

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
国家基础研究发展规划(973)项目 资助

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>

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的瓶颈。

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、袁平、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)。

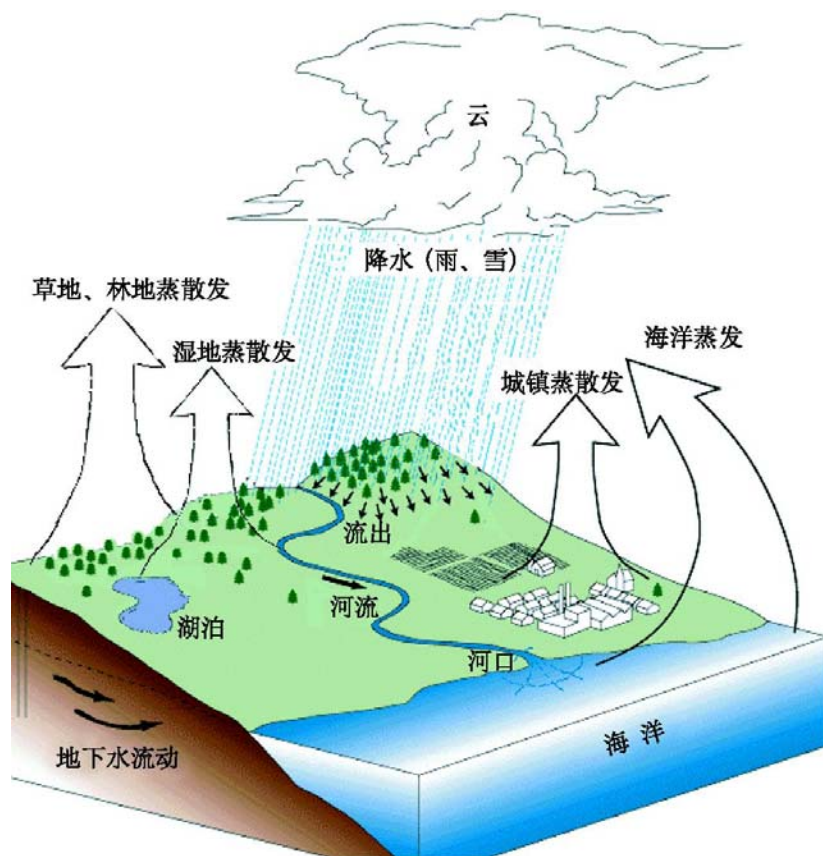


图 1.1 流域结构与水循环

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 and 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

