

HELIU JIANKANG PINGJIA YU
SHENGTAI HUANJING XUSHUI LILUN JI
YINGYONG YANJIU

河流健康评价与 生态环境需水理论及 应用研究

郑志宏 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

河流健康评价与 生态环境需水理论及 应用研究

郑志宏 著

内 容 提 要

本书重点研究河流生态环境需水理论和基于此的河流健康评价问题，以滦河下游区域为研究对象，引入中位数、众数理论计算生态需水，应用频次分析法筛选评价指标，应用“纵横向”拉开档次法、改进主成分分析法及主客观组合赋权模糊评价法进行河流健康评价。全书共分为 8 章，包括绪论，河流健康用水理论研究，河流健康评价指标法模型计算，河流生态环境需水理论探析，河流生态基流计算方法，滦河下游河道内生态环境需水计算，滦河下游河流健康评价，结论与展望。本书可供水利及相关专业院校教师及研究人员，相关领域科研机构、科研人员阅读参考。

图书在版编目（C I P）数据

河流健康评价与生态环境需水理论及应用研究 / 郑志宏著. — 北京：中国水利水电出版社，2014. 12
ISBN 978-7-5170-2845-1

I. ①河… II. ①郑… III. ①河流—生态环境—需水量—研究 IV. ①X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第311488号

书 名	河流健康评价与生态环境需水理论及应用研究
作 者	郑志宏 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 11 印张 261 千字
版 次	2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前言

河流是孕育生命的摇篮，它的健康与人类社会可持续发展是密切相关的，同时也直接影响到整个生态系统的健康。本书重点研究了河流生态环境需水理论和基于此的河流健康评价问题，以滦河下游区域为研究对象，选取了7个代表性站点进行河流水质状况评价，并进行了8个区段的河流健康综合评价计算，从而反映滦河下游河流整体健康状况，主要研究成果如下：

(1) 引入了中位数、众数理论进行河道内生态环境需水计算，改进了传统 Tennant 法多年平均流量确定中极端异常值的影响，使典型流量选取更加具有代表性，通过与传统方法的比较，该改进方法计算结果更加合理。

(2) 提出了应用频次分析法筛选评价指标的思路，使指标体系的构建避免了主观性过强的缺点，具有一定的科学性。

(3) 将基于立体时序数据表的“纵横向”拉开档次法应用于河流水质状况评价中，充分包含了被评价对象观测值的信息，不但得到了评价优劣排序结果，同时还反映了各研究对象的变化趋势。

(4) 提出改进主成分分析综合评价方法。通过对滦河下游水质状况评价，将包含有确定性评价标准阈值的数据代入 SPSS 数理统计软件，应用主成分分析法进行了水质状况评价，应用此改进方法解决了以往主成分分析法只能得到评价对象排序结果，不能得到具体评价等级的问题，丰富了计算结果的可用信息量。

(5) 提出了基于主客观组合赋权的模糊综合评价方法，该方法通过结合层次分析法主观赋权和熵值法客观赋权，利用两者的几何平均值作为综合评判权向量，充分考虑了主观赋权和客观赋权的双重影响因素，并将其与模糊综合评价相结合，应用于滦河下游河流健康综合评价，得到了可信的评价结果。

(6) 以滦河下游为例，计算得到各控制站河道内最小和最适宜生态环境需水量分别是：大黑汀站为 $42354 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ 、 $59790 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ，冷口站为 $1056 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ 、 $1500 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ，桃林口站为 $9900 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ 、 $14040 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ，水平口站为 $1962 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ 、 $2946 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ，崖口站为 $558 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ 、 $816 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ，邱庄水库站为 $1008 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ 、 $1416 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ，小定府站为 $2028 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ 、

2898 万 m^3 /年, 杨家营站为 246 万 m^3 /年、366 万 m^3 /年, 陡河水库站为 708 万 m^3 /年、984 万 m^3 /年, 石佛口站为 510 万 m^3 /年、708 万 m^3 /年, 滦县站为 62658 万 m^3 /年、88548 万 m^3 /年。

(7) 以滦河下游为例, 通过应用改进主成分分析法和组合赋权模糊评价两种综合评价方法分别进行计算, 结果是一致的, 各研究区段河流健康状况评价结论均为亚健康, 偏于不健康状况。

本书分别得到水利部公益性行业科研专项经费项目资助(编号: 200801015), 河南省教育厅自然科学研究计划项目资助(编号: 2010B570003) 和华北水利水电大学高层次人才科研启动项目资助。在研究及编写过程中得到了导师西安理工大学黄强教授, 华北水利水电大学邱林、陈南祥教授的悉心指导和帮助, 在此对他们表示最诚挚的感谢。

