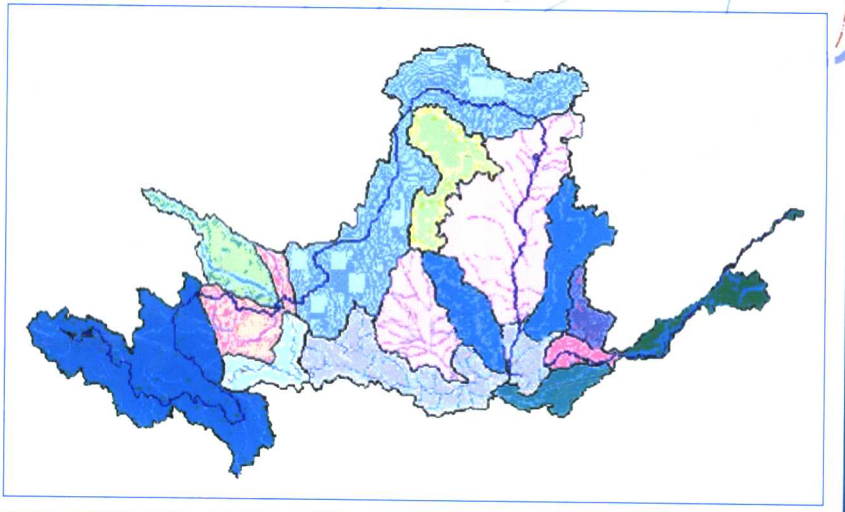




流域生态需水规律

Environmental Flows in Basins

● 杨志峰 刘静玲 孙 涛 崔保山 等/著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

流域生态需水规律

Environmental Flows in Basins

杨志峰 刘静玲 孙 涛 崔保山 等/著

国家自然科学基金重点项目 资助
国家基础研究发展规划(973)项目

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书基于面向流域水资源保护、管理与永续利用的理念,运用国际先进的生态系统管理技术与方法,把握生态环境需水量这一领域的国际前沿和最新研究动态,在理论研究、方法应用、跨学科整合等方面取得了突破。书中凝练了作者近年来承担的国家自然科学基金重大项目和相关科学研究最新成果,具有较强的创新性、前瞻性和实用性,为流域水资源保护和管理提供全新的思路和方法。

本书注重理论与实践的结合,时间和空间的结合,结构与功能的结合;在流域水平上,从生态系统结构和功能的角度,重视生态系统时空尺度的特征与变化过程;理论、方法和案例研究并重;语言严谨,图文并茂。

本书可供环境科学、生态学、水资源管理和水利学等学科研究工作者、高校师生参考,也可以作为水资源管理和环境管理部门的决策者和管理者的重要参考书和工具书。

图书在版编目(CIP)数据

流域生态需水规律/杨志峰等著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-016334-6

I. 流… II. 杨… III. 流域-生态环境-需水量-研究 IV. TV21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 116075 号

责任编辑:彭胜潮 韩 鹏 李久进/责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2006年3月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—2 500 字数:427 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

随着社会的进步和经济的高速发展,人类对水资源开发利用的程度不断提高,而与生态系统和水资源的矛盾日益激化。人类有意或无意地对流域及其生态系统大范围、持续和重度的干扰,导致流域生态退化、环境危机加剧和生态安全风险增加等一系列环境问题。流域生态系统过程是流域内物理、化学及生物等不同类型过程综合作用的结果,各生态系统的形成与相互间的联系以流域水循环过程为基础,流域不同类型生态环境问题的出现均与流域水循环中水量、水质及相应时空差异的自然变化规律密切相关。虽然流域生态环境受自然和人为因素共同影响,但人为干扰的强度、频度和持续时间不断上升的趋势,是影响流域生态系统健康的主要因子。引发这一系列环境问题的根本原因在于:人为高强度胁迫已经引起流域生态系统结构和功能发生变化,流域旱地、湿地和河口等重要生态系统生态环境需水量的不足和质的恶化,导致了旱地生态系统特别是植被退化,源头集水区水资源涵养能力下降;湿地生态系统健康恶化,河道断流,湖泊洼淀萎缩干枯,调蓄洪水空间不足,流域水灾害风险和生态风险加大,流域环境安全受到威胁;河口和近海生态系统结构缺失,健康状况日益恶化,无法发挥正常的生态功能、环境功能和景观功能,流域水系的“末端出口”生态系统崩溃,近海水生态环境的最后屏障“消失”。流域水资源开发、利用与管理所面临的严重生态环境危机,已开始成为阻碍我国可持续发展战略全面实施瓶颈。

本书书名中采用“生态需水”一词,其中涵盖了一般意义上“生态需水”与“环境需水”两方面内容。为了实现与相关研究成果相衔接,本书正文中仍沿用“生态环境需水”一词,同时对应的英文名称采用国际通用的“environmental flows”。

通过对生态水文过程变化的系统研究,揭示流域水循环与生态系统变化的相互协调机制,明晰生态环境需水与流域生态系统健康关系与深层次的问题,探索流域生态环境需水规律,总结和提升相关理论与方法,既具有重要的科学价值和理论意义,又可以为流域生态系统管理和水资源科学配置提供技术支持,具有广阔的应用前景。