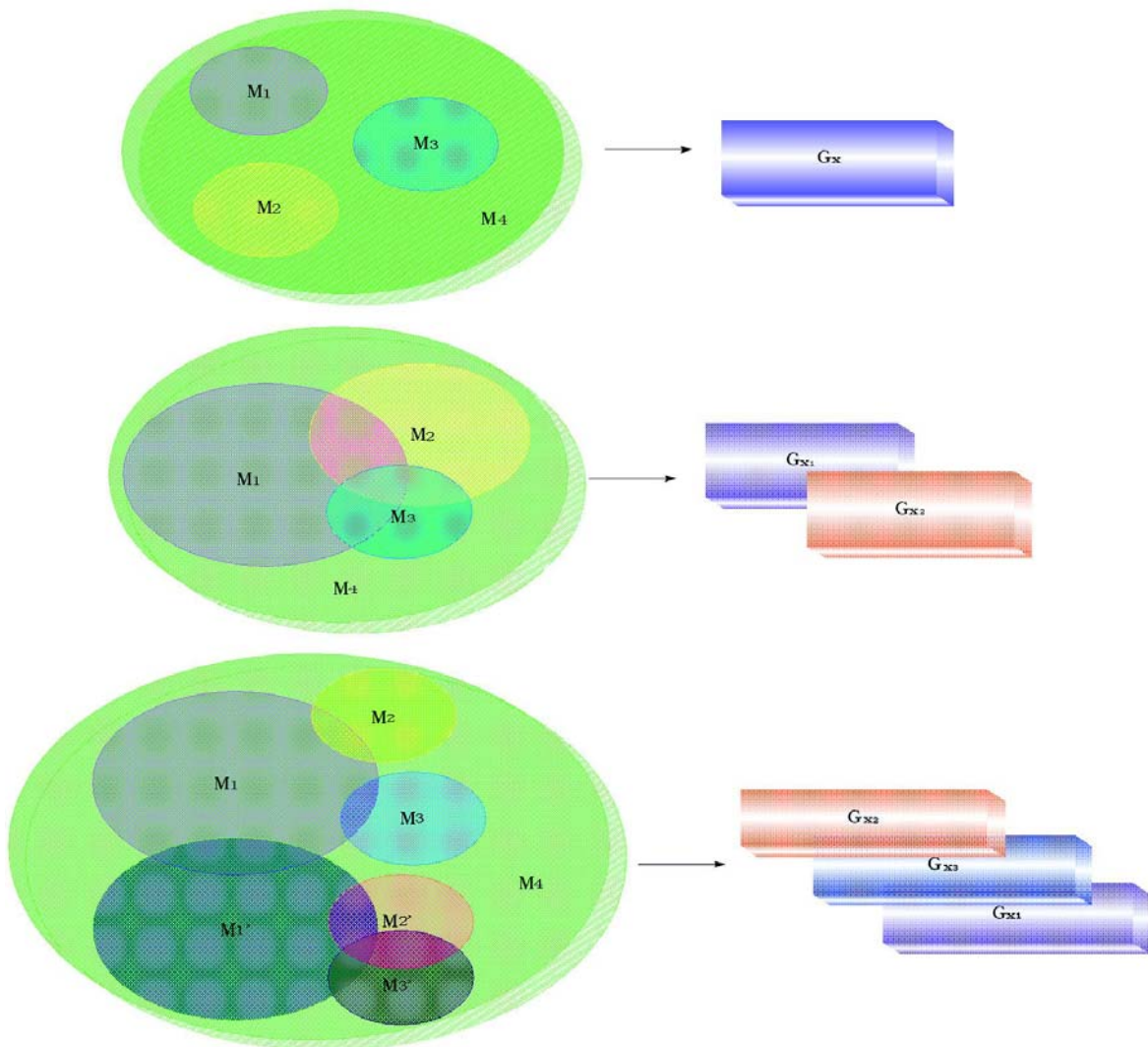


图 1.2 流域结构模块与功能相互关系

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

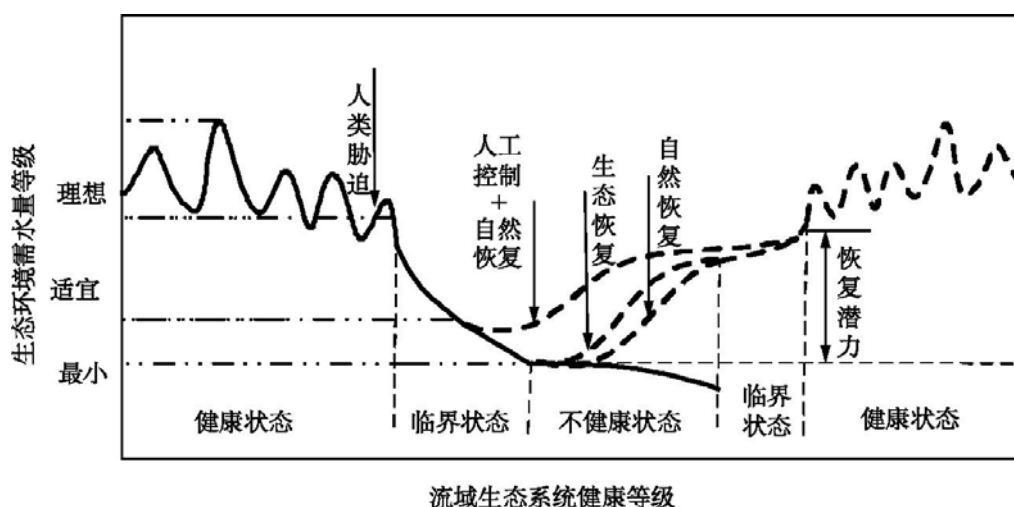


图 1.3 流域生态环境需水与生态系统健康关系

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的两方面进行。

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

态系统服务评价进行河流生态系统可持续管理研究将是近期河流生态学的重点问题之一。

1983年 Narayanna 等认为河道的流量应包括多种目标流量，每种流量随时间而变化，河道需水量由整个河流各项不兼容需水量所组成。Ward (1989) 认为现阶段河流理论上需分为河流连续体和系列不连续体，河道宽度、长度和结构功能等均将随时空而变化，相应河道流速、生物多样性等也将随之变化。

1996年 Petts 等提出河流流量目标系统，认为为了达到一个平衡的水量分配，对水资源利用者、水质、航运、娱乐、渔业、河流和湿地的保护给予适当的考虑。作为一个总体研究单元，每一个河流均应划分为四个部分（上游、中游、下游和河口），并应确定相应的生态目标。流域是通过能量和物质的流动转移控制的纵向连续体，对于流域的管理，保持连续的纵向连接是非常重要的原则。

丰华丽等 (2001, 2002a, 2002b) 认为河流生态用水的研究，不应只局限在河道的尺度上，而应考虑河岸植被、洪泛平原等与河流关系密切的旱地生态系统。水资源管理和研究的最佳地域尺度是流域尺度（严登华等，2001），应该将生态环境需水量研究与流域水资源管理联系起来，从流域整体的角度研究水资源与水生态的互动关系，探讨生态环境需水的机理，发展整合的计算方法。

许新宜和杨志峰 (2003) 从流域的角度可以研究不同环境梯度下生态环境需水的差异，揭示梯度与生态环境需水的函数关系，特别是上、中、下游生态环境需水的时空变化规律。在整体分析各流域生态环境需水的基础上，还可以比较各流域间生态环境需水在量和质上的差异和共性。

杨志峰等 (2004) 针对目前生态环境需水量研究多以单一生态系统为研究对象的现状，在系统分析生态系统组成结构的基础上辨识了河流、湖沼、城市旱地植被的需水差异，从生态系统整体角度建立了生态环境需水计算模型。

针对流域内生态环境需水量所具有的显著空间地域性特点，尹民等 (2005b) 结合我国不同区域的生态环境特点与水文水资源状况，考虑河流生态环境需水量的影响因子，反映河流生态系统对水的需求，建立了全国河流生态水文分区体系和分区方法，为从流域尺度开展生态环境需水量研究提供了基础。

刘静玲等 (2005) 和杨志峰等 (2005b) 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。张远等 (2005) 以黄河流域为实例研究了河道需水量及其上下游区间的重复计算问题。

今后研究方向将以流域为研究单元，考虑其中不同类型、不同空间位置的生态环境需水关系，以保持流域整体性、连续性等特征为目的，确定流域生态环境需水的整合原则和方法。

第 2 章 流域生态环境需水分析方法

流域生态环境需水规律应重点考虑保护典型流域生态系统、维持重要生态过程和水文过程，并由此根据自然生态系统的时空变化规律调整人类的行为。因此，流域生态环境需水分析的科学方法不仅依赖于生态学、环境科学、水文学和生态系统管理等学科的理论指导，还需要根据流域生态环境需水特殊性，以实现流域尺度下生态系统管理目标为宗旨，在对原有方法整合的基础上探索新的分析方法。

2.1 流域生态环境需水特殊性

1. 整体综合性

流域生态系统具有特殊和复杂的等级结构，其相互作用的组分可以按照生态系统类型进行组合，形成不同的等级层次结构。流域生态环境需水规律必须综合考虑流域生态系统的整体性，并注重流域生态系统层面、生态系统层面和生态功能的比较和综合分析(图 2.1)。

