995	4.51
20	13.1688	2.79065	4.92
21	13.4462	2.7952	5.33975
22	13.7235	2.79974	5.65
23	14.0008	2.81792	6.04139
24	14.2781	2.87	6.60679
25	14.5554	2.94	7.17583
26	14.8327	2.96	7.74851
27	15.11	3.17164	8.34763
28	55	10	30

表 5.4 北关拦河闸水位-面积-库容数据

Tab.5.4 The water level-area-capacity of Beiguan brake

序号	H(m)	S (km ²)	V (10 ⁶ m ³)
1	14.27	0	0
2	15.11	0.27	0.0475106
3	16.23	1.04	0.683736
4	17.35	1.65	1.7696
5	18.19	2.27	2.95129
6	19.03	2.85	4.4
7	20.71	3.24	7.45623
8	21.55	3.57942	9.4209
9	55	10	20

表 5.5 北运河河道最小生态需水量

Tab.5.5 The minimum ecological water demand of North Canal river														
河段	生态需水量	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
沙河水库— 沙河闸 (16km)	河道生态基流量	亿 m ³	0.0166	0.0162	0.0217	0.0142	0.0236	0.0594	0.116	0.0984	0.0545	0.0356	0.0277	0.064
		m ³ /s	0.608	0.678	0.818	0.942	0.926	2.245	4.442	3.749	2.098	1.258	1.146	0.675
沙河闸--鲁 幢闸(19km)	河道生态基流量	亿 m ³	0.0168	0.0124	0.011	0.0098	0.0166	0.0214	0.077	0.1321	0.0517	0.0292	0.0163	0.018
		m ³ /s	0.636	0.466	0.421	0.368	0.627	0.818	2.925	5.026	1.966	1.108	0.623	0.686
北关闸--杨 洼闸 (38.06km)	河道生态基流量	亿 m ³	0.0235	0.0222	0.0211	0.019	0.0399	0.0406	0.0737	0.1133	0.0546	0.0352	0.0239	0.024
		m ³ /s	0.893	0.837	0.803	0.726	1.291	1.549	2.806	3.587	2.082	1.331	0.911	0.894
杨洼闸--土 门楼 (17.34km)	河道生态基流量	亿 m ³	0.0286	0.0289	0.0285	0.0231	0.0494	0.0577	0.0687	0.0933	0.0568	0.0399	0.0289	0.029
		m ³ /s	1.091	1.1	1.084	0.876	1.877	2.198	2.61	3.55	2.162	1.518	1.101	1.092
土门楼--筐 儿港 (41.4km)	河道生态基流量	亿 m ³	0.0187	0.018	0.0096	0.0227	0.0211	0.0557	0.056	0.06	0.042	0.0309	0.0181	0.018
		m ³ /s	0.71	0.682	0.38	0.887	0.776	2.122	2.127	2.284	1.592	1.173	0.685	0.666
筐儿港--屈 家店 (32.9km)	河道生态基流量	亿 m ³	0.0191	0.0148	0.0191	0.0156	0.0391	0.0529	0.0649	0.0679	0.047	0.0236	0.0137	0.016
		m ³ /s	0.729	0.568	0.728	0.596	1.489	2.016	2.467	2.585	1.784	0.898	0.524	0.593

5.6 农业用水量 (万 m^3/a)

Tab.5.6 The amount of agricultural water (million m^3/a)

河段	3 月	4 月	5 月	9 月
沙河-鲁疃闸	12.5	12.5	12.5	12.5
鲁疃闸-北关闸	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0
沙河-北关(包括鲁疃闸)	1212.5	1212.5	1212.5	1212.5
北关-杨洼闸	3000.0	3000.0	3000.0	3000.0
杨洼闸-土门楼	1558.3	1558.3	1558.3	1558.3
土门楼-筐儿港	1558.3	1558.3	1558.3	1558.3
筐儿港-屈家店	1558.3	1558.3	1558.3	1558.3
合计	1212.5	1212.5	1212.5	1212.5

5.6 计算结果输出

根据北运河流域水资源量及水质情况,结合流域污水治理和回用规划,利用北运河流域分质水量水质多目标联合调度模型,模拟现状来水频率和 50%来水频率条件下闸坝调度效果。在方案设定过程中,现状来水频率和 50%来水频率条件下,控制性闸坝各设 3 个不同的闸坝控制水位,包括现有控制水位、低控制水位和高控制水位。在现状来水和现有控制水位条件下(方案 1),北运河流域生态调度结果如图 5.5-5.12,在 50%来水频率和现有控制水位条件下(方案 4),北运河流域生态调度结果如图 5.13-5.20。

5.6.1 数据输出

5.6.1.1 方案 1

1、沙河闸来水过程线、水位及下泄流量图

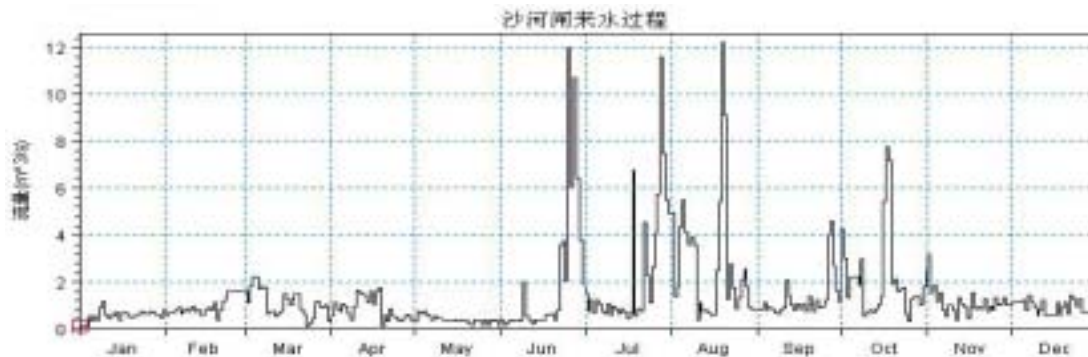


图 5.5 沙河闸来水过程 (方案 1)