流域生态环境需水规律研究是一个崭新的领域,涉及众多学科的交叉和跨学科的渗透,面临一系列亟待解决的科学问题和挑战:①流域时空尺度下的生态环境需水理论与方法;②流域生态环境需水临界阈值的科学界定;③人为高强度胁迫下不同生态系统类型划分与变化过程;④流域生态退化、环境危机和生态环境需水的相互关系;⑤不同水资源管理目标下的流域生态需水规律。

本书首先明确了流域生态系统结构与功能特征,研究了流域生态环境需水的特殊性:整体综合性、模块组合性、空间连续性、时间差异性和自然与人控双重性。辨析了生态环境需水、生态耗水和生态用水等相关概念与内涵。提出流域生态环境需水规律研究的分析方法:整体模块法、系统分解法和计算整合法。以流域生态水文过程为基础将流域生态系统划分为旱地生态系统、湿地生态系统及河口生态系统3个一级模块,然后分解成若干二级、三级……模块。以海河和黄河流域为实例,分析相应生态环境需水分

类体系和计算方法，通过流域生态环境需水整合计算模型：类型整合和空间整合模型，从最小等级模块利用整合计算模型依次进行整合，最终得出流域生态环境需水规律。

全书共分8章。第1章明确了流域生态系统结构与功能模块特征，分析了流域生态环境需水与生态系统健康的关系，明确了流域生态环境危机的本质。第2章建立了流域生态环境需水分析方法，将流域生态环境需水划分为旱地生态环境需水、湿地生态环境需水及河口生态环境需水三大模块。第3章建立了流域生态环境需水分区理论体系。第4章研究了旱地生态环境需水规律，其中强调了林地、草地生态系统和城市绿地生态系统需水三种类型，并以黄河流域为实例，阐明了黄河流域林地、草地和城市绿地生态环境需水规律。第5章以河流湿地、湖沼湿地及城市湿地为研究对象，阐述了相应生态环境需水特征和不同类型生态环境需水的计算方法，结合海河流域和黄河流域湿地生态系统需水规律分析结果，得出流域湿地生态环境需水规律。第6章针对河口生态系统独特的地理位置和生态系统特点，提出了相应生态环境需水特征和计算方法，并分析了黄河河口及海河流域主要河口生态环境需水规律。第7章以保持流域整体性、连续性等基本特征为基础，论述了流域内不同类型、不同空间区域的流域生态环境需水关系整合的原则和方法；面向流域水资源科学配置，结合黄河流域实际情况，比较了不同情景下的生态环境用水和缺水，进而为流域生态环境保护、水资源合理配置提供科学建议。第8章总结和概括了流域生态环境需水理论框架、分析方法和需水规律，并对研究前沿和热点问题进行了前瞻性讨论。

本书写作分工如下：

- 前 言 杨志峰
第1章 杨志峰 刘静玲 崔保山
第2章 杨志峰 刘静玲
第3章 崔保山 尹 民
第4章 杨志峰 张 远 尹 民
第5章 杨志峰 崔保山 刘静玲
第6章 孙 涛 杨志峰
第7章 刘静玲 孙 涛 崔保山
第8章 刘静玲 孙 涛

全书由杨志峰、刘静玲和孙涛统稿，杨志峰和崔保山校稿。

本书写作和出版得到国家科学技术学术著作出版基金委员会、国家自然科学基金委员会、科学技术部和水利部的支持，刘鸿亮院士给予了帮助，在此一并表达我们衷心的感谢！

参加研究和书稿整理工作的还有肖芳、姜杰、赵欣胜、赵翔、李英华、杨姝文、衷平、张可刚、张凤玲和赵瑞同学，在研究过程中水利部海河水利委员会、黄河水利委员会提供部分资料和基础数据，非常感谢他们的帮助！

本书基于国家自然科学基金重点项目(No. 50239020)、973项目(No. G19990436-05、No. 2003CB716807)的最新研究成果，是我们研究团队集体智慧的结晶，是我们于2003年完成出版的《生态环境需水量理论、方法与实践》的姊妹篇。

本书涉及环境科学、生态学、水文学、水力学和水利学等诸多学科的相互交叉与渗

透，为国内外本研究领域的前沿和热点问题，希望我们的研究成果能够推动流域生态环境需水的系统研究，提升我国流域内和跨流域水资源的科学配置的总体研究与管理水平，引发全社会对水资源高效利用和流域管理等社会发展急需解决的系列科学问题的关注与探索，同时为我国水资源可持续发展战略的成功实施提供技术支持，为建设和谐社会贡献一份力量。