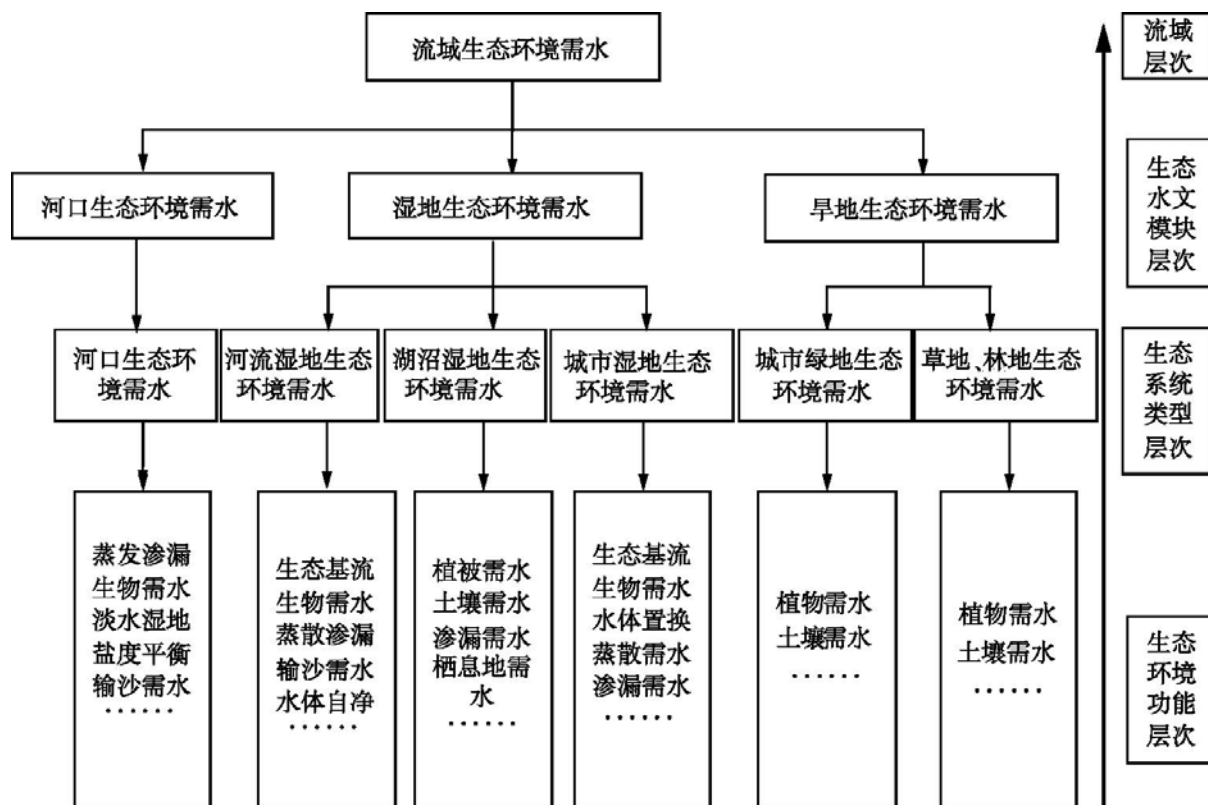


图 2.1 流域生态环境需水的等级层次结构

Fig. 2.1 Grade hierarchy of environmental flows for basins

2. 模块组合性

从上述流域生态环境需水的整体综合性出发，生态系统类型层次和流域层次之间具有较大的空间，从景观生态学最新的研究成果看，景观虽然可以认为是生态系统和区域（流域）之间的代表，通过景观生态学理论和方法来解决流域面临的复杂问题是远远不够的，根据我们在 1.1.1 节中提出的模块结构和功能特征（图 1.2），流域可以根据不同的分类原则，在结构上分为若干模块，模块自身具有一定的功能，不同的模块在流域中占据不同的多维空间，不同组合模块形成的功能模块等于或大于单一功能模块，许多模块是由多种旱地生态系统或水生态系统组合而成，在流域中更多而且更重要的模块是陆-水耦合体（land-water coupling），所以，流域生态系统中湿地模块具有重要的地位。不同的模块组合，将对流域生态系统的结构和功能产生重要影响，这对于探索流域生态水文过程和生态环境需水规律具有重要的指导作用（图 2.2）。

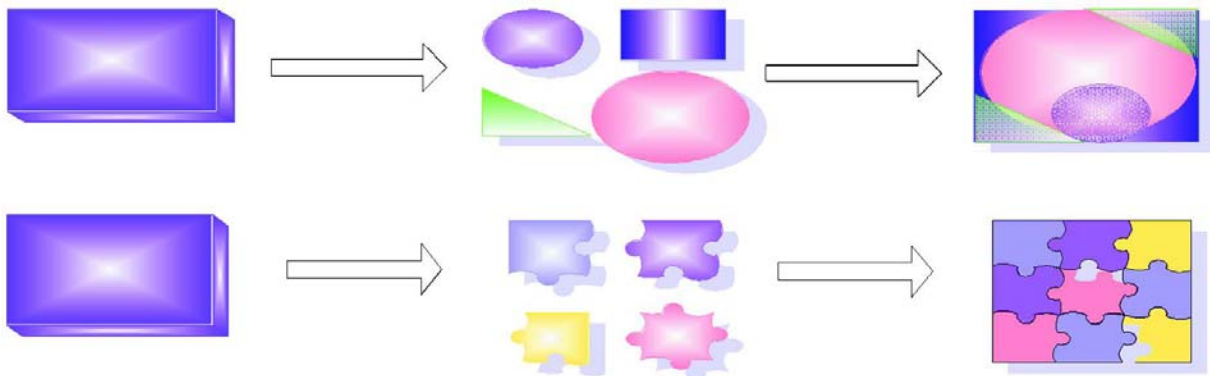


图 2.2 模块整合性

Fig. 2.2 Conformity of modules

3. 空间连续性

流域生态系统具有复杂的空间格局和异质性。流域生态系统的结构和功能都受到水循环空间格局的影响，它们相互整合形成特定和连续的生态水文过程。

流域生态环境需水的空间连续性分为纵向连续性、垂向交换性和横向梯度性。纵向连续性是指流域生态系统具有物理化学、河道形状和生物群落的纵向梯度，流域上下游的连续变化——河流连续体（RCC）代表了重要的流域空间特性（图 2.3）。垂向交换性是指地表水和地下水的交换。横向梯度性是指水陆过渡带-湿地和洪水-脉动（flood-pulse）规律性变化（图 2.4）。