Fig.5.5 The process of runoff Shahe gate (option 1)

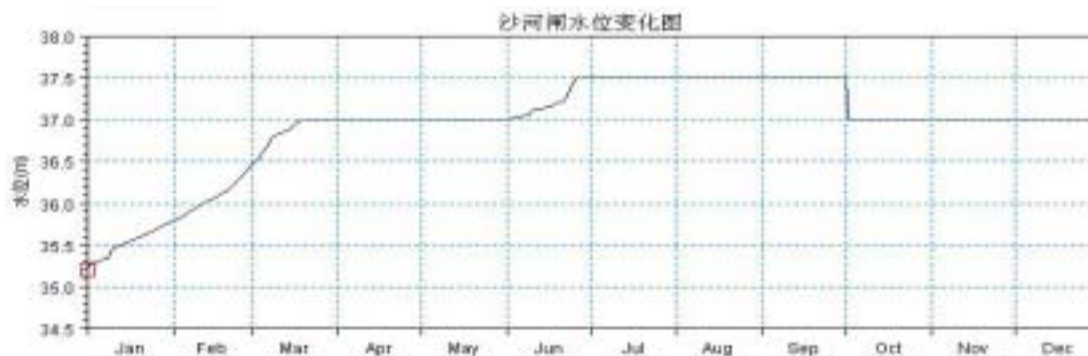


图 5.6 沙河闸水位变化 (方案 1)

Fig.5.6 The water lever changes of Shahe gate (option 1)

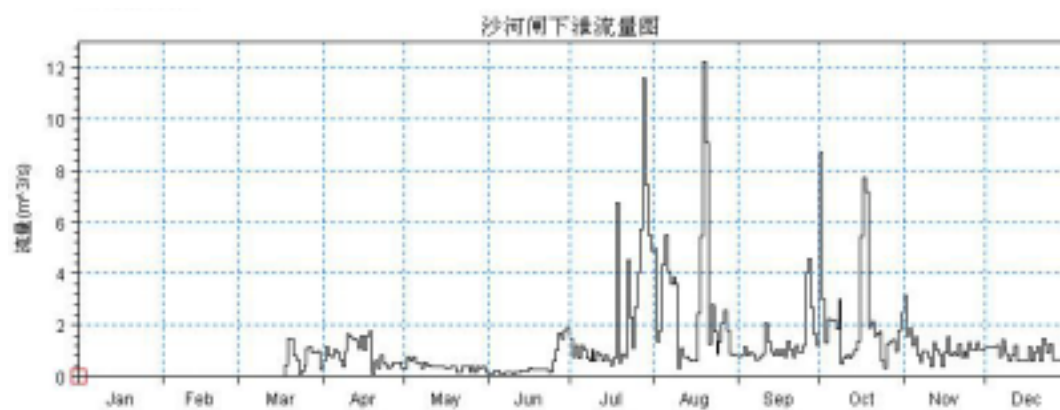


图 5.7 沙河闸下泄流量图 (方案 1)

Fig.5.7 The discharge figure of Shahe gate (option 1)

2、北关拦河闸水位、COD、NH₄ 变化曲线

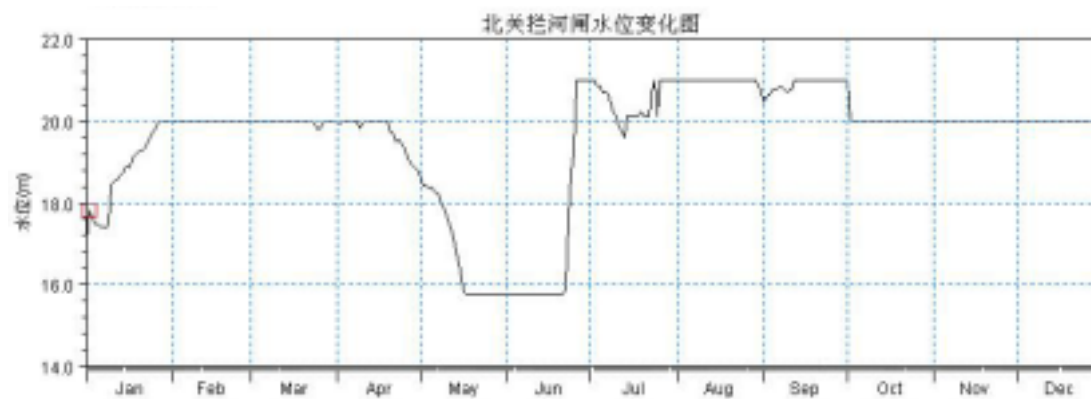


图 5.8 北关拦河闸水位变化图 (方案 1)

Fig.5.8 The water lever changes of Beiguan gate (option 1)