作 者

2005年春于北京师范大学

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 流域生态系统特征	1
1.1.1 结构特征	1
1.1.2 功能特征	2
1.2 流域生态环境与水资源	3
1.2.1 主要生态环境问题.....	4
1.2.2 成因分析	4
1.3 流域生态环境需水研究进展	5
1.3.1 生态环境需水理论.....	5
1.3.2 生态环境需水计算方法	7
1.3.3 流域尺度生态环境需水研究	8
第 2 章 流域生态环境需水分析方法	10
2.1 流域生态环境需水特殊性.....	10
2.2 流域生态环境需水规律框架构建.....	13
2.3 整体模块法.....	14
2.4 系统分解法.....	15
2.5 计算整合法.....	16
第 3 章 流域生态环境需水分区与分类	17
3.1 流域生态环境需水分区原则与依据.....	17
3.1.1 分区原则.....	18
3.1.2 分区依据.....	18
3.2 流域生态环境需水分区.....	21
3.2.1 分区指标体系	21
3.2.2 分区方法与步骤	22
3.3 流域生态环境需水分类.....	23
3.3.1 旱地生态环境需水	25
3.3.2 湿地生态环境需水	25
3.3.3 河口生态环境需水	26
第 4 章 流域旱地生态环境需水规律	27
4.1 林地、草地生态环境需水.....	27

4.1.1	林地、草地生态环境需水特征	27
4.1.2	林地、草地生态环境需水计算方法	27
4.2	城市生态环境需水	31
4.2.1	城市生态环境需水特征及分类	31
4.2.2	城市绿地生态环境需水计算方法	38
4.2.3	城市绿地生态环境需水等级划分	41
4.3	黄河流域旱地生态环境需水	42
4.3.1	黄河流域林地、草地生态环境需水计算分区	42
4.3.2	黄河流域林地、草地生态环境需水	47
4.3.3	黄河流域城市绿地生态环境需水	72
第5章	流域湿地生态环境需水规律	80
5.1	河流湿地生态环境需水规律	80
5.1.1	河流湿地生态环境需水特征	80
5.1.2	河流湿地生态环境需水计算方法	80
5.1.3	海河流域河流湿地生态环境需水规律	85
5.1.4	黄河流域河流湿地生态环境需水规律	97
5.2	湖沼湿地生态环境需水规律	114
5.2.1	湖沼湿地生态环境需水特征	114
5.2.2	湖沼湿地生态环境需水计算方法	114
5.2.3	海河流域湖沼湿地生态环境需水规律	116
5.2.4	黄河流域湖沼湿地生态环境需水规律	129
5.3	城市湿地生态环境需水规律	139
5.3.1	城市湿地生态环境需水特征	139
5.3.2	城市湿地生态环境需水计算方法	139
5.3.3	黄河流域城市湿地生态环境需水规律	142
5.3.4	黄河流域城市生态环境需水情景预测	147
第6章	河口生态环境需水规律	152
6.1	河口生态	152
6.1.1	河口生态系统组成与结构	152
6.1.2	河口生态系统服务功能	153
6.2	河口生态环境需水类型及特征	154
6.2.1	河口生态系统健康	154
6.2.2	河口生态环境需水类型及特征	155
6.3	河口生态环境需水计算	157
6.3.1	河口生态环境需水年度总量计算方法	157
6.3.2	河口生态环境需水年内时间变化	160
6.4	海河流域主要河口生态环境需水规律	160
6.4.1	概况	160
6.4.2	海河流域主要河口生态环境需水规律	167

6.5	黄河口生态环境需水规律	172
6.5.1	概况	172
6.5.2	黄河口生态环境需水规律	176
6.6	河口生态环境需水规律	184
6.6.1	河口生态环境需水与径流量	184
6.6.2	不同功能生态环境需水	185
6.6.3	时空差异性	188
第7章	流域生态环境需水整合	191
7.1	整合计算原则	191
7.2	类型整合	193
7.3	空间整合	194
7.3.1	分区内生态环境需水整合	194
7.3.2	分区间生态环境需水整合	198
7.4	海河流域生态环境需水整合	199
7.4.1	海河流域生态环境需水整合	199
7.4.2	海河流域生态环境需水管理对策与建议	200
7.5	黄河流域生态环境需水整合	202
7.5.1	黄河流域生态环境需水总量	202
7.5.2	黄河流域面向环境功能的生态环境需水	208
7.6	面向水资源配置的流域生态环境需水	214
7.6.1	面向水资源配置的生态环境需水	214
7.6.2	生态环境配置水量	220
第8章	结束语	223
8.1	结论	223
8.2	对策与建议	225
8.3	展望	226
	主要参考文献	227
	附表 I	231
	附表 II	243

第1章 绪 论

1.1 流域生态系统特征

流域具有明确的地理学边界，为供给河流地表水源的地面集水区和地下水源的地下集水区的总称。流域分为地面集水区和地下集水区一致的闭合流域和不一致的非闭合流域。通常所指的流域都是地面集水区，河流的流域面积即为干流与各支流流域面积之和。