4. 时间差异性

流域生态系统结构与功能随时间的演进而发生着有规律的变化，生态环境需水不仅体现在生态系统对水量的需求，还体现在水量随时间变化的要求。从长时间尺度来看有流域生态系统的进化，中时间尺度来看有流域生态系统的演替，短时间尺度来看有年际、季度和日变化。对于旱地生态系统、湿地生态系统和河口生态系统生态环境需水规律重点关注年际和年内规律性变化。年际变化指生态环境需水的丰、平、枯水年的特

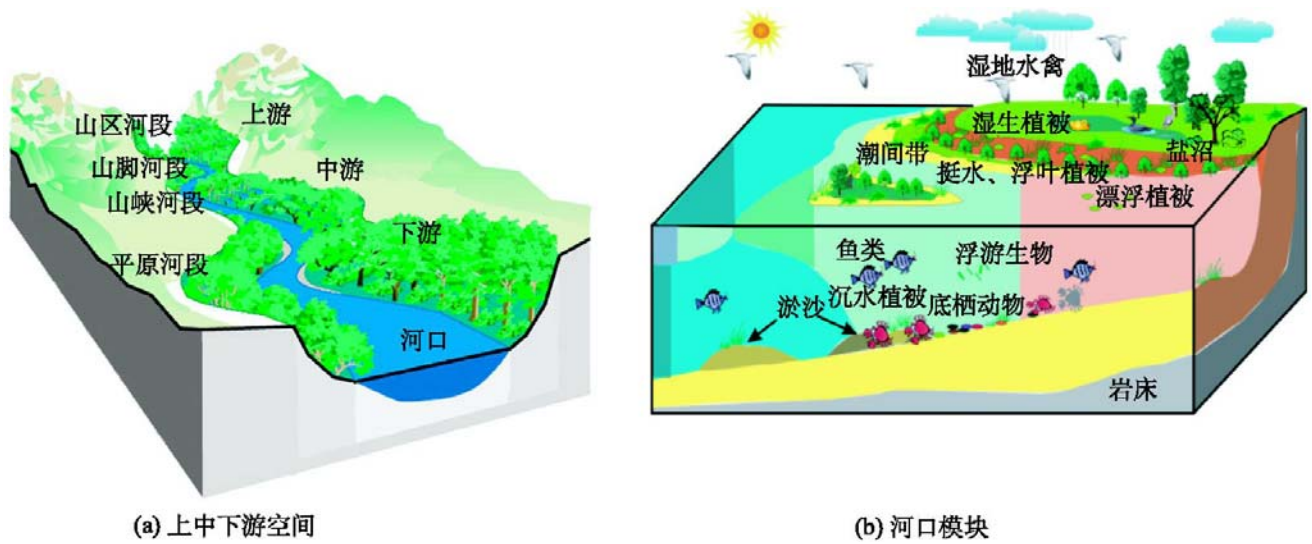


图 2.3 流域纵向连续性

Fig. 2.3 Longitudinal continuity of basins

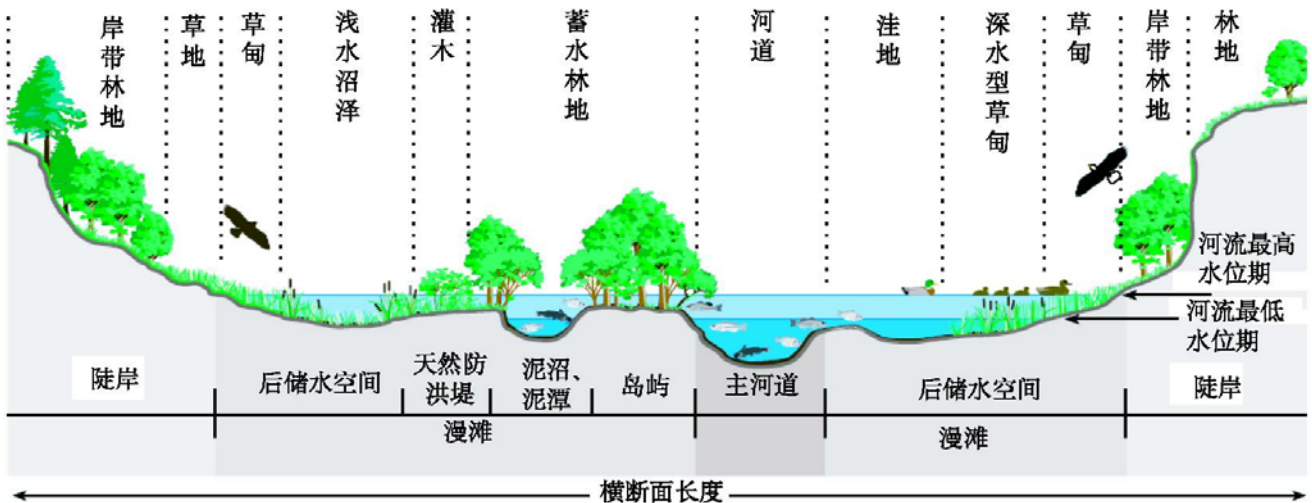


图 2.4 流域横向梯度性

Fig. 2.4 Transverse grades of basins

征，用不同的保证率来表示；年内变化指丰枯季节和月份间需水的变化。

5. 自然与人控双重性

流域生态系统是一个自然-社会-经济复合生态系统，具有自然和社会双重属性，流域生态环境需水相应具有自然性与人控性的双重属性。一方面流域生态环境需水规律的研究应该遵循流域生态系统的自然规律；另一方面流域生态环境需水的实现应充分考虑流域生态系统管理的目标，还应该根据流域社会与经济发展阶段和管理状况，关注水资源配置的人控性与合理性，达到流域内人-水-生态和谐共处。

2.2 流域生态环境需水规律框架构建

1. 生态环境需水与相关概念辨析

目前，国际学术界对生态环境的认识分属生态学和环境科学领域，不同国家针对自身生态环境的主要问题，使用生态需水或环境需水，但不同时使用。在国内相关的研究和管理领域，由于缺乏统一的认识，出现了生态需（用）水、环境需（用）水等诸多概念，这些概念常被混用或相互替代，使研究和计算结果不尽相同，给管理和操作带来了许多不便。