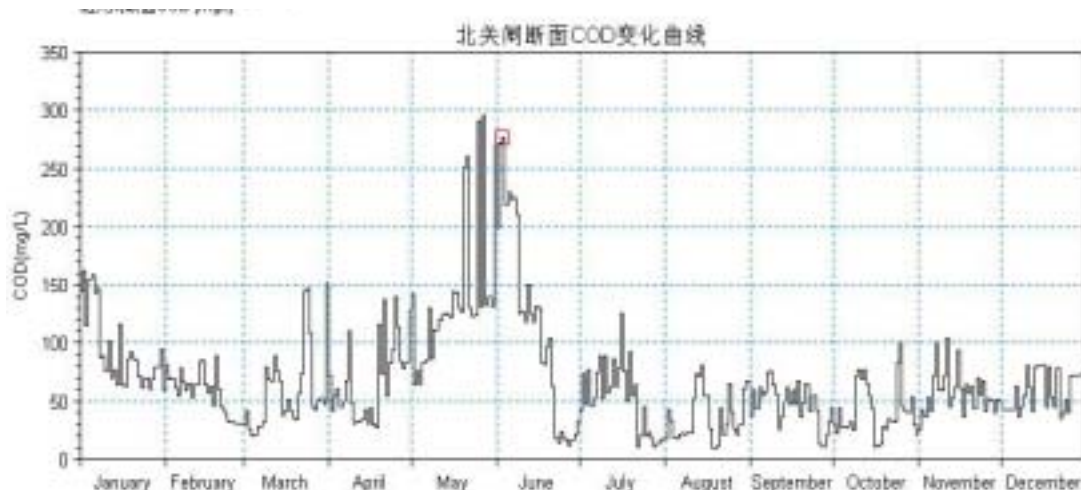


图 5.9 北关闸断面 COD 变化曲线 (方案 1)

Fig.5.9 The COD curve of Beiguan gate section(option 1)

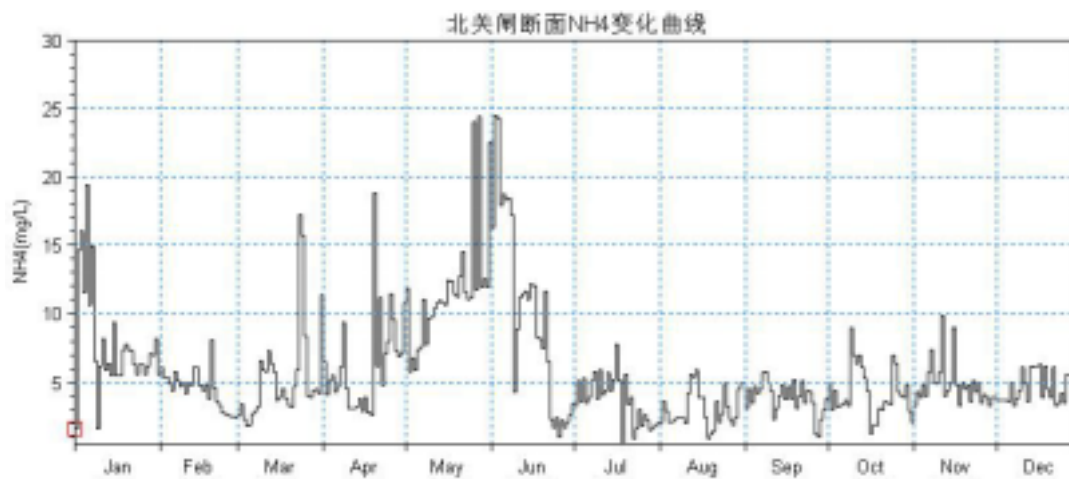


图 5.10 北关闸断面 NH_4 变化曲线（方案 1）

Fig.5.10 The NH_4 curve of Beiguan gate section(option 1)

3、杨洼闸生态用水缺水水量图

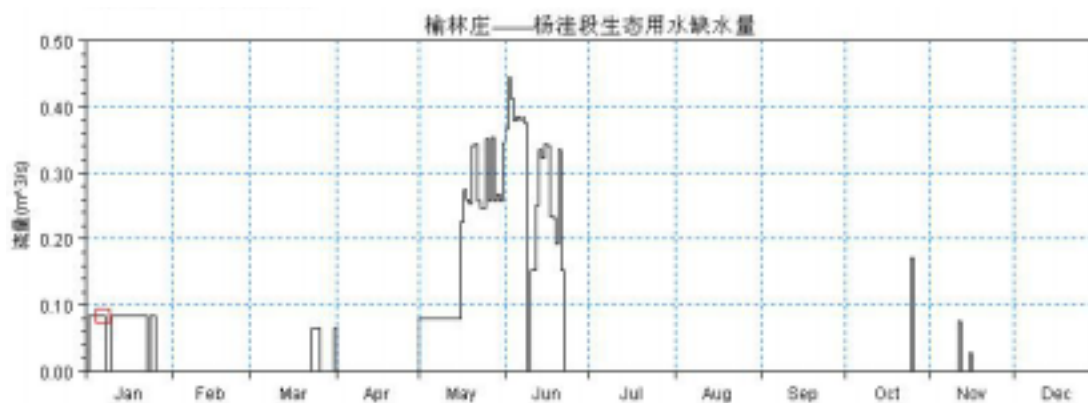


图 5.11 榆林庄-杨洼闸段生态用水缺水水量（方案 1）

Fig. 5.11 The amount of ecological water shortage between Yulinzhuang and Yangwa gate (option 1)

4、引温济潮生态用水缺水水量图

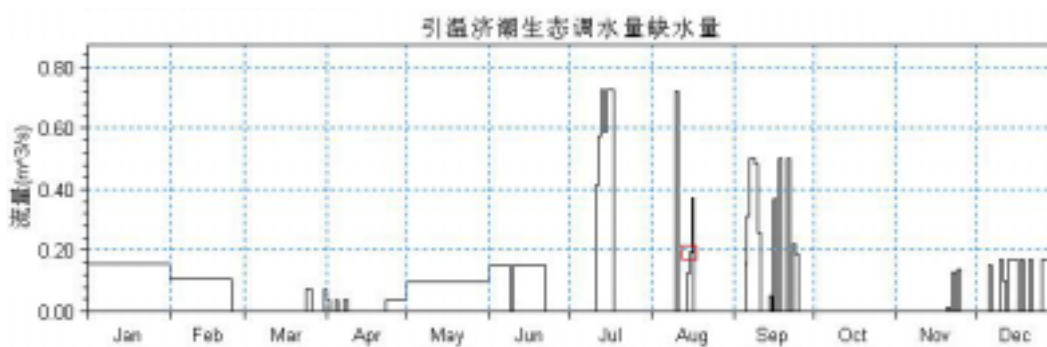


图 5.12 引温济潮生态用水缺水水量图（方案 1）

Fig. 5.12 The amount of ecological water shortage from Wenyu river to Chaobai river(option 1)

