

