我们认为，生态环境需水是保证某种生态系统结构与基本功能、生态服务功能和特殊功能完整性所需要的一定质量的水量，偏重自然属性，与生态系统本身结构、特征以及外界环境因子相关，是生态系统的固有特性。对于一个特定生态系统，其生态环境需水有一个阈值范围，具有上限值和下限值，超过上下限值都会导致生态系统的退化和破坏。

生态用水则偏重社会属性，是面向可持续发展的水资源配置的一个概念，为保证某种水资源管理目标下，用于保证生态和环境安全的水量或生态系统实际使用的水量，与生产用水和生活用水并列，并经常受到这两种用水量的挤占，未必是真正符合生态环境需水规律的水量，具体情况下生态用水可能会大于或小于生态需水。

生态耗水是指流域生态系统中水循环过程水体、土壤和生物（植物、动物、微生物）生活和维持生态平衡消耗掉的水量。生态耗水需要通过水循环或径流等途径及时补给，不能够被生态系统直接利用或以其他的形式直接进入水循环，体现了周期性和重复补给的特点，是维持一定时段内流域生态系统结构与功能所必须补充的最小水量。

2. 概念与内涵

流域生态环境需水概念是一个整合概念，是以流域生态水文循环过程为主线，以保证流域生态系统结构与生态功能、生态服务功能和特殊性功能为目标，基本实现流域生态系统健康和水资源可持续利用所必须保证的水量，具有阈值性和等级性。

3. 需水类型

由于流域生态系统结构与功能的复杂性，不同的分类标准将对应不同需水类型，概括如下：

(1) 流域生态需水是指维持流域生态系统的生物体水分平衡及其生活环境所必需的水量，主要有以下几个方面：①维护天然植被所需要的水量，如森林、草地、湿地植被、荒漠植被等；②水土保持及水土保持范围之外的林草植被建设所需要的水量，如绿洲、生态防护林等；③保护水生生物所需要的水量，如维持湖泊、河流中鱼类、浮游植物等生活的需水；④协调生态环境，为维持水沙平衡、水盐平衡及维护河口地区生态环境，需要保持一定的下泄水量或入海水量。

(2) 流域生态环境需水的另一个重要功能在于满足生态系统对环境功能的要求。流

域内污染一般划分为点源污染和非点源污染两种类型。其中的点源污染负荷虽然对流域生态环境危害直接且影响程度较深，但由于受流域内人控性污水排放和污染治理的直接影响，点源污染问题可通过加强污染治理力度得以解决。相对而言，流域非点源污染的发生在时间上具有很强的随机性和间歇性，随年际降水和不同水文期的影响而变化，自然性更加明显。本书提出面向环境功能生态环境需水以人控性较弱的非点源污染为对象，以情景分析的方式，确定已满足流域不同类型生态功能要求的生态环境需水，是否可以同时满足难控性非点源污染负荷条件下环境目标的要求。

4. 面向水资源配置的生态环境需水

生态环境需水是理论上确定的保持一定程度生态系统健康所需要的一定质量的水量及其随时空的变化。生态环境需水的保障需通过自然补给和人为水资源配置两类方式来实现。其中人为水资源配置受到生态系统可配置水量和现状用水量的影响。本书基于流域内可配置水资源量，即天然径流量还原时未包括径流过程中自然消耗蒸发量和渗漏量的前提，以针对天然径流量的生态环境需水水资源配置为目标，在理论计算得到的生态环境需水中扣除蒸发、渗漏等自然消耗需水，提出面向水资源配置的生态环境需水概念，其结果对协调配置生产、生活及生态需水具有直接的指导意义。

流域水资源管理中面向生态环境的配置水量即是以理论计算生态环境需水为基础，以面向水资源配置的生态环境需水为目标，考虑生态系统现状用水量，所确定的生态系统不同时段及不同等级的缺水量。

2.3 整体模块法

1. 根据生态水文学原理划分模块

生态水文学作为生态学和水文学等学科交叉渗透形成的新兴边缘学科，是揭示基于生态格局和生态过程的水文学机制的科学，旨在通过研究水文和生态的相互关系，通过人力来改变水文过程，以保护全球所有生物的利益。生态水文学的研究对象不仅包括湿地生态系统，如河流生态系统、湖沼生态系统等，还包括旱地生态系统，如林地、草地生态系统等。生态水文学方法的特点与优势在于：综合考虑生态、水文和气候等多个因素；综合利用水利工程、环境工程和生态工程等方法；更注重从根本上全面改善或恢复流域生态系统的完整性。

据此，我们把流域划分为3个一级模块（图2.5），即旱地生态系统模块、湿地生态系统模块和河口生态系统模块，依次分解，并在此基础上进行分区或分类。

2. 根据水循环理论划分模块

水循环指地球上各种形态的水在太阳辐射、地心引力等作用下，通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗以及径流等环节，不断发生相态转换和周而复始运动的过程。根据水循环的不同途径与规模，全球水循环可划分为大循环与小循环。其中大循环指发生在全球海洋与陆地之间的水分交换过程，又称外循环。小循环指发生在海洋与大气之间或