1.1.1 结构特征

流域是由不同生态系统组成的异质性区域和巨型复合生态系统，由一系列复合生态系统组成，分为河流、湖泊、沼泽、森林、草原和城市等子系统。流域包括水系及其周边地区的旱地生态系统，流域水系及其相关系统对于流域生态系统管理和水资源管理具有重要意义。流域生态系统过程是以不同类型生态系统的形成、相互间的联系及流域水循环过程为基础，是不同生态系统类型综合作用的结果。水循环作为地球上最基本的物质大循环中最为活跃的自然现象，深刻地影响着流域生态环境结构、功能和生态安全(图 1.1)。

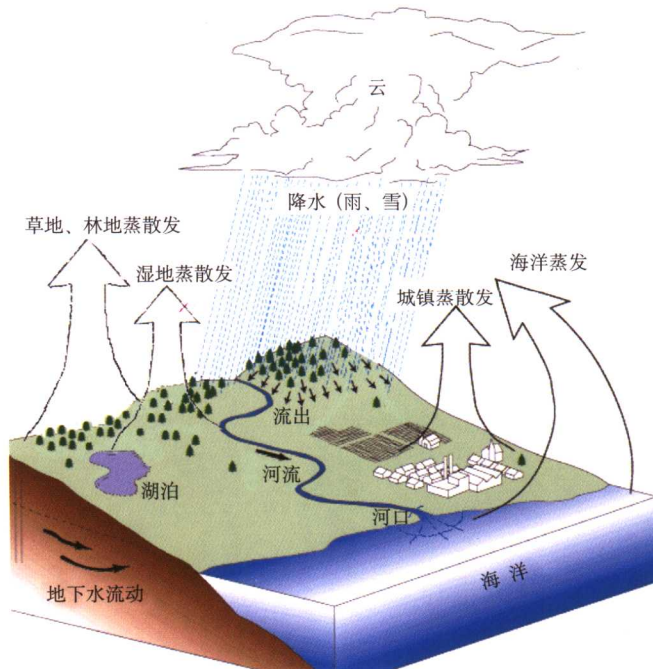


图 1.1 流域结构与水循环

Fig. 1.1 The structure and water cycle of basins

我们认为，基于流域水资源可持续利用的流域生态环境需水规律研究，涉及各种生态系统的嵌合以及结构与功能的复杂关系。流域结构与功能基本单元具有复杂于生态系统生态学和景观生态学所定义的生态系统、景观和复合生态系统的特性。流域作为一个完整、动态和开放的系统，其完整性（holism）意义非同一般，整体大于部分之和，复杂程度更是高于部分。基于以上全新的理念，引入模块的概念，提出流域生态环境需水规律主要以流域内各模块自身、不同模块间和模块整合中的结构、功能和过程变化规律为主线，探索流域生态环境需水变化特征，为流域生态系统和水资源管理服务。模块（module）是流域结构与功能单元，具有等级性，但是不完全等同于生态系统和景观等级的概念，还具有镶嵌性和重叠性，它的时空尺度可大可小，可以是自然、人工或复合生态系统的结构与功能单元，直接与流域特征、生态环境要素和流域管理的目标密切相关。

1.1.2 功能特征

流域生态系统除了具有生物生产、物质循环、能量流动和信息传递等生态系统的基

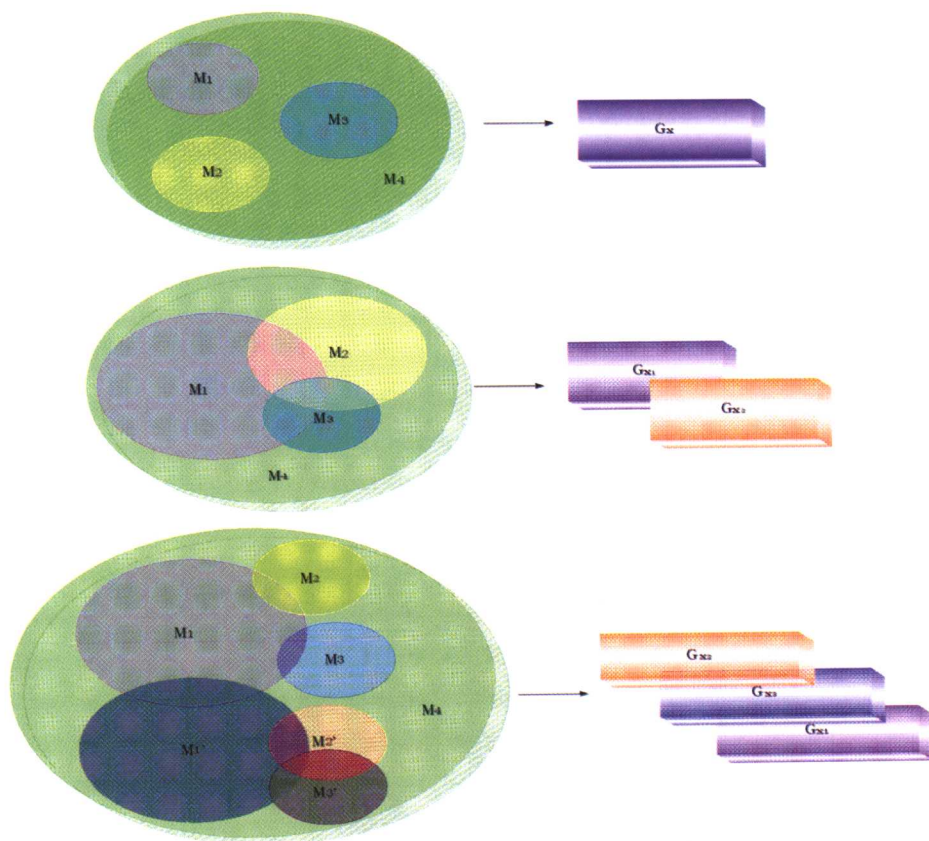


图 1.2 流域结构模块与功能相互关系

Fig. 1.2 Relation between the structural modules and functional modules of basins