由于作者水平有限, 书中谬误难免, 望广大读者给予批评指正。

作者

2014 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 河流健康用水研究背景	2
1.2 河流健康用水研究目的与意义	2
1.3 国内外研究进展	3
1.4 本书主要研究内容、技术路线和研究思路	9
第 2 章 河流健康用水理论研究	12
2.1 河流健康概念及内涵	12
2.2 河流健康用水研究尺度分析	15
2.3 河流健康用水研究特征	17
2.4 河流面临的主要生态环境问题及成因分析	19
2.5 河流健康评价方法研究	24
2.6 本章小结	37
第 3 章 河流健康评价指标法模型计算	39
3.1 基于熵权法的属性识别综合评价方法	47
3.2 序列运算理论	49
3.3 改进的集对分析模糊综合评价方法	62
3.4 “纵横向”拉开档次综合评价方法	65
3.5 改进的主成分分析评价方法	66
3.6 本章小结	68
第 4 章 河流生态环境需水理论探析	69
4.1 河流生态环境需水概念辨析	71
4.2 河流生态环境需水内涵及特征	72
4.3 河流生态环境需水理论基础	78
4.4 河流生态环境需水量与水资源量关系	84
4.5 河流生态环境需水分区	86
4.6 本章小结	89
第 5 章 河流生态基流计算方法	91
5.1 Tennant 法的改进	91
5.2 湿周法计算方法	95

5.3 水深一流速法计算方法	98
5.4 本章小结	98
第 6 章 滦河下游河道内生态环境需水计算	100
6.1 改进 Tennant 法实例应用	100
6.2 几种改进 Tennant 法计算结果比较	124
6.3 本章小结	125
第 7 章 滦河下游河流健康评价	126
7.1 滦河下游健康评价指标体系	130
7.2 水质状况评价	132
7.3 改进主成分分析健康综合评价	146
7.4 基于组合赋权模糊健康综合评价	153
7.5 本章小结	157
第 8 章 结论与展望	159
8.1 结论	159
8.2 主要创新点	160
8.3 展望	160
参考文献	162

第1章 绪 论

河流健康问题是关系到人类社会与经济社会可持续发展的一个十分关键的问题,自从原黄河水利委员会主任李国英提出维持黄河健康生命的理念后,河流健康已经成为一个热门话题。近些年来,随着人类社会的不断发展,人与自然的关系越来越受到挑战,有限的资源与无限的发展之间的矛盾越来越突出,河流作为人类文明的源泉,是生命的支撑系统,人类活动对河流的影响日趋严重,长期不合理的开发利用,大量生产、生活和农业污水的排放,对天然河流的健康构成极大伤害,导致河床抬高、河道萎缩、生态环境恶化等一系列问题。因此河流健康状况评价也逐渐成为专家学者研究的重点。但是一直以来河流健康的概念仍然处于一个模糊的状态。文伏波认为健康的河流应该既是生态良好的,又是造福人类的河流,是水资源可持续利用的河流;韩其为认为河流健康的含义应该随着河流生命的阶段、社会发展、科学进步、人类对其功能的要求而变,不可能用一些固定、通用的指标来要求,不同时期河流的功能是有差别的,因此河流健康的含义也是不一样的;许炯心认为河流健康的概念是借鉴生态系统健康的概念而提出的,可作为生态系统健康研究的一部分,就其属性而言河流健康应该包含两层含义:既有自然意义上的河流健康,即河流自身的健康;也有社会经济意义上的河流健康,即人一水关系的健康;李国英认为河流健康是指在河流生命存在的前提下,河流社会功能与自然生态功能能够取得平衡,简单说就是河流在满足基本水量的前提下,具有稳定的河道、适度的洪水、清洁的水质、健康的流域生态系统和持续的造物能力等;王光谦认为河流健康的内涵就是体现人水和谐。

研究河流健康评价指标体系问题就涉及承载力的探讨,承载力一词最早出自生态学,其特定含义是指在某一环境条件下,某种生物个体可存活的最大数量。承载力概念的演化与发展是人类对自然界改造和发展的必然结果,早期应用范围也只限于生态领域,但随着土地退化、环境污染和人口膨胀等原因,人类学家和生物学家将承载力的概念发展并应用到人类生态学中,承载力一词也总是与环境退化、生态破坏、人口增加、资源减少、经济发展联系在一起,承载力概念的意义也发生了相应变化。不同承载力概念之间在意义上有较大转变,但实际上是一脉相承的,这个“脉”就是“发展”,在不同发展阶段,产生了不同的承载力概念和相应的承载力理论,环境承载力、生态承载力、水资源承载力、土地承载力等概念相继被提出。承载力概念的提出是以可持续发展为目标的,两者是相互紧密联系在一起的,在某种意义上是相一致的,是一个事物的两个方面,可持续发展解决的核心问题是人口、资源、环境与发展问题,而承载力要解决的核心问题也是人口、资源、环境与发展问题,只是考虑问题的角度不同。因此进行河流健康评价研究是保证流域生态环境和社会经济可持续发展的前提,在构建河流健康评价指标体系时除了要考虑河流自身的健康,还要充分考虑其所承载的社会经济状况,即其服务社会功能,这样才具有现实意义和科学价值。