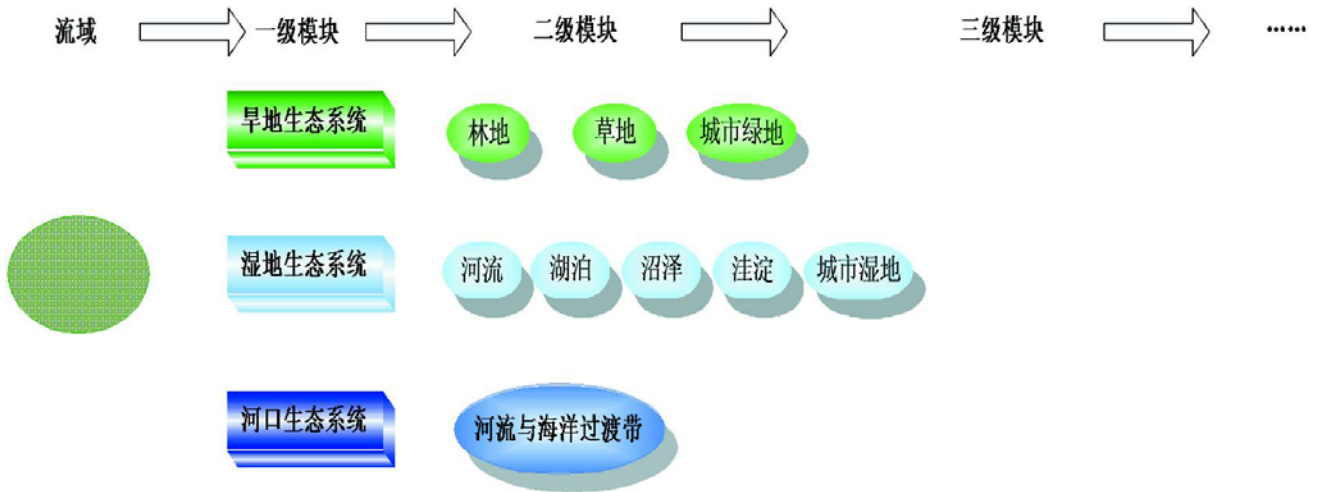


图 2.5 整体模块法 I ——生态水文法

Fig. 2.5 Integrated module method I ——eco-hydrological method

陆地与大气之间的水分交换过程，又称内部循环，前者可称为海洋小循环，后者称为陆地小循环。水循环过程具有不同的尺度、规模，同时各系统间还存在上下隶属关系。其中陆地水循环系统结构比海洋水循环系统复杂。流域作为全球第四级水循环系统，其下还可进一步区分，一级支流属于五级水循环系统，二级支流属于六级水循环系统。据此，我们可以把流域划分为以河流和水系为主的模块（图 2.6）。

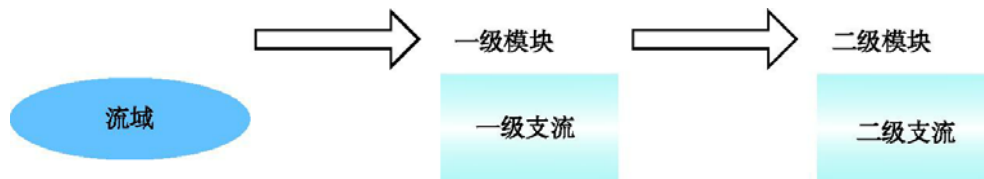


图 2.6 整体模块法 II ——水循环法

Fig. 2.6 Integrated module method II ——water cycle method

综上所述，根据不同的理论和方法可以有不同的模块划分，本书中采用生态水文学理论和方法，将流域划分为旱地、湿地和河口复合生态系统三个一级模块，在第 4~6 章中以海河流域与黄河流域为实例对流域生态环境需水规律进行系统的研究和分析。

2.4 系统分解法

在确定了一级模块之后，需要根据流域特点、关键生态环境问题和流域水资源管理目标，对一级模块进行系列分解。二级模块原则上是依据典型生态系统类型来划分的，三级模块是根据生态系统类型的空间位置和系统特征进行分区或分类，详见第 3 章。根据实际需要，还可以继续进行系统的分解，以便达到分析流域生态环境需水规律和科学计算流域生态需水的目的。

流域 ⇌ 一级模块 ⇌ 二级模块 ……

2.5 计算整合法

在进行整体模块法和系统分解法对流域生态环境需水计算单元确认之后，计算最低模块的生态环境需水。由于生态环境需水存在兼容性，直接加和导致重复计算的问题，结果导致流域生态环境需水偏高，必须采用整合计算模型逐级整合，最终得出不同时空尺度、不同等级和满足不同管理目标的流域生态环境需水。

最低级模块生态环境需水 …… \Rightarrow 二级模块 \Rightarrow 一级模块 \Rightarrow 流域

本书第 3~7 章分别是以黄河流域和海河流域作为实例研究，这是我国黄淮海平原中由于流域生态环境需水不足引起生态环境恶化的极具代表性的流域，流域特征及主要生态环境问题可以参见诸多专家的论述，这里不再赘述。

第3章 流域生态环境需水分区与分类

流域生态环境需水具有空间地域性的特点，表现在两个方面：①自然要素导致的空间差异性，即不同地区，由于地形地貌、水文地质、气候气象和土壤植被等自然要素的差异，生态环境需水表现出空间上的分异性；②人为因素导致的空间差异性，即对于不同空间上的生态环境需水主体（湿地、旱地河口等）来说，由于其生态环境保护与建设目标、生态功能与水功能等的差异，发挥生态环境功能的不同，生态环境需水也表现出一定的空间分布差异性规律。

空间地域差异性要求在进行生态环境需水研究时，在确定一级模块和二级模块之后，充分考虑不同地域在自然要素和人为因素等方面的不同，选取适宜于不同地域的计算方法和参数，确定需水标准。合理的生态分区是生态环境需水研究的基础。

3.1 流域生态环境需水分区原则与依据

不同区域间自然条件与生态状况的差异，使得生态环境需水的研究方法、计算参数与应用标准等显著不同。对于不同的生态环境需水类型，应该制定适用的生态环境需水标准，只有在设定的标准下，生态环境需水才具有明确的意义。Richter 等在进行河道内流量研究时提出适宜性管理（adaptive management）的理念，其实质就是要求根据不同河流、同一河流的不同河段以及不同的时间而确定相应的管理目标与需水标准，考虑适宜流量范围对不同河流（或河段）的适宜性（Richter et al., 1997）。这种适宜性还体现在研究方法 with 计算参数的选择上，如 Tennant 法主要适用于北温带河流生态系统，而不能直接应用于其他地区（Tennant, 1976），以曼宁公式为基础的 R2CROSS 法在确定计算参数时，需要综合考虑河流几何形态所确定的水深、河宽、流速等因素，并结合对河流断面的实地调查（Mosely, 1982）。可见，要保证研究方法与应用标准的适宜性，需要对不同空间的生态特征与环境梯度、河道形态与栖息地类型等进行合理的划分与明确的界定。