M_i 为结构模块； G_{xi} 为功能模块

本功能，还具有对人类有重要意义的生态系统服务功能：生产功能、基本过程功能、环境效益和娱乐价值等。更重要的是，流域生态系统具有三大特殊功能：维持流域水循环过程，保障陆地生态系统完整性和与海洋生态系统平衡，满足流域各类生态系统的生态需水，为人类提供一定质与量的水资源用于生产、生活 and 经济发展。

流域生态系统是连续的，由水生生物、湿地生物、陆生植物、陆地小动物、陆地大型动物和人类等形成一个水陆密不可分的复合生态系统。食物网络和结构的完整性维持流域生态系统的平衡；流域水循环过程与生态系统相互影响和相互适应，发挥着健康流域生态系统的正常功能。

流域生态系统功能模块由不同生态和环境过程组成，并与结构模块密切相关，但是功能模块与结构模块并不是完全一一对应关系，而且功能模块的关系更为复杂。流域生态系统最重要的功能模块包括水循环过程模块、生态水文过程模块和时空变化过程模块(图 1.2)。

1.2 流域生态环境与水资源

健康的流域生态系统是指流域结构模块保持完整或较为完整，功能模块能够发挥正常的基本生态功能和生态服务功能，能够维持生态系统的复杂性、完整性、稳定性和可持续性，保证时间和空间上的自控能力、抵抗力、缓冲力、活力和对胁迫的恢复力，保证水资源可持续利用。

流域生态环境需水是流域生态系统健康的重要影响因子之一，特别是对于干旱、半干旱和水生态环境敏感地区，生态环境需水与生态系统健康之间存在着相互影响和相互适应的复杂关系。流域生态系统健康的疾病临界点与生态环境需水的阈值相对应，如果水量在安全阈值范围之外，流域生态系统的结构和功能将发生不可恢复的损害。例如，陆地植被或河道生态系统的不可逆退化，流域内各类型子系统之间的协调和平衡关系被破坏，流域生态系统健康状况不能得到维持。如果水量在最小和理想阈值之间，水分是限制因子的条件下，流域生态系统健康与生态环境需水存在着等级对应关系。当流域生

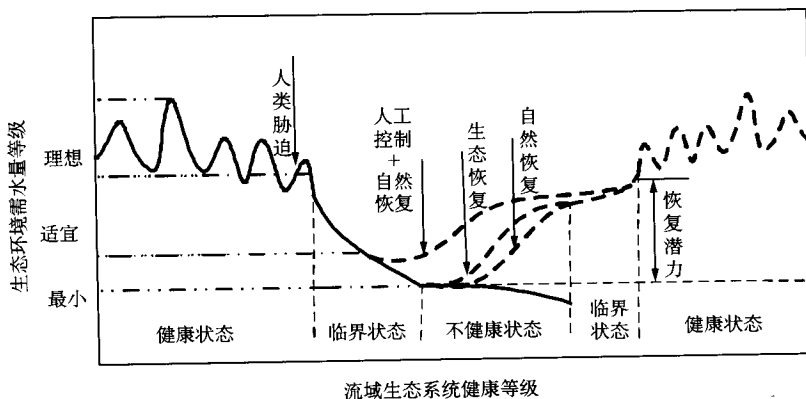


图 1.3 流域生态环境需水与生态系统健康关系

Fig. 1.3 Relation between environmental flows and ecosystem health of basins

态环境需水达到某一范围值时，流域生态系统健康达到最佳水平，健康保持稳定，这个范围就是流域生态系统的生态环境需水适宜范围。因此，水量在最小和理想范围内是流域生态系统健康的保障（图 1.3）。

近年来全球不同流域尺度上均出现一系列与生态环境需水相关的生态环境问题，如生物多样性锐减、植被退化、水土流失、河流断流、湿地面积萎缩和河口生态环境恶化等，最终导致了水资源短缺加剧和水灾害风险严重等水环境危机。流域生态环境需水与水资源关系等关键问题的成因分析是研究流域生态环境需水规律的前提与条件。

1.2.1 主要生态环境问题

1. 旱地植被退化

流域旱地生态系统中林地、草地是天然林（草）和人工林（草）地的主要成分，是维持流域生态平衡的关键组分；城市绿地包括城市附近的天然和人工绿地，是生态城市建设的重要组成部分。林地、草地和城市绿地的生态需水得不到满足，将直接改变旱地生态系统的结构与功能，导致旱地生态系统植被退化，水资源涵养能力下降。