1.1 河流健康用水研究背景

在研究河流健康用水问题中涉及到水质和水量以及水的合理分配和利用问题,既要考虑到生态环境需水又要最大程度的满足经济社会发展对水资源的需求,因此,人们不得不研究河流或流域的生态环境需水,国外关于生态环境的需水研究,可以追溯到18世纪后期,19世纪末最小流量的概念被广泛应用。近些年来国内对生态环境需水的研究成果也很多,在确定生态环境需水的最小生态流量方面大多借鉴国外的一些方法,分为水文学方法、水力学方法、栖息地偏爱法、曲线相关法等,国内使用和探讨比较多的是水文学方法中的Tennant法和水力学方法中的湿周法,这两种方法的核心问题在于对多年平均流量和最小流量斜率点的选取,在这些方面还有待于进一步研究;在河流健康评价方面,国内近些年做的也很多,但还没有形成一个标准的评价指标体系,在综合评价理论方法上也值得进一步总结和完善,并且很多河流健康评价研究的针对性还不够,应该在探讨综合评价指标体系时紧密结合评价对象的实际情况,针对具体研究对象建立评价指标体系,确定相对比较客观的综合评价方法,减少人为的主观因素影响。

1.2 河流健康用水研究目的与意义

1.2.1 研究目的

在人类经济社会发展的过程中,生态系统的功能受到破坏必将威胁到人类自身的生存安全,河流作为孕育人类生命的源泉,也在经济社会的发展中面临着巨大的挑战。当前,我国的水与生态问题使气候变化和人类活动影响下的陆地水循环时空机理更加复杂,不健康的水循环问题越来越严重,水资源可持续利用中的水与生态建设和保护的矛盾日益突出。例如,中国北方海河等流域,河流来水量减少,水资源量衰减严重。河流来水量的大量减少,给城市和中下游地区的生态与环境和社会经济发展带来极大的危害。如河道断流、湿地退化、湖泊干枯、地下水位严重下降等。另一方面,干旱和洪涝灾害等水文极值事件频率增加,水灾害问题十分突出。由于水循环的变化和水资源需求矛盾的加剧,导致我国特别是北方地区生态用水被挤占,致使河道、湖泊萎缩,入海水量减少,沙漠化加剧,植被覆盖度降低,生物多样性遭受破坏,沙尘暴频繁,生态系统恶化问题突出。出现了“有河皆干、有水皆污、湿地消失、地下水枯竭、沙尘暴肆虐”的严重水生态与环境危机。到20世纪90年代,人们逐渐认识到水资源与生态环境系统的互动关系,意识到大量挪用生态环境用水是导致生态环境恶化的一个十分重要的原因,从而促进了水资源管理思维模式的转变,开始强调生态环境需水的重要性,并且开始研究生态环境需水与人类经济社会需水协调配置的问题,并且随着我国北方特别是西北干旱、半干旱地区日益严峻的水资源与水生态环境问题,迫使人们关注生态环境需水理论的研究,这一时期开始,有关生态环境需水的理论和方法开始得到快速发展。在考虑河流健康用水时其核心问题是如何科学合理地确定生态环境需水量,许多内陆河由于生态用水被挤占,出现严重的生态环境问



题, 辽河、海河、黄河等北方流域, 由于自然气候条件, 降雨量较之南方各流域偏少, 加之近些年来工业、农业的快速发展, 使本来就很紧张的人—水矛盾更加突出, 许多流域连续出现断流或水质恶化等情况, 严重影响了人们的生产和生活。因此十分迫切的需要对河流生态环境需水及河流健康问题进行深入细致地研究。

1.2.2 研究意义

在研究河流健康用水问题的同时, 还应该从河流生态系统可持续发展的角度考虑问题, 因此还要对河流生态功能和服务社会功能进行系统地分析和研究, 可持续发展就是满足当代人的需求又不危害后代人需求的发展, 也就是科学发展, 而维持河流健康生态环境是可持续发展的基础, 开展河流健康评价研究有利于实施可持续发展。另外, 也可以从生态环境承载力角度研究河流健康状况, 过去的一些承载力角度的河流健康评价研究, 基本上大多是脱开生态系统的整体效应而进行的单要素研究, 而这样很容易出现顾此失彼的现象, 结果往往造成生态平衡的破坏和衰退。赵桂久就曾指出, 在以往的有关承载力的研究中, 基本上偏重于从单项资源(如水资源、土地资源、生物资源)现有总体数量对人口的承载力方面进行分析和研究, 而忽视了生态系统的整体效应对系统承载力的影响, 因而造成了生态系统总是处于超负荷状态。因此, 在研究河流健康用水的过程中, 开展以生态系统为对象, 以生态承载力为基础的研究具有重要意义。目前普遍认为可持续发展需要解决的核心问题是人口—资源—环境协调发展(PRED)的问题, 并将其作为可持续发展的基本理论, 但PRED理论基本上偏重于人口、资源、环境与发展之间的协调关系研究, 基于承载力的研究很少, 以往一些学者提出判断是否可持续发展的重要准则之一是看经济发展速度与资源消耗速度是否相一致或相协调, 但两者即便是相协调的, 也不能说这种发展是可持续的, 因为资源的量是有限的, 不能脱离自然资源与环境的束缚和生态系统的持续支撑, 所以河流健康除包含自身的健康外, 还需要保持经济、资源与环境的协调发展。我们在研究河流健康用水的时候, 就是要研究河流用水的可持续性, 就是要保持河流生态系统的平衡状态, 就是要找到人类活动与保持河流健康生命相和谐的用水方式与方法。所以, 对河流进行基于生态环境需水的健康评价理论研究是十分迫切和必要的。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 河流生态环境需水研究动态