合理的空间分区是生态环境需水研究的基础，一方面它为流域生态环境需水的综合研究提供“由分到合”的途径和不同分区的计算资料；另一方面合理的分区为流域生态环境需水计算结果的应用提供可能。流域生态环境需水研究首先需确定生态分区，然后对形成的生态分区单元进行综合分类，为流域生态环境需水的研究提供基础。

一般来说，生态分区单元具有区内相似性和区间差异性两个特征，而且这种相似性和差异性总是相对于一定的空间尺度而言的。空间尺度越大，其内部相似性越小，差异性越大；而空间尺度越小，其内部相似性越大，差异性越小。对于不同的生态分区单元来说，可能存在空间上相连或不相连的若干个分区单元具有相似的区内属性（如地貌类型、生态保护目标等存在相似性）。要体现区间的这种相似性，就需要对生态分区单元进行区内属性的分析、综合与分类。

3.1.1 分区原则

1. 主导性因素原则

生态分区必须综合考虑影响流域生态环境需水的各种因素，并找出其主导因素，抓住问题的本质，以主导因素作为分区的主要依据，其他因素作为辅助因素进行修正。

2. 分异性与等级性原则

分异性与等级性是生态分区的理论基础与依据。根据各种因素，如地形、地貌、气候、植被等在空间上的差异，就可划分出不同的生态单元；流域生态环境需水在空间上也表现出一定的等级尺度特征，这就要求对生态空间进行逐级分区，以体现不同空间尺度和等级上生态环境需水的差异。

3. 相似性与差异性原则

在一定尺度上，各种自然地理要素表现出区域内的相似性和区际间的差异性，生态分区正是根据其相似性和差异性进行概括和识别，从而进行区域的合并和分异。这一原则是生态分区的重要原则，也是合理的确定流域生态环境需水计算方法与标准的基础。

4. 地域发生学与共轭性原则

地域分异是历史发展的产物，仅考虑其现代特征的相似和差异是不够的，需要从发生学的角度，用历史的态度考虑地域的划分与合并；同时应该考虑毗邻的自然地域系统之间的共轭关系和相互作用。

5. 可操作性原则

分区结果应该能够充分利用原有的水文资料，有利于计算结果在水资源管理中的应用。

3.1.2 分区依据

与一般性空间分区（如各种自然地理分区、生态环境建设分区等）相比，基于流域生态环境需水分析的生态分区应该体现其研究目的与特色，但又不能与一定的自然地理分异规律相悖，必须以一定的自然地理分区（区划）为依据，综合考虑各种因素（自然因素和人为因素）对流域生态环境需水的影响。以下分别选取已有不同分区（或规划）作为生态分区的依据。

1. 水资源分区

为保证生态环境需水计算分区的流域完整性，以水资源分区为依据，在水资源三级分区的基础上，选取适宜的指标进行生态分区的划分。

2. 相关自然地理分区（区划）

不同的地形、地貌（地貌类型与单元、海拔高度与坡度等）塑造不同的河道形态与湖泊、湿地类型，而水文气象要素（降雨量、径流量、蒸发量等）的区域性差异则影响需水标准的制定和计算参数的选取，流域生态环境需水分区要体现出这种差异性。自然地理分区方面的各项依据分别见表 3.1~表 3.5。

表 3.1 全国地貌分类标准

Table 3.1 Classification standards of national physiognomy

地貌分区	绝对高度/m	相对高度/m	地面特征
平原	多数<200		平坦，偶有浅丘孤山
盆地		盆底至盆周高差>500	内流盆地地势平坦，外流盆地分割为丘陵
高原	>1000	比附近低地高差>500	古侵蚀面或沉积面保留的部分平坦，其余部分起伏崎岖
丘陵		<200	宽谷低岭，或聚或散
低山	500~1000	浅切割 100~500，中等切割 500~1000	山行浑圆，地面零散，但比丘陵分布规则
中山	1000~3500	浅切割 100~500，中等切割 500~1000，深切割>1000	有山脉形态，但分割较碎
高山	3500~5000	浅切割 100~500，中等切割 500~1000，深切割>1000	尖峰峭壁，谷深山高
极高山	>5000	>1000	位于现在冰川和雪线以上，冰峰雪岭，山形高峻

表 3.2 全国湿度带划分标准

Table 3.2 Classification standards of national humidity belts

湿度带	年干燥度指数		自然景观	
	全国（除西藏）	西藏	全国（除西藏）	西藏
湿润	<1.0	<1.0	森林	常绿阔叶林
半湿润	1.0~1.6	1.0~1.6	森林草原	针叶林灌丛草甸
半干旱	1.6~3.5	1.6~5.0	草原	草原
干旱	3.5	5.0~16.0	半荒漠	半荒漠
极干旱	>16.0	>16.0	荒漠	荒漠、戈壁

表 3.3 全国地表径流带划分指标与标准

Table 3.3 Classification indicators and standards of national surface-runoff belts

地表径流带	分带原则		
	年降水量/mm	年径流深/mm	年径流系数
丰水带	>1600	>800	>0.5
多水带	800~1600	200~800	0.25~0.5
过渡带	400~800	50~200	0.1~0.25
少水带	200~400	10~50	<0.1
缺水带	<200	<10	有的地方为无流区

表 3.4 全国地表径流带分区范围

Table 3.4 Range of surface-runoff belts

径流带	分区范围
丰水带	年降水量大于 1600 mm 带，主要分布在我国东南部，包括台、闽、粤、琼的大部分，浙、赣、湘、桂的一部分，以及西藏东南部喜马拉雅山东南坡等地
多水带	年降水量 800~1600 mm 带，在上述降水带之北，淮河、汉水之南，包括长江中下游和广西、贵州、云南、四川大部分地区
过渡带	年降水量 400~800 mm 带，一般指淮河、汉水以北的秦岭山地、黄土高原、华北平原、东北平原以及边缘山地丘陵，并包括青藏高原东南边缘地区
少水带	年降水量 200~400 mm 带，在上述降水带之北，包括内蒙古高原和青藏高原东部草原带，以及西北内陆地区的天山、阿尔泰山迎风坡低山带
缺水带	年降水量 200 mm 以下地区，指上述降水带之西北或盆地中部，其中塔里木盆地、柴达木盆地年降水量在 50 mm 以下