5.6.1.2 方案 4

1、沙河闸来水过程线、水位及下泄流量图

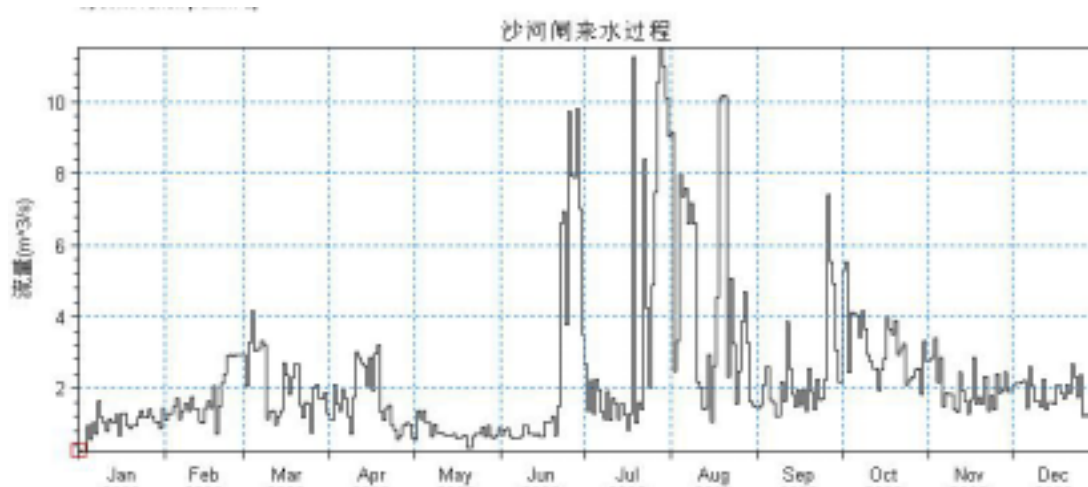


图 5.13 沙河闸来水过程 (方案 4)

Fig.5.13 The process of runoff Shahe gate (option 4)

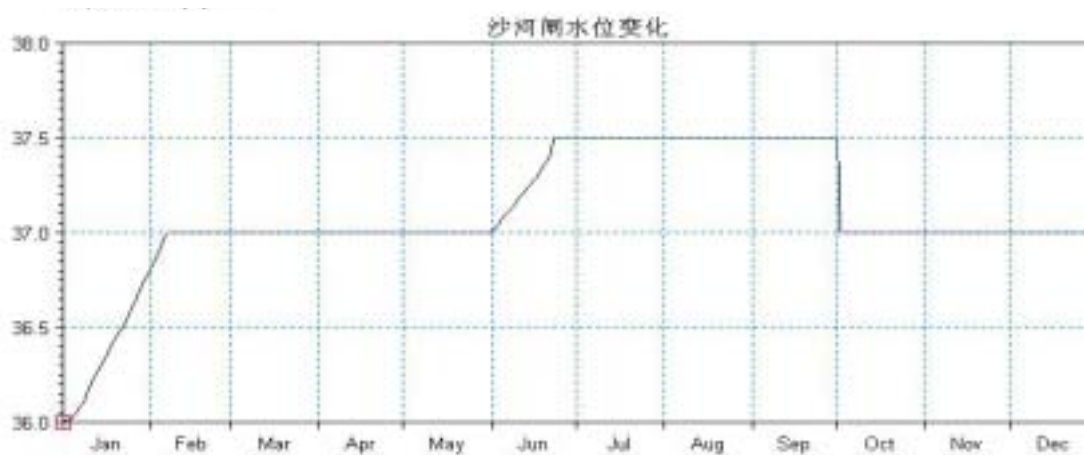


图 5.14 沙河闸水位变化图 (方案 4)

Fig.5.14 The water lever changes of Shahe gate (option 4)

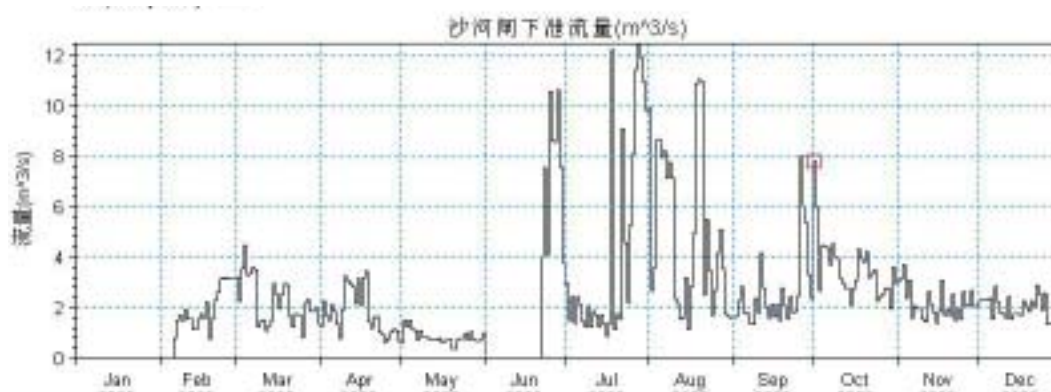


图 5.15 沙河闸下泄流量图 (方案 4)

Fig.5.15 The discharge figure of Shahe gate (option 4)