1.3.1.1 河流生态环境需水概念

河流生态环境需水的概念一直都是众说纷纭, 并不是十分明晰, 存在生态需水、环境需水、生态环境需水等相近的概念, 国外对生态环境需水的研究多使用河流最小流量、最小可接受需水量、枯水流量等词语, 也有使用基本生态需水、生态可接受流量范围、环境需水等术语的。国内有“用水”、“需水”和“耗水”三种提法: 关于“用水”有“生态用水”、“环境用水”、“生态环境用水”等多种提法; 关于“需水”有“生态需水”、“环境需



水”、“生态环境需水”、“生态及环境需水”、“生态与环境需水”等多种提法；关于“耗水”的概念，国内认识比较一致，认为生态耗水是生态系统实际消耗的水量。“生态”在《中国大百科全书》中未列词条，但一般认为“生态”是与生物有关的各种相互关系的总和，强调的是“关系”。环境是指某一特定生物体或生物群体以外的空间，以及直接或间接影响该生物体或生物群体生存的一切事物的总和。《中国大百科全书》对环境的定义是：“围绕着人群的空间及其中可以直接、间接影响人类生活和社会因素的总体。”并指出：“按环境主体可分为以人作为主体的人类生存环境和以生物为主体（不把人以外的生物看成环境要素）的生物界生存环境”。环境总是相对于某中心事物而言，与某一中心事物相关的周围事物的集合就称为这一中心事物的环境。中心事物是环境最主要的属性，代表了环境服务的对象和重点，是环境的主体，与中心事物相关的周围事物就是环境客体，这些客体可以是物质的，也可以是非物质的。离开了主体或中心事物，环境就失去了明确的含义，也就无所谓环境。因此环境只具有相对的意义。或者说是一个相对的概念。“生态环境”的概念目前国内有五种不同的观点：①认为“生态”、“环境”是两个不同概念，“生态”与“环境”应根据各自的内涵分别使用。如果“生态”与“环境”均须提及，可称之为“生态与环境”。②认为“生态环境”的准确表达应当是“自然环境”。从严格的意义上说，应当用“环境与生态”，或归总为“环境”。③认为从逻辑含义上分析，“生态”包含生物、环境、（生物与环境之间的）关系三个要素。“环境”只是其中的一个要素，它是相对于主体而言的。“生态”一词根本不能用作“环境”的修饰语或限制词。④认为根据中国语言的特点，“生态环境”就是“生态和环境”或“生态或环境”。⑤认为“生态环境”是“由生态关系组成的环境”的简称，英文为“ecological environment”，其组词为偏正结构，生态是形容词，环境是名词。综上所述，笔者认为“生态”是侧重于有机系统的，而“环境”是侧重于无机系统的，是以“生态系统”为对象的“环境”，两者是共存关系的，是统一的，在本书中以河流健康为目标，而河流就是一个复杂的生态系统，包含有机和无机系统，所以使用“生态环境”一词。

1.3.1.2 河流生态环境需水分类

生态环境需水的分类由于自然生态系统的复杂性以及生态环境需水极大的不确定性，很难直接从整体上量化某个生态系统或某个区域的生态环境需水。为此，需要对其进行分解、简化，以便求解。一个基本的思路是将生态环境需水划分为一定的类别，各类别需水分别计算，然后综合而得整个区域或者整个生态系统的需水量。生态环境需水的分类是计算生态环境需水量的基础，根据研究对象、研究目的与研究方法的不同，生态环境需水可有不同的分类原则。贾宝全等针对干旱区将生态用水分为人工绿洲生态用水、荒漠河岸林生态用水、河谷林生态用水、低平地草甸生态用水、城市生态用水、河湖生态用水、荒漠植被生态用水七类。在研究河流生态环境需水时，目前常用的分类方法是根据功能来划分。河流系统具有输水、输沙、泄洪、自净、航运、景观和生态等功能。河流生态环境需水按功能可划分为河流水污染防治用水、河流生态用水、河流输沙用水、河口区生态环境用水以及河流景观与娱乐环境用水等。陈丽华等在计算北京市生态用水时将生态用水类型分为六类：山区森林植被建设用水、水土保持生态用水、平原造林绿化生态用水、城镇绿化生态用水、河流基流生态用水、河流输沙生态用水。王芳等根据生态环境需水的来源不



同而将其划分为可控生态需水和不可控生态需水。许新宜等按照空间尺度分,可分为景观生态环境需水、流域生态环境需水和区域生态环境需水。张丽等认为生态环境需水从空间尺度上分为广义和狭义生态需水;根据用水功能分为生态需水 and 环境需水;根据生态需要和实际用水分为生态需水和生态用水;根据需水的来源或人类对水源的控制力分为可控和不可控生态需水;根据生态系统形成的原动力分为天然和人工生态需水;根据需水的空间位置分为河道内和河道外生态需水;根据生态系统的类型可分为水域和旱地生态需水。唐克旺等认为生态环境需水按空间的一级分类可分为河道内和河道外生态需水,若按尺度可分为宏观和微观生态需水。河道内生态需水又可分为水土保持需水、河道生态与环境需水、流域湿地保护需水、河口生态需水及地下水生态水位;河道外生态需水指城市生态环境需水、防护林体系需水、湿地补水等。综观上述研究对生态环境需水的分类情况可以看出,由于研究目的、研究对象与研究方法的不同,生态环境需水分类方法多种多样。总的说来,常用的分类方法主要是根据生态系统的类型以及生态环境用水的功能来划分。