表 3.5 水功能区划

Table 3.5 Water function regionalization

水功能区	分区类型
保护区	自然保护区（湿地、湖泊、河口、河段），源头水保护区（河段、湿地），还包括大型区域调水水源地
保留区	目前开发利用程度比较低，预留的后备资源水域
缓冲区	用水矛盾突出地区，省际断面或省际河流的上下游和左右岸
开发利用区	包括取水、排污型、单一取水型、景观型三种类型

3. 水功能区划与生态环境建设规划

水功能区划综合考虑不同河流、湖沼湿地的生态环境状况和生态环境功能，而生态环境建设规划则体现不同地域生态环境建设与保护目标的差异。以此作依据进行流域生态环境需水分区，可以根据不同的保护目标和所要求发挥的生态环境功能，制定不同的生态环境需水标准。

水功能区划：水利部编制的《中国水功能区划（试行）》中按照全国水功能区划技术体系的统一要求，选择全国 1407 条河流、248 个湖泊水库进行区划，共划分水功能一级区 3122 个，区划总计河长 209 881.7 km。在水功能一级区划基础上，根据二级区划分类与指标体系，对开发利用区进一步划分为饮用水源区、工业用水区、农业用水区、渔业用水区、景观娱乐用水区、过渡区和排污控制区共七类水功能二级区。在全国 1333 个开发利用区中，共划分水功能二级区 2813 个，河流总长度 74 113.4 km。水功能一级区概况见表 3.5。

生态环境建设规划：根据全国生态环境的特点，参照全国土地、农业、林业、水土保持、自然保护区等规划和区划，将全国生态环境建设划分为八个类型区：黄河上中游地区、长江上中游地区、三北风沙综合防治区、南方丘陵红壤区、北方土石山区、东北黑土漫岗区、青藏高原冻融区和草原区。

4. 水利工程状况与规划

各种水利工程，特别是水库大坝的建设改变了水流的自然属性，影响坝下一定河段的水文与生态状况，多个水库的存在则以节点的形式将河流人为地划分为若干个河段，使其影响趋于复杂化，流域生态环境需水研究的分区需考虑这种影响。

3.2 流域生态环境需水分区

3.2.1 分区指标体系

选取上述分区（或区划）作为流域生态环境需水分区的依据，并不等于要完全照搬上述分区的内容。不同的分区均具有相应的针对性，如水资源分区是为流域水资源规划与管理服务，湿度带和径流带体现了区域干湿状况和水资源的丰欠程度，而生态环境建设规划分区则主要是从生态环境状况以及生态保护的角度出发的，这些分区对流域生态环境需水分区有一定的借鉴意义，但涉及具体指标的选取上，应该体现流域生态环境需水研究的目的与特色，即以生态水文学作为学科基础，选取具有生态学和水文学意义的指标，体现各指标对流域生态环境需水的影响。选取影响流域生态环境需水的主导因素，建立基于流域生态环境需水计算的分区指标体系（表 3.6）。

表 3.6 流域生态环境需水分区指标体系

Table 3.6 Indicator system of regionalization for environmental flows in basins

目标层	要素层	指标层	指标性质	指标描述
	水文气象	年干燥度指数	定量、连续性	干燥度指数反映了区域的干湿状况，而径流深则表征区域地表水资源的丰欠程度
		年径流深度	定量、连续性	
生态分区	地形地貌	地貌类型	定性、离散性	不同的地貌类型、海拔高度与相对高度塑造不同的河段形态与栖息地类型，体现不同河段的生态特征和水文特征（如流速）
		海拔高度	定量、连续性	
	环境功能	水功能区划	定性、离散性	水功能区划体现水环境保护目标的差异

目标层	要素层	指标层	指标性质	指标描述
生态分区	生态功能	水生态状况	定性、连续性	水生态状况体现生态保护目标的区域差异，重点保护物种则体现某些河段的生态重要程度
		重点保护物种	定性、离散性	
	河湖特征	河湖分布 河段划分	定性、离散性定 性、离散性	河湖（含湿地）分布反映河湖的空间位置，河段划分体现上、中、下游河段、源头区与河口区的不同河段的特征（大尺度）
	水利工程	水库节点	定性、离散性	水库大坝影响坝下水流和栖息地的自然属性

其中年干燥度指数、年径流深度、地貌类型可作为生态分区的核心指标，用于生态分区的初步划分；海拔高度、水功能区划、水生态状况与重点保护物种、河湖分布与河段特征、水库节点作为生态分区的辅助指标，用于对初步的生态分区单元进行修正与合并。

3.2.2 分区方法与步骤

流域生态环境需水在计算分区时采用空间叠加分析、定性分析与专家判断相结合的方法。计算分区步骤如下：①利用地理信息系统的空间分析功能，选择空间分析的软件环境（如 ARCGIS 等），将流域干燥度图、径流带图、地貌区划图进行投影转换，并与流域水资源分区图进行配准；②将流域水资源三级分区图依次与流域干燥度图、流域径流带图和流域地貌区划图进行叠加，得到初步的生态分区结果；③以海拔高度、水功能区划、水生态状况与重点保护物种、河湖分布与河段特征、水库节点作为生态分区的辅助指标进行定性分析，结合专家小组的咨询与判断，对初步的生态分区结果进行调整、修正与合并，得到最终的生态分区结果。

由于叠加生成的初步生态分区只考虑了年干燥度指数、年径流量和地貌类型三个核心指标，而忽略了其他各项指标，使得分区结果可能存在不合理的地方，这就需要对初步的分区结果进行修正。初步生态分区的修正与合并应遵循以下几条主要原则：

- (1) 保证水资源三级分区的基本完整，以实现流域的完整性；
- (2) 遵循主导因素的原则，对需要调整的分区，应以地貌类型区为准，并根据海拔高度对地貌类型区进行调整；
- (3) 充分考虑水库作为节点对生态环境需水的影响，一般情况下不宜将水库的上游和下游划在同一分区内；
- (4) 保证湖泊、湿地的完整性，尽量将同一湖泊、湿地划归同一分区内；
- (5) 确定生态分区单元的最小面积。