2、北关拦河闸水位、COD、NH₄ 变化曲线

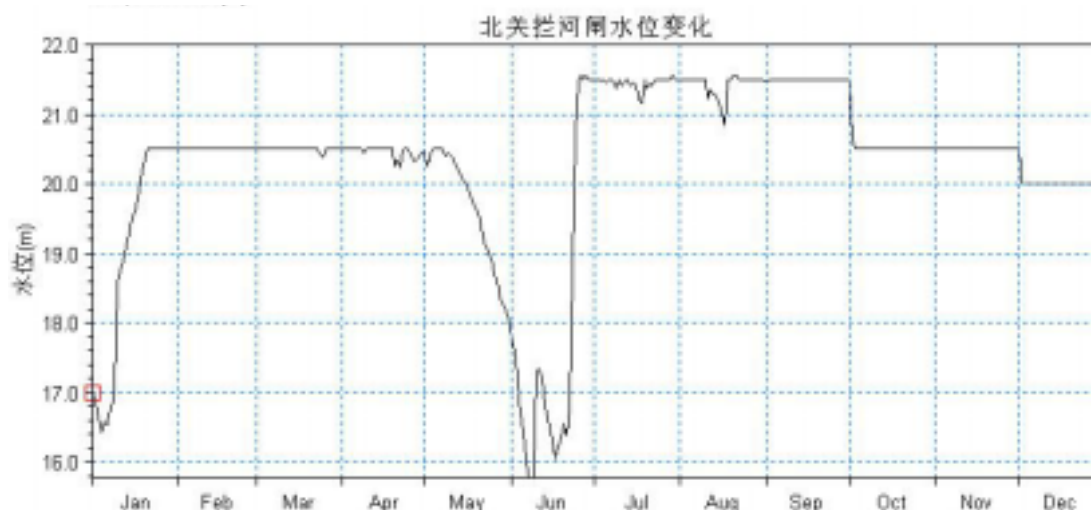


图 5.16 北关拦河闸水位变化图（方案 4）

Fig.5.16 The water lever changes of Beiguan gate (option 4)

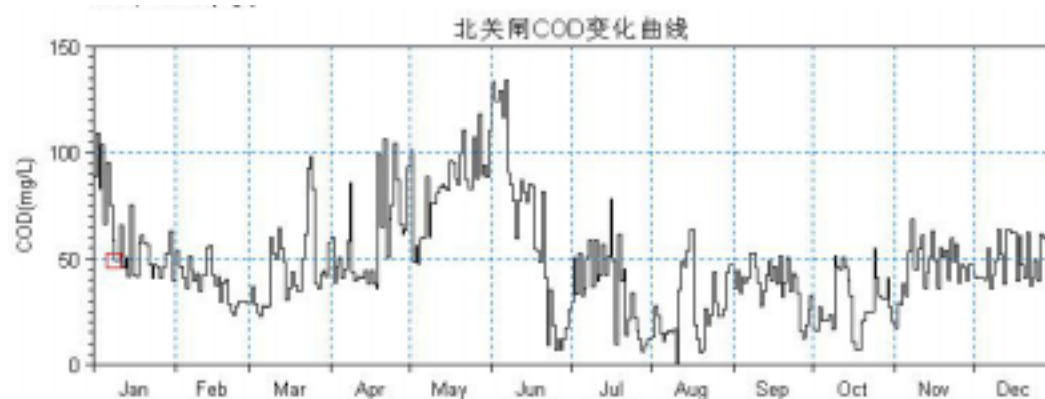


图 5.17 北关闸断面 COD 变化曲线（方案 4）

Fig.5.17 The COD curve of Beiguan gate section(option 4)

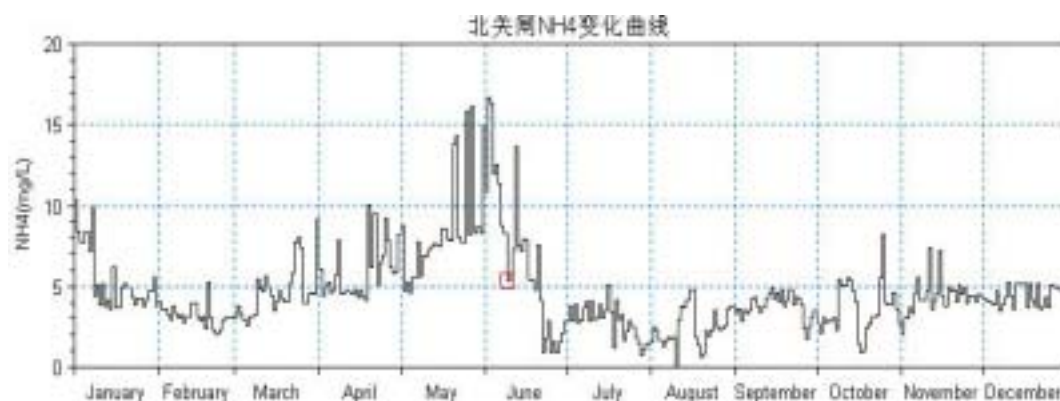


图 5.18 北关闸断面 NH₄ 变化曲线（方案 4）

Fig.5.18 The NH₄ curve of Beiguan gate section(option 4)

3、杨洼闸生态用水缺水水量图

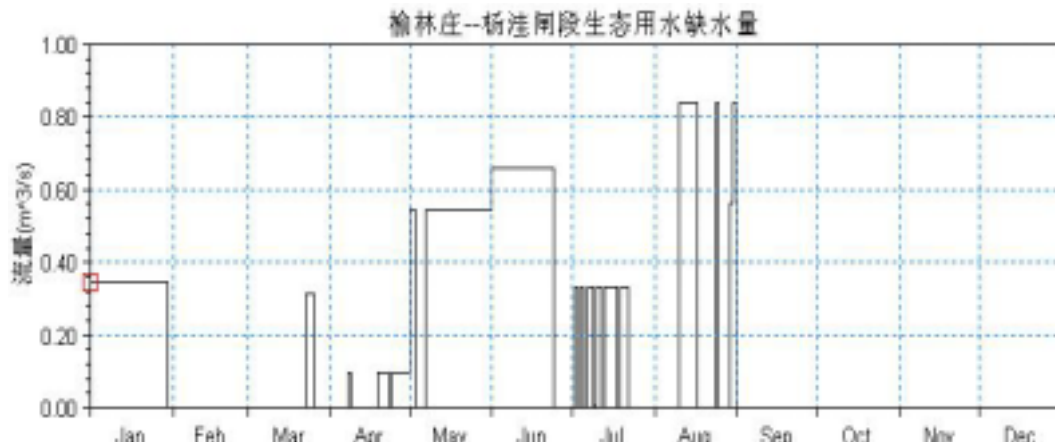


图 5.19 榆林庄-杨洼闸段生态用水缺水水量（方案 4）

Fig. 5.11 The amount of ecological water shortage between Yulinzhuang and Yangwa gate (option 4)