1.3.1.3 河流生态环境需水研究方法

1. 河道内需水

(1) 河流生态基流。在国外河流生态基流计算方法主要包括:水文学方法、水力学方法、生境模拟法(栖息地偏爱法)和整体分析法(BBM法)4种。水文学方法有Tennant法(又称Montana法)、枯水频率法(又称7Q10法)、德克萨斯(Texas)法、水生物基流法(ABF法)、可变范围法(RAV法)等。Orth和Maughan认为由于IFIM法所需要的定量化的生物资料的缺乏,使这种方法的应用受到一定的限制。King和Tharme指出,传统的IFIM法将其重点放在一些河流生物物种的保护,而没有考虑诸如河流规划以及包括河流两岸在内的整个河流生态系统,由此计算出的推荐的流量范围值,并不符合整个河流的管理要求。CASIMIR(Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements in diverted stream)法,基于现场数据—流量在空间和时间上的变化,采用FST建立水力学模型、流量变化、被选定的生物类型之间的关系,估算主要水生生物的数量、规模,并可模拟水电站的经济损失。整体分析法(BBM法)主要是南非水务及林业部门研发的一种方法,其优点是对大小生态流量均考虑了月流量变化,但该方法主要是针对南部非洲环境开发的,计算过程比较复杂,应用于国内需根据当地实际情况进行改造。目前最适合于我国的计算方法是水文指标法,其中Tennant法应用最为广泛,王占兴在分析我国高寒地区水文气象特征的基础上,对Tennant法进行修正来确定高寒地区中小河流生态环境需水量,指出确定某河段特征流量不仅要根据特征流量下的湿周比率,同时平均流速、平均水深也要达到一定的下限。郭利丹等认为Tennant法在生态径流研究中起着重要作用,但是在生态径流评价中存在一定局限性,Tennant法的同期均值比相对年均值比合理,还利用逐月最小生态径流算法、逐月频率算法对Tennant法进行修正,在此基础上提出了我国北方中小型河流生态径流量计算的一些改进方法:改变连续历时时段算法、逐月最小(大)生态径流算法、确定河流生态径流量上界的参照法和逐月频率计算的组合法。门宝辉、刘昌明结合南水北调西线河道内生态需水量计算,对Tennant法计算标准进行了修正,采用实地调查的方法,发现南水北调一期工程调水区气温较低,引水河流中鱼类洄游及水生生物的活动期主要集中在7—8月,而且每年12月到



次年3月河道均处于冰冻期,所以将 Tennant 法的用水期修正为7—8月,并应用于实例研究。黄强等为了弥补 Tennant 法不能反映河流多沙特性和流量季节特性的不足,引入了环境比降和季节系数对 Tennant 法进行改进并应用于黄河下游三门峡至利津等站,结果表明改进后的 Tennant 法能够适应地形多变、流量季节性变化的河流,拓宽了 Tennant 法的适用范围。水力学方法代表性的是以曼宁公式为基础的 R2CROSS 法和湿周法,其中湿周法在国内研究比较多。李梅、黄强等提出了一种同时考虑河道本身参数(湿周、糙率、水力坡度)和维持某一生态功能所需河流流量的方法,避免了湿周法不能反映复式断面真实水位流量关系的缺点。郭文献等探讨了湿周法确定河道最小生态流量的计算步骤,采用斜率为1法和曲率最大法来确定湿周流量关系曲线上变化点所对应的最小生态流量,以长江中下游河道为例进行计算,结果表明曲率最大法确定准则计算结果合理,而采用斜率为1法确定准则计算结果偏大。史方方等针对汉江流域实际情况,选用改进湿周法对汉江上游3个水文断面的最小生态流量进行定量估算,与 Tennant 法相比较,表明采用曲率湿周法更加合理。宋兰兰等在改进湿周法的基础上研究了河流生态基流的概率分布,采用主成分分析和多元回归相结合的方法,为生态基流预测提供了思路。王庆国等在研究标准抛物线形河道断面计算河段的生态需水时发现原湿周法的不足,在分析原因后建议将拐点的斜率取为多年平均流量与相应湿周长比值的平方根,并以此进行计算,结果反映出河流特征的差异,其变化趋势符合对河流生态需水规律的一般性认识。生境模拟法(栖息地偏爱法)国内研究比较少,王西琴、张远、陈敏建等对其进行了总结。

(2) 河流输沙需水。石伟、王光谦在研究黄河下游生态需水量时,从输沙水量的概念出发,给出了考虑河段淤积、引沙后的最小输沙水量计算式。常炳炎根据实测资料分析得到,平均流量为 $1750 \sim 3370 \text{ m}^3/\text{s}$,最大流量为 $3700 \sim 6600 \text{ m}^3/\text{s}$,一般均不漫滩,平均含沙量为 $72 \sim 121 \text{ kg/m}^3$,河道淤积比在20%左右的洪水为高效输沙水流。倪晋仁等指出河流输沙用水是从中国河流特殊的生态系统考虑而提出的,是保证河流输沙功能的基本要求,否则将导致河道淤积和河流系统功能丧失。