2. 湿地萎缩

根据国际公认《湿地公约》所定义的“大湿地”概念，流域旱地以外的区域都应该包含在湿地生态系统中，流域内的河流、湖泊洼淀、沼泽和城市湿地组成流域生态系统的重要敏感成分，也是人为破坏和干扰的“重灾区”，更是人-生态-水矛盾最激化的地带。湿地生态环境需水得不到满足，将导致湿地生态系统健康恶化，河道断流，湖泊洼淀萎缩干枯，调蓄洪水空间不足，流域水灾害风险和生态风险加大，流域环境安全受到威胁。

3. 河口生态平衡失调

河口是一个特殊的生态系统，是地球上生物多样性最大和生物量最高的生态系统类型之一，也是淡水与海水交汇和陆海相互作用的复杂区域。流域水资源过度的开发与利用，致使入海水量不足，导致河口和近海生态系统结构缺失，生态平衡失调，健康状况日益恶化，无法发挥正常的生态功能、环境功能和景观功能，流域水系的“末端出口”生态系统崩溃，近海水生态环境的最后屏障“消失”。

1.2.2 成因分析

流域生态系统水资源利用不合理，流域径流时空分布天然状况的显著改变和水质恶化是造成目前流域生态系统不健康趋势日益明显的主要成因。流域水资源的可持续利用面临巨大挑战，并呈现难以承载高速发展的经济和不断提高的社会生活质量的趋势。产生这一系列生态环境问题的本质在于：①人为高强度干扰已经引起流域内景观和生态系统结构、功能和过程发生变化；②水系人工化和自然缺水胁迫如生态水文过程变化显著改变了流域径流时空分布和水循环过程；③流域管理中生产、生活和生态用水的配置与

流域生态环境需水规律不符。

虽然流域生态环境受自然和人为因素共同影响,但其中人为干扰的强度、频度和持续时间呈现不断上升的趋势,成为影响流域生态系统健康的主要因子。人为因素可分为直接影响和间接影响。

(1) 人为直接影响。土地利用格局变化,直接侵占或损坏流域各类生态系统,或者直接改变模块的结构。例如,建造大型水利工程、河流水渠化和人工化、砍伐森林、开垦草地、围湖造田和城市扩张等。以海河流域为例,这一过程可分为三个主要阶段:①1962年以前是以兴建山区水库为重点的初步开发治理期。建成了官厅、密云、岳城、岗南、黄壁庄等18座大型水库和一大批重点中型水库,对下游河流的生态环境产生了很大的影响。②1963年以后是以开辟平原人工减河为重点的平原河道治理期。改变了原来海河各水系集中汇集海河的特性,至20世纪70年代中期,海河流域平原河道已基本完成了河道人工化进程。③20世纪70年代以来是以开凿机井为重点的地下水开发期。地下水水位下降,造成了流域产流量减少,对河流生态环境产生了间接影响。导致海河流域从60年代中期后,流域年径流量处于偏枯段,加之逐年用水量增加,入海水量逐年减少,1985~1987年海河南系水资源开发利用程度高达94%,河道断流,湿地面积锐减,河口退化。

(2) 人为间接影响。流域水循环遵循自身的时空变化规律,但是人类在流域生产、生活用水急剧增加和实际水量减少的同时,始终希望能够稳定地保证水资源的供给。这一过程中常会无视水资源总量、水资源可更新能力、环境承载力、耐干扰能力和恢复能力等的有限性。目前我国大多数流域水资源开发利用已经远远超过国际上通用的最高警戒线。人类水资源配置的重点关注在生产和生活用水,忽视和占用了生态系统健康所必需的水量。人为改变流域水资源时空分布,环境污染严重,生物多样性减少,间接影响了流域生态系统结构与功能。同样以海河流域为例,海河流域水污染状况在全国七大流域中最为严重。从20世纪80年代初起,海河流域废污水总量为 2.77×10^9 t,到1998年全流域的废污水排放总量已达到 5.56×10^9 t,废污水量增加了一倍,其中生活污水排放总量的增幅达到137%。随着废污水排放量的增加,河流水质污染也逐步加重。对流域内59条主要河流的水质评价表明,海河流域地表水受耗氧有机项目污染较普遍而且严重。污染河长达3068 km,占评价河长的51.6%;污染河段44个,占评价河段总数的58.7%;其中严重污染河长为2784 km,占评价河长的46.8%;严重污染河段41个,占评价河段的54.7%。流域水污染使得流域生态系统可利用水量减少,加剧了人-水之间的矛盾,同时造成流域生态系统平衡被破坏,生物多样性减少,50年代流域内共有鱼类17科约118种,80年代降为14科40种,90年代只有8科22种,近年来,海淡水洄游性和河湖洄游性鱼类基本灭绝,天然鱼类的产量基本没有。