4、引温济潮生态用水缺水水量图

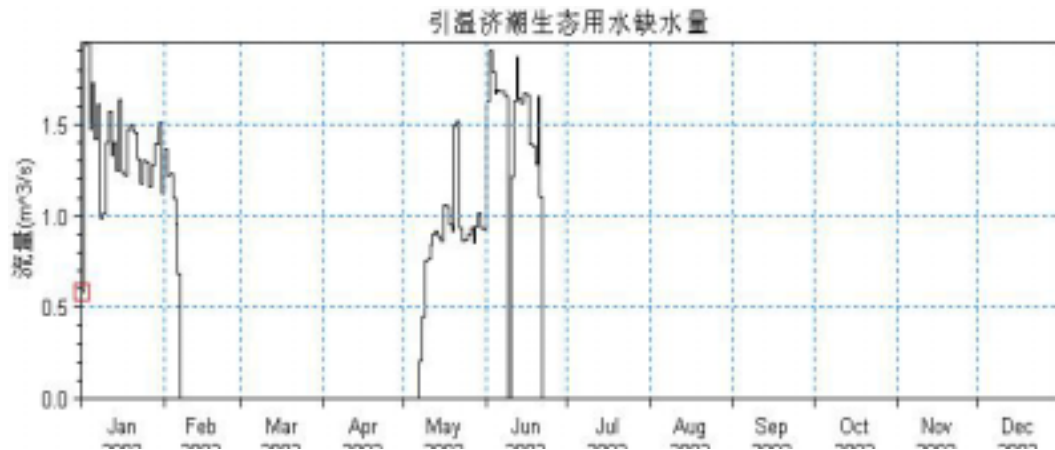


图 5.20 引温济潮生态用水缺水水量图（方案 4）

Fig. 5.12 The amount of ecological water shortage from Wenyu river to Chaobai river(option 4)

5.6.2 结果分析

水库（闸坝）不同调度方案目标函数值见表 5.7，由调度结果可知，在现状来水和水位控制方案下（方案 1），河道外需水量缺水率均较小，防洪安全影响程度也较小，但河道生态需水量缺水率较高，达到了 0.467，河道水环境状况差，只有 0.052。而在 50% 来水和现状水位控制方案下（方案 4），河道生态需水量缺水率和河道外需水量缺水率均小于现状来水条件，水质优于现在来水条件方案，但防洪安全影响程度高于现在来水条件方案。

表 5.7 现在条件下水库（闸坝）调度目标函数值

Tab.5.7 The objective function value of the reservoir(dam) under current conditions

调度方案	河道生态需水量 缺水率 F_1	河道外需水量缺 水率 F_2	河道水环境状况 最优程度 F_3	防洪安全影响程 度 F_4
方案 1	0.467	0.138	0.052	0.023
方案 2	0.453	0.117	0.045	0.138
方案 3	0.432	0.142	0.049	0.019
方案 4	0.258	0.112	0.145	0.165
方案 5	0.244	0.109	0.169	0.187
方案 6	0.259	0.126	0.143	0.142

分析表明，可以根据不同的目标要求，配合河道不同的调度方案，确定合理的调水量并预测水质变化，实现水环境的科学管理，达到改善水环境和节约水资源的目的。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

目前,河道生态需水量已成为水利工程建设中一个新的课题。本文通过对北运河目前的生态需水量进行评价,结果表明北运河水量管理处于“非常严重”的级别下限。面对目前存在状况,以河道系统为研究对象,建立了基于生态水利工程的水量水质联合调度模型。主要研究成果如下:

(1) 通过阐述生态需水量的国内外发展状况及目前生态水利方面存在的不足,基于北运河实际情况,确定了本文的研究路线。

(2) 对北运河基本情况介绍,针对当前的洪水管理体系及当前的生态环境问题,提出了北运河水量管理生态影响评价模型。采用层次分析法确定评价指标权重,利用模糊层次综合评价方法对指标进行评价。通过评价,得出北运河处于“非常严重”级别,应该采取措施对其加以治理,以保护流域水资源的可持续利用和生态系统的健康发展。

(3) 针对北运河生态水量管理评价结果,结合近几年北运河水质状况,提出了水量水质联合调度模型方案,此方案结合多目标函数,建立了水量水质联合优化调度模拟模型。以综合河道内外生态需水量缺失率最小、对防洪安全影响程度最小,河道水环境最优为目标,确定水量的时空分配方案,采用最小费用最大流量原理实现水量水质模型与多目标优化调度模型的耦合。

6.2 主要创新点

通过模糊层次分析法进行生态水量管理评价,采用水量水质联合调度模型,评判了水利工程在维护生态环境中的作用。对调水前后生态需水变化进行了分析,验证了水量水质变化对市区人居生存环境、自然水流环境方面的作用。

主要创新点:

(1) 采用层次分析法确定指标权重,利用多级模糊数学综合评价方法对北运河现行河道进行生态影响评价。

(2) 在以保障生态用水的水量水质联合调度基础上,从完善水利工程生态功能出发,以研究范围生态需水量缺失率最小,对防洪安全影响程度最小,河道水环境最优为目标,建立了基于调水、保护水环境的多目标调度模型。

6.3 展望

本文是在不断的学习和认识的过程中完成的,由于时间紧迫,目前所做的工作还远远不够,随着认识的深化,在学习的过程中,还会遇到许多的问题,有待进一步研究和深化,对此展望如下:

(1) 生态需水量研究内容涉及的范围很广，且对以后的生态环境保护和社会经济发展具有举足轻重的作用，因此应不断地根据社会发展要求进行不同层面的研究。

(2) 文章主要从水利工程的宏观方面考虑对生态环境的影响，至于微观方面没有过多的研究，下一步从宏、微观整体上研究，为以后河流系统的生态环境规划提供必要的依据。

(3) 目前，河流生态需水的研究还没有形成一套比较完整的理论体系，再加上生态系统本身是一个动态的、不断变化着的系统，这就给生态系统的进一步研究带来一定的难度。另外，生态需水涉及到不同的时空分布，因地域、自然条件不同生态需水的计算方法、供水规则也不尽相同，需要进一步从此方面研究。

(4) 充分发挥流域管理机构的作用。目前北运河流域管理体制存在条块分割的现象，生态需水调度要联合各个水务部门统一调度，所以要加强河道管理体制。

(5) 加强生态与水利工程相结合的信息化数字平台研究，使生态建设与河流涉河设施一体化。

攻读硕士学位期间参加的科研实践及发表的论文

参加科研实践:

- 1、山西临汾圪台头河水库研究
- 2、人民胜利渠灌区地下水流数值模拟
- 3、基于分质水资源优化调配的北运河河流水生态适应性管理模式研究

发表论文：

陈南祥，徐敏 基于熵权可拓模型的水资源承载力研究[J].西北农林科技大学学报（自然科学版）.2010 年.

致 谢

在论文完成之际，发现自己马上就要毕业了，回想自己三年来的生活与学习经历，之所以我有今天的收获，其间有导师孜孜不倦的教诲、同门师兄、师姐、师弟师妹的帮助，在此我向对于给予我关心和帮助的这些人们表示衷心的感谢！

首先我要感谢我的导师陈南祥教授。正是恩师的细心指导，使我顺利完成了硕士阶段的学习和研究。在论文的编写过程中，无论是从论文的开题到选题，还是从论文结构和章节的设计，陈老师都提出了不少宝贵的建议和意见。陈南祥导师严谨的教学态度、丰富的工作经验、和宽厚待人的品德给我留下了深刻的印象，为我树立了做人的楷模，也将感染和影响我的一生，这些让我受益匪浅，在此衷心感谢三年来陈老师对我的关心和指导，谨向陈老师致以最诚挚的谢意和最崇高的敬意！

另外，感谢北运河课题组所有老师对我无私的帮助和耐心的指导，特别是屈吉鸿老师在论文写作过程中的悉心指导。感谢北京市水利水电科学研究院及相关单位，在报告编写过程中，提供了许多基础资料。

还要感谢李跃鹏、杨莉等师兄、师姐，对我的学习给予巨大的关心与帮助，谢谢你们！

感谢 08 级和本专业的同学，学习上互相鼓励，共同进步，生活中互相照顾，陪我度过丰富多彩的三年研究生生活，愿我们友谊长存！

感谢师弟师妹们在论文写作过程中给予的帮助，谢谢你们！

感谢论文评阅和答辩委员会的各位专家，教授，谢谢你们百忙之余评阅论文！

最后，还要感谢我的父母，谢谢他们多年来对我学习和生活上的支持和鼓励，培育我做人的品格，尽可能的让我有最多的时间投入到紧张的学习中，谢谢你们！

最后，谨以此论文献给所有帮助、关心和支持我的人，祝愿你们幸福、健康、平安！
谢谢！

作者：徐敏

二〇一零年五月于郑州

参考文献

- [1]董哲仁.生态水工学探索.北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2]方子云主编.水资源保护工作手册.南京:河海大学出版社,1988,627-629.
- [3]中华人民共和国行业标准.江河流域规划环境影响评价,水利电力出版社.1993,45-92.
- [4]陈敏建.水循环生态效应与区域生态需水类型[J].水利学报.2007,38(3):282-285.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]刘昌明,何希吾.21世纪中国水问题方略[M].北京:科学出版社,1996:82-96.
- [8]崔宝山,杨志峰.湿地生态环境需水量研究[J].环境科学学报.2(22)213-218.
- [9]陈庆伟,刘兰芬,等.筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度研究[J].北京师范大学学报(自然科学版).2007,43(10)578-582.
- [10]中国农业大学[N],中国农大新闻网,2000.12.19.
- [11]省政府与水利部共商云南水利建设[N],云南省人民政府网,2002.1.21.
- [12]刘玉年,夏军,等.淮河流域典型闸坝断面的生态综合评价[J].解放军理工大学学报.2008,6(9)693-697.
- [13]可素娟,薛云鹏,等.黄河下游生态调度的实践与展望[J].黄河报.2008,3.
- [14]郭文献,夏自强,等.三峡水库生态调度目标研究[J].水科学进展.2009,4(20)554-559.
- [15]张永勇,陈军锋,等.温榆河流域闸坝群对河流水量水质影响分析[J].自然科学学报.2009.10(24)1697-1705.
- [16]B.H.Seghs,特立尼达北部的河流——鱼类保护研究[A].宁远,沈承珠,谭炳卿译.河流保护与管理[C],北京:中国科学技术出版社,1997,55-61.
- [17]崔树彬.关于生态环境需水量若干问题的探讨[J].中国水利.2001,8:71~75.
- [18]韩娜娜.山西桑干河流域水环境承载力研究.西安理工大学硕士论文[D].2005.
- [19]Mitsch W J.Ecological Engineering[M].John Wiley&Sons Ltd,1989.
- [20]Gore J A.Setting priorities for minimum flow assessments in SouthernAfrica[J].SouthAfrican Journal ofScience,1989,85:614~615.
- [21]Peter H.Gleick.Water in Cdsis:Paths sustainable water use.Ecological Applications,1998,8(3):571~579.