(3) 河流污染防治需水。它主要包括自净需水和引水稀释用水两部分。自净需水是指在正常排污的情况下,为了使水质达到一定标准,维持正常水生生态条件,河道内必须保留的最小水量。引水稀释用水是指在过量排污的情况下,即使削减污染源,水体也难以在短时间内自行恢复正常,此时考虑从流域外调入水量来恢复河道内生态环境时的水量。本书不考虑引水稀释用水,主要考虑自净需水部分。

(4) 水保及地下水生态水位需水。作为生态系统自身固有的特征,流域生态环境需水直接决定于流域内各类生态系统的组成及其状态。从影响生态环境需水大小的角度来考虑,各生态系统主要通过两个特征来影响生态环境需水:一是生态系统的类型,二是该生态系统所占的面积;从某种角度来看正是流域的土地利用、土地覆盖结构。也就是说,只要流域土地利用结构确定,则可以较为方便地计算出其生态环境需水量。生态地下水位应从三个方面定量分析:一是考虑补排平衡,要求适宜的埋深,水位不能过低;二是考虑防止盐碱化,水位不能过高;三是要维持和支撑河道生态用水。流域生态需水是一个复合指标:地表水生态需水特征值、生态地下水位,它们之间包含转化关系。半湿润半干旱区流域水资源大规模开发利用引发的河流生态问题的实质,由两个关键点形成:一是上游下泄



量减少；二是平原区地下水超采导致地下水河岸调节作用散失。

(5) 河流水面蒸发需水。水面蒸发是指流域内江河、湖泊、水库等水体的蒸发，大水体蒸发量的观测往往非常困难，很难得到实测资料，通过观测小面积水面蒸发并寻求出小面积水面蒸发与大水体水面蒸发之间的关系来间接推求大水体水面蒸发的方法即为蒸发器(皿)折算法。我国现行的水面蒸发资料是用种类不同规格的蒸发器测得的，主要蒸发器有苏联埋地式蒸发器、E601 蒸发器、直径为 80cm 带套盆的蒸发器和直径为 20cm 蒸发皿，我国水文部门一般使用直径为 80cm 带套盆的蒸发器，北方结冰期有的改用直径为 20cm 蒸发器，E601 型蒸发器资料较少，气象部门统一用直径为 20cm 蒸发器。

(6) 河口生态环境需水。河口生态系统位于陆地淡水生态系统和海洋盐水生态系统交汇处，鉴于河口在流域生态系统中的特殊地位和河口生态环境退化的严重性，河口生态环境需水是必须要考虑的一部分内容。河口生态环境需水是指保持河口生态系统结构、功能健康及其可持续性所需要的淡水量。不同生态功能的河口生态环境需水主要表现为对径流水质、水量及相应的时空差异性的要求。

2. 河道外需水

(1) 城市生态景观需水。城市生态景观需水量是指为了维护城市生态环境质量不再下降或改善城市环境而人为补充的水量，是为了改善城市环境。主要包括风景观赏河道用水、公园湖泊用水以及城市绿化与园林建设用水。瞿伦强认为城市生态景观用水是指维持城市水生生态环境良性循环的用水，包含水质、水量、水面三个要素。

(2) 流域湿地需水。流域湿地需水量主要考虑为维持流域内天然湖泊洼地特定的水、盐以及水生生态条件，湖泊洼地一年内消耗的水量。

(3) 植被防护林体系需水。本部分主要包括天然植被和人工植被的生态需水，天然植被的生态需水主要依靠吸取土壤水和地下水来满足，可用潜水蒸发法来间接估算，干旱区天然植被的实际蒸散可近似地用潜水蒸发量来代替。

1.3.2 河流健康评价研究动态

最初对水体的最大破坏来自于污染物，因此关于河流健康的评价最早开始于对水质的评价，19 世纪末期从已严重污染的欧洲少数河流开始。20 世纪 80 年代初，河流管理的重点由水质保护转到河流生态系统的恢复，水质评价已远远不能满足河流管理的需要，因为水质评价只是河流健康评价内容的一部分，不能全面揭示损害河流健康的多方面因素，包括在淡水系统退化方面起关键作用的一些因素，例如岸边植被带的损失、污染物的扩散迁移、水流状态的改变、淤积、外来物种的引入等，因此，河流健康评价的内容也发生了很大改变，开始转向对河流生态质量的评价。20 世纪 80 年代，出现了两种重要的河流健康评价和监测的生物学方法，即生态完整性指数 (IBI) 和河流无脊椎动物预测和分类计划 (RIVPACS)。IBI 产生于美国中西部，最初用于鱼类，后又推广到其他生物。RIVPACS 产生于 1977 年英国淡水生态所的河流实验室，早期目标是促进对保护位置的选择，物种组成类型是其分析重点。这两种评价方法在许多国家得到了应用。美国的许多地区采用 IBI 作为评价溪流状况的工具以支持管理部门实施水资源计划和决策。澳大利亚在 RIVPACS 的基础上发展了适合本国的方法 AUSRIVAS，并于 1993 年采用 AUSRIVAS 进行