1.3 流域生态环境需水研究进展

1.3.1 生态环境需水理论

人类对生态环境需水的认识经历了不同阶段。在过去相当长的一段时间内,经济社

会用水量相对较少,并未造成与生态环境争水的现象,生态环境需水可以得到必要的保障。在这一阶段生态环境依然保持良性循环状态,经济社会用水与生态环境用水的矛盾并不突出,生态环境需水研究尚未引起人类的足够重视。随着社会的进步和经济的高速发展,经济社会用水与生态环境需水的矛盾日益突出,社会经济的高速发展是建立在大量挤占生态环境用水的基础之上。这种“忽视水资源与生态环境系统之间的关系”的水资源管理利用模式直接导致了严重的生态环境问题,如生态系统退化、生物多样性降低、河道断流、地下水位下降、水环境污染和土地荒漠化等。这一阶段人类开始重视并试图改善此时面临的生态环境问题,但并未从根本上找到造成这些生态环境问题的原因。

20世纪40年代,美国鱼类和野生动物保护协会开始对河道内流量(instream flow)进行研究,这可以看作是河流生态环境需水相关研究的开端。国外生态环境需水的研究初期,研究领域主要集中在水生生态系统尤其是河流系统,关注河流生态系统的健康和生物多样性的保护(Bovee, 1978; Gallagher and Gard, 1999)。

20世纪60年代以来,美国、英国、澳大利亚等国家相继开展了鱼类洄游繁殖和产量与河流流量关系的研究,并提出最小可接受流量(minimum acceptable flow, MAF)的概念(Bovee, 1978; Binns and Eiserman, 1979; Sheail, 1984),其主要目的是保护鱼类及其他关键物种的栖息地。

到20世纪90年代,人类逐渐认识到水资源与生态环境系统的互动关系,意识到生态环境恶化的重要原因之一就是经济用水大量挤占生态环境用水,从而促进了水资源管理思维模式的改变,放弃了以人类需求为中心的水资源管理观念,强调生态环境需水的重要性,并把实现生态环境需水和人类经济需水协调配置作为21世纪人类追求的目标。

我国北方地区,特别是西北干旱、半干旱地区和黄淮海地区日益严峻的水资源、水环境与水生生态问题,迫使人们重新审视水资源与生态系统的关系,生态环境需水开始成为研究的热点。这一时期,生态环境需水的理念开始为科学界和政府管理决策部门所认可。国务院前总理朱镕基曾作出“先节水,后调水;先治水,后通水;先生态,后用水”的重要指示,水利部制定“水利发展战略目标”时明确提出“制定生态用水定额”的任务;由中国工程院组织实施的《中国可持续发展水资源战略研究综合报告》中初步提出生态需水的理论(21世纪中国可持续发展水资源战略研究项目综合组, 2000),其他大量关于生态环境需水(用水)研究文献(刘昌明, 1999; 沈国舫, 2000; 贾宝全和慈龙骏, 2000; 贾宝全和许英勤, 1998; 杨志峰等, 2003)的相继发表也表明生态环境需水研究已经成为社会可持续发展和学科进步的需要。在这一时期,先后出现了“生态(环境)用水”、“生态(环境)需水”、“生态(环境)耗水”等概念。由于不同学者理解上的差异,对其概念与内涵的界定也有所不同。

杨志峰等(2003, 2004)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。

1.3.2 生态环境需水计算方法

由于生态系统类型结构和功能间的差异性,生态环境需水研究一般针对不同类型、不同空间区域生态系统的特点分别展开。

刘昌明等(2002)认为流域生态需水包括河道外生态需水和河道内生态需水两部分,对于河道外生态需水,根据生态系统类型和植被类型的差异进行划分,如林、灌、草需水等;对于河道内生态需水,则根据水体类型的不同分为河流、湖泊和湿地生态需水。唐克旺等(2003)建立了生态环境需水的三级分类体系。杨志峰等(2003)从生态系统类型和生态环境功能两个层次建立了生态环境需水的分类体系。

目前关于生态环境需水的相关研究主要以不同单一生态系统为研究对象,从需水特征分析和相应计算方法的确定两方面进行。

贾宝全和许英勤(1998)、贾宝全和慈龙骏(2000)将干旱区绿洲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、河湖生态用水和荒漠植被生态用水等七大类。赵文智和程国栋(2001)将需水量与植物的生态功能相结合,把干旱区植物需水量分为临界需水量、适宜需水量和饱和需水量。

王根绪和程国栋(1999,2000)认为干旱内陆河流域景观生态的空间格局与水资源的状况有着密切的联系,提出利用某类景观稳定存在的生态需水量(此处的生态需水量指维持某一景观类型的植被体系正常生长的生态耗水量)大小来评价其对水资源胁迫的稳定程度。樊自立(1998)从维护天然植被耗水量的角度计算了塔里木盆地的生态需水量。王让会等(2001)从研究植物生长与生态环境状况之间的定量关系出发,界定合理的生态水位,在此基础上应用植被耗水和定额法估算了塔里木河流域生态需水量。