- [22]Rashin , P . D . , Hansen , Margolis . Water and Sustainability : Global Patterns and Longrange Problems . Natural Researchs Forum , 1996 , 20(1) ; 1 ~ 15.
- [23]Whopple , DuBois , Grigg . A Proposed to Coordination of Water Resource Development and Environmental Regulations . Journal of the American Water Resources Association , 1999 , 35(4) : 713 ~ 716.
- [24]Baird A J , Wilby R L . Eco—hydrology : Plant and water in terrestrial and aquatic environmental . London and New York : Routledge Press , 1999 , 78 ~ 156.
- [25]Denis A Hughes , Pauline Hannart . A desktop model used to Provide an initial estimate of the ecological in stream flow requirements of rivers in South Africa [J]. Journal of Hydrology , 2003 , (270):167- 181.
- [26]Hirose Shin-ichi Sato Kynzo Takenaka Tacko , Restoration of water Weeds in a Remodeled Channel . 2002.
- [27]M.Zalewski, Ecohydrology-the Scientific Background to Use Ecosystem Properties as Management Tools toward Sustainability of Water Resources , Ecological Engineering 16(2000):1-8.
- [28]徐志侠,董增川,唐克旺等.生态用水决策过程、研究层次及生态需水重要概念研究[J].水利水电科学技术.2005,36(3):9-12.
- [29]Covich A. Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources . Water and ecosystems. In: P.H. Gleick editor. Oxford University Press. New York , 1993. 40-55.
- [30]Gleick P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use , Ecological applications. 1996 , 8(3):571-579.
- [31]钱正英,张光斗主编.中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[R].北京:中国水利水电出版社,2001,25—129.
- [32]李广贺.水资源利用工程与管理[M].清华大学出版社,1998.
- [33]丰华丽.河流生态环境需水理论方法及应用研究[D].河海大学硕士学位论文.2002.
- [34]董哲仁.生态水工学的理论框架[J].水利学报.2003,1,1-6.
- [35]杨志峰,刘静岭,孙涛等.流域生态需水规律[M].北京:科学出版社.2006,97-114.
- [36]夏星辉,杨志峰,沈珍瑶.从水质水量相结合的角度再论黄河的水资源[J].环境科学学报.2005,25(5):595-600.
- [37]夏星辉,张曦,杨志峰等.从水质水量相结合的角度评价黄河的水资源[J].自然资源学报.2004,19(3):293—299.
- [38]杨志峰,崔保山,刘静玲等.生态环境需水量理论方法与实践[M].北京:科学出版社.2003,36-37.

- [39]王西琴,张远.从水量与水质相结合的角度认识生态需水[J].自然生态保护.2006,2B,75-78.
- [40]焦树锋.AHP法中平均随机一致性指标的算法及Matlab实现[J].太原师范学院学报.2006,5(4):45-47.
- [41]杨秀梅,梁收运.基于模糊层次分析法的泥石流危险度评价[J],地质灾害与环境保护.2008,2(19):73-78.
- [42]吕燕.基于二元水循环的河流生态需水量质综合评价[D].西南交通大学硕士学位论文.2007.
- [43]郑志飞.黄河下游水量水质与生态联合调度系统研究[D].河海大学硕士学位论文.2007.
- [44]杨志峰,崔宝山,刘昌明,等.生态环境需水量理论、方法、与实践[M].科学出版社,2003.
- [45]谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].华中科技大学出版社,2006.
- [46]Jensen.耗水量与灌溉需水量[M].北京:北京农业出版社,1982.
- [47]梁学田.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社.1992.
- [48]孙宗风.基于生态的水利工程水量水质联合调度及效应评价机制研究[D].河海大学博士学位论文.2006.
- [49]商伟.北运河杨洼闸下至土门楼闸河段综合治理规划研究[D].天津大学硕士学位论文.2009.
- [50]朱德通.最优化模型与实验[M].上海:同济大学出版社,2004.
- [51]孙夏利.西安泾渭生态区橡胶坝库区渗漏量及生态需水量研究[D].西安理工大学硕士学位论文.2010.
- [52]陈贵龙.扎龙湿地功能评价及生态需水量研究[D].大连理工大学硕士学位论文.2006.
- [53]张吉军.模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学.2000,14(2):80-88.
- [54]陈西祥,邱静,刘冠军.基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究[J].兵工学报.2010,31(1):68-73.
- [55]张震,于天彪,梁宝珠,等.基于层次分析法与模糊综合评价的供应商评价研究[J].东北大学学报(自然科学版).2006,27(10):1142-1145.
- [56]付爱红,陈亚宁,李卫红.基于层次分析法的塔里木河流域生态系统健康评价[J].资源科学.2009,31(9):1535-1544.
- [57]刘俊娟,王炜,程琳.基于梯形隶属函数的区间模糊评价方法[J].系统工程与电子技术.2009,31(2):390-392.
- [58]陈可飞.基于小流域设计洪水的郭庄泉渗漏库拦蓄洪水标准[D].华北水利水电

学院硕士学位论文.2009.

- [59]Mitsch W J,Jorgensen S E.Ecological Engineering and Ecosystem Restoration[M].
Published by John Wiley&Sons,Inc.,Hoboken, NewJersey, 2004, 134-137.
- [60]Malin Falken,Water Management and Ecosystems:Living with Change.[A].Global
Water Partnership Technical Committee Background Papers[M].No9,2003,6-20.