了第一次全国水资源健康评价。此外,河流健康评价指标还有藻类丰富度指数(AAI)、硅藻的污染敏感性指数(IPS)、底栖生物完整性指数(BOIBI)等。同一时期,许多国家还发展了河流健康的综合评价方法,比较具有代表性的有美国、英国、澳大利亚和南非等国家。美国环保署(EPA)于1989年发展了快速生物评价协议,为用生物群落资料作为生态健康指标提供了一个技术框架。1990年,美国国家环境保护署(USEPA)启动了环境监测评价计划(EMAP),用于监测和评价河流和湖泊的状态和趋势。国家水质目录(NWQI)为美国的《水清洁法》提供2年1次(1996年后5年1次)的全国水质(包括河流状况)的报告。英国在20世纪90年代建立了河流保护评价系统(SERCON),目标是用于评价河流的生物和栖息地属性,评价河流的自然保护价值。同一时期还发展了河流栖息地调查(RHS)方法,该方法为英国提供了一个河流分类和未来栖息地评价的标准方法。此外还有在美国、瑞士、意大利使用的河岸带、河道、环境目录(RCE),采用了16个特征值用于快速评价下游农业景观地区小溪流的物理和生物状态。澳大利亚和南非都开展了国家河流健康计划,澳大利亚对河流状态的评价包括水文地貌(特别是栖息地结构、水流状态、连续性)、物理化学参数、无脊椎动物和鱼类集合体、水质、生态毒理学等内容。采用了河流地貌类型(GRS)、河流状态调查(SRS)等多种评价方法。南非的水事务及森林部于1996年发起了“河流健康计划”,它的栖息地完整性指数(IHI)用于评价栖息地主要干扰因素的影响,包括饮水、水流调节、河床与河道的改变、本地岸边植被的去除和外来植被的侵入等内容。目前,我国的河流保护工作总体上还处于水质恢复阶段,在水质评价方面已做了大量的工作。评价指标主要采用理化指标,也有部分采用生物指标。近年来,在对城市河流水环境的整治中,开始考虑水质指标之外的其他影响因子。1999年,上海市环境监测中心建立的适用于黄浦江水环境状态评价的指标体系中,就包括了理化指标、生物指标、营养状况指标、景观指标4部分内容。自20世纪90年代以来,河流管理中开始重视生态的恢复和保护,关注河流的健康问题。李国英根据黄河的具体情况,提出了“维持黄河健康生命”的治河新理念,以“堤防不决口,河道不断流,污染不超标,河床不抬高”作为体现终极目标的4个主要标志。2005年4月,长江水利委员会正式出台了健康长江指标体系,包含河道生态需水量满足程度、水功能区水质达标率等指标。该指标体系是针对长江管理的目标和需要产生的,反映了健康长江管理的组成内容。其他流域也相继开展了有关河流健康方面的评价研究。

河流健康评价研究的前提是构建合理的评价指标体系,如何针对具体研究对象建立合适的健康评价指标体系是关键,另外,在众多评价指标中如何筛选出影响其健康状况的主要因素,避免指标间的相关性和重复性也是难点问题。由于河流健康涉及诸多因素,除自身外还涉及到生态环境和社会经济等方面,所以其服务功能即承载功能也是研究的重点内容。马尔萨斯人口理论为承载力理论起源奠定了第一块坚实的基石,而美国学者Reed提出的Logistic方程为承载力理论提供了数学表达公式,是承载力理论发展的一个里程碑。承载力理论在实践中最初应用领域是畜牧业,出现了草地承载力、最大载畜量等概念,随着人口的增加,耕地面积日趋减少,提出了土地承载力的概念,随着工业的发展,环境污染与资源短缺问题日趋明显,所以出现了资源承载力和环境承载力等概念,在此之前人类承载力研究大多是简单地套用生物种群承载力理论方法,往往只是考虑人口、能源、环境