刘昌明等(2002)认为摸清西部地区缺水与需水规律是解决该区缺水危机和生态环境建设合理配置方案的依据。王芳等(2002a,2002b)则基于流域降水平衡和水资源平衡两个平台来计算生态需水量,分析生态需水对水资源总量的影响,并协调生态需水与国民经济用水的矛盾,以确定合适的生态保护目标、生态建设和国民经济发展规模。

旱地植被是旱地生态系统耗水的主体,有学者对其进行了相关的研究。张远和杨志峰(2002a,2002b)从林地生态系统水量平衡关系出发,认为林地生态需水量是林地生态系统为维持自身生长、发挥生态功能所需要消耗和占用的水资源量,包括林地蒸散量和林地土壤含水量两种形式。林地蒸散量是林地生态系统的水资源消耗量,包括蒸发和蒸腾两个过程;林地土壤含水量是林地生态系统的水资源储存量。杨志峰等(2005b)探讨了基于MODIS数据估算海河流域植被生态用水的方法。

对于城市生态环境需水,田英等(2003)根据城市生态系统类型将其分为城市绿地系统生态环境需水量和城市河湖系统生态环境需水量,并根据生态环境功能的差异划分为不同的需水类型。尹民等(2005a)、杨志峰等(2005c)建立了城市生态环境需水量的方法体系,其中包括了城市分类的指标体系与方法、城市生态环境需水量计算方法与等级划分方案,并以黄河流域的城市为例,估算了其生态环境需水量,并对其影响因子进行分析。

河道生态系统是目前生态环境需水研究的主要区域。李丽娟和郑红星(2000)根据生态环境的结构与功能,将河流系统生态环境需水量分为三部分,河流基本生态环境需水量、河流输沙排盐需水量和湖泊洼地生态环境需水量。严登华等(2001)则将河流系统生态需水分为维持河流物理构造需水、水面蒸发消耗需水和洪泛地生态需水三部分。河流生态环境需水的研究方法较多,对于河道基本生态环境需水量,有 Tennant 法、月(年)保证率设定法和最小月平均流量法等(王西琴等,2002);针对河道的水面蒸发和渗漏,有水量补充法(王西琴等,2002;严登华等,2001);为维持河流的稀释和自净等环境功能,有环境功能设定法(王西琴等,2001)、水质目标约束法(崔树彬,2001)、污染物-流量关系曲线法(常炳炎等,1998)、最枯月平均流量法(崔树彬,2001)等;为保证河流下游的输沙平衡,许多学者提出输沙需水量计算方法(李丽娟和郑红星,2000;石伟和王光谦,2002)。

湖沼湿地生态环境需水计算是目前生态环境需水研究的另一个重点类型。我国北方地区大部分湖泊、湿地出现不同程度的退化,其原因之一就是水资源的短缺而未能保证基本的生态环境需水(张振克等,2001;崔保山和杨志峰,2001)。刘静玲和杨志峰(2002),Liu 和 Yang(2002)界定了湖泊生态环境需水量的概念与类型,辨识了湖泊生态环境需水量的不同计算方法,建立了湖泊生态安全评价指标体系,在阐述黄淮海地区湖泊管理误区的基础上,计算了黄淮海地区湖泊生态环境需水量,提出了以确定湖泊生态环境需水量为核心的湖泊恢复与可持续发展对策。崔保山和杨志峰(2002,2003)、Cui 和 Yang(2002)基于生态学方法,按照湿地生态系统的组成结构及其功能,确定了湿地生态环境需水量的等级,在此基础上提出了各主要类型生态环境需水量的等级划分指标标准和相应级别。

陆海间的交互作用使得河口生态环境需水规律不同于河流及湖沼湿地类型生态环境需水。崔保山等(2005)通过分析黄河河口三角洲湿地生物和水量的相关性,计算了不同层次管理目标的黄河河口三角洲湿地生态需水量。赵欣胜等(2005)将黄河流域湿地分为河道湿地型、河滨湿地型和河口湿地型,基于生态水文学方法计算了黄河流域典型湿地最小、适宜和理想生态环境需水量。孙涛和杨志峰(2004,2005)在分析河口生态环境需水量类型及特征的基础上,分别采用水文学、生物学及水力学方法计算了海河流域中海河口、滦河口及漳卫新河口生态系统水循环、生物循环消耗水量及生物栖息地需水量,考虑不同生态功能需水量间的兼容性,得到各河口生态环境需水年度总量,以保持河口径流时间分布自然性为基础,确定了生态环境需水量年内时间分配。

1.3.3 流域尺度生态环境需水研究

近年来,从流域尺度开展生态系统相关研究逐步受到重视。流域生态学的研究与应用为流域内经济社会可持续发展的有力支持。河流连续体概念(river continuum concept)理论认为,河流由源头集水区的第一级溪流起,向下游经各级河流流域形成一连续的、流动的、独特而完整的系统,这种由上游诸多小溪至下游大河的连续,不仅指地理位置空间上的连续,更重要的是生物学过程及其物理环境的连续。

蔡庆华等(2003)认为河流生态学的研究应在流域尺度上展开,结合河流健康及生