等某一种自然因素对人类承载力的制约,而忽略了人类自身文化社会因素对承载力的巨大影响。从20世纪80年代中后期至今,人类承载力研究开始从非人类生物种群承载力脱胎出来,不再简单地套用生物种群承载力理论方法,而成为真正意义上的人类承载力,除考虑资源、环境等自然因素的影响外,人类承载力研究开始分析研究科技进步、生活方式、价值观念、社会制度、贸易、道德和伦理价值、品味和时尚、经济、环境效应、文化接受力、知识水平和机构的管理能力等。赵楠等提出基于自适应管理的评估方法:依据规划实施过程不同阶段可获得的历史数据,利用时间序列分析、曲线拟合、组合预测、蒙特卡罗采样等方法,识别未来水资源承载力风险特征的变化,作为应对措施决策的依据。徐琳瑜等定义了城市生态系统承载力,强调其对维系城市生态系统健康的能动性特征,并在比较生物免疫力与城市生态系统承载力的相似性的基础上,构建了“城市生态系统承载力免疫学模型”作为其理论模型,在理论模型基础上设计其计量模型,分为天然承载力和获得性承载力两部分,并通过承载力与压力的相对变化趋势表达城市生态系统维系其健康水平的能力。樊庆铎等利用层次分析法针对大庆地区水环境现状建立合适的水环境评价指标体系,应用各评价指标承载度模型计算得出各评价指标承载度,各评价指标承载度通过水环境承载力模型进行综合计算,得出大庆地区水环境承载力。屈吉鸿等采用正交投影法对逼近理想解技术(TOPSIS)法进行了改进,建立了地下水资源承载力评价的模型,根据粗糙集理论,从属性的差异度出发,确定评价指标的权重,并与专家的主观权重相结合,生成TOPSIS法评价指标的权重;通过计算地下水资源承载力分级标准和待评价方案贴近各自理想方案的贴近度,确定待评价方案的承载能力。张衍广等利用EMD方法对1961年以来中国生态足迹与生态承载力的变化波动的周期进行了分解,并在此基础上运用动力学建模方法,建立预测模型,对中国未来20年的生态足迹与生态承载力进行数值模拟和预测。田宏岭等利用GIS技术对汶川地震后的成都市都江堰等西部5个市县进行栅格化处理,叠加各因素图层,得出各单元的资源环境承载力的初步结果,该结果与实际情况对照相符,最后根据评价结果提出了相应的建议。刘玉邦等运用模糊物元分析理论,选择灌溉率、水资源利用率、供水量模数、单位GDP用水量、单位供水量人口负荷、生态用水指数等指标,得出长江上游5省(市)区水资源承载能力。朱银银等在分析水环境承载力概念的基础上,建立了基于BP人工神经网络的流域水环境承载力评价模型,并对其进行了实证研究。李绍飞等应用突变理论进行水环境风险评价,并将其应用于流域内天津、沧州、衡水、石家庄和唐山等5个典型区域,为综合评价提供了新的方法。本研究将结合以上承载力方面研究成果,通过频次分析和主成分分析等方法构建河流健康评价指标体系,既要考虑河流自身健康,又要考虑其生态环境功能和社会经济服务功能,达到对河流健康状况的综合评价,为生态环境修复和社会经济发展决策提供依据。

1.4 本书主要研究内容、技术路线和研究思路

1.4.1 主要研究内容

本书结合滦河下游实际情况对河流健康评价和河流生态环境需水问题进行了研究,主



要包括以下几个方面的内容。

1. 河流健康评价及生态环境需水理论知识的研究和总结

收集和查阅生态环境需水及综合评价理论的相关基础知识,对生态环境需水概念的提出及河流健康评价理论的创立、发展及意义进行研究,总结生态环境需水和河流健康评价各种计算方法优缺点。

2. 河道内生态环境需水计算方法改进

以河流生态环境需水为对象,提出基于中位数理论和众数理论的 Tennant 法改进计算方法,对于多年平均流量的确定提出新的改进措施,并与传统的计算方法进行比较,分析各自的特点,探讨各理论方法在计算中的适应性;提出剔除异常点方法在确定河流生态环境需水计算过程中的数据预处理方法。并通过实例计算,将改进方法与传统 Tennant 法、年模数法等河道内生态环境需水计算方法进行比较。

3. 河流健康评价指标体系构建

收集、总结河流健康评价指标体系研究成果,建立基于生态环境需水的河流健康评价指标体系,通过频次分析等方法对各影响因素和指标进行筛选,进行相关性分析,最后确立评价模型。

4. 河流健康综合评价方法改进研究

根据评价指标体系建立“纵横向”拉开档次法、改进集对分析法、改进主成分分析法以及基于组合赋权模糊综合评价等评价模型,通过河流水质状况评价实例计算,对以上改进方法的适用性进行验证比较,找到各方法的优缺点,总结得到合理的河流健康综合评价计算方法。

5. 实例应用计算

在以上研究的基础上,以滦河下游为例进行实例计算,求得滦河下游代表性站点的河道内生态环境需水量,确立适合滦河下游的河流健康评价指标体系,并进行健康评价计算,得到基于生态环境需水的滦河下游健康评价结果。

本书研究内容是一个涉及生态学、概率统计学、水文学、系统工程、计算机等多学科交叉的复杂问题,需综合各学科的理论来研究。拟通过采取收集资料、整理数据、理论分析、数学建模、计算机模拟等过程,引入中位数理论、众数理论、时序立体数据表、改进集对分析、改进主成分分析、组合赋权模糊综合评价等方法实现对该问题的创新性研究。

1.4.2 主要技术路线

(1) 收集滦河下游主要水文站的水文资料、社会经济资料等,对数据进行初步的整理和分析,对滦河流域概况以及滦河的径流特点进行概括的描述。

(2) 对河流健康用水及生态环境需水理论的创立、发展及意义进行研究,在总结基本概念、定义的基础上,建立河流健康评价及生态环境需水理论分析框架。

(3) 以河流生态环境需水为主要对象,研究各类计算方法的适用性和优缺点,对于河流生态基流 Tennant 法及湿周法的重要因素多年平均流量和突变点的确定方法进行研究 and 改进,分析各自的特点,探讨各理论方法在计算中的适应性;采用中位数理论、众数理论、剔除异常点法等,对河流河道内生态环境需水进行定量分析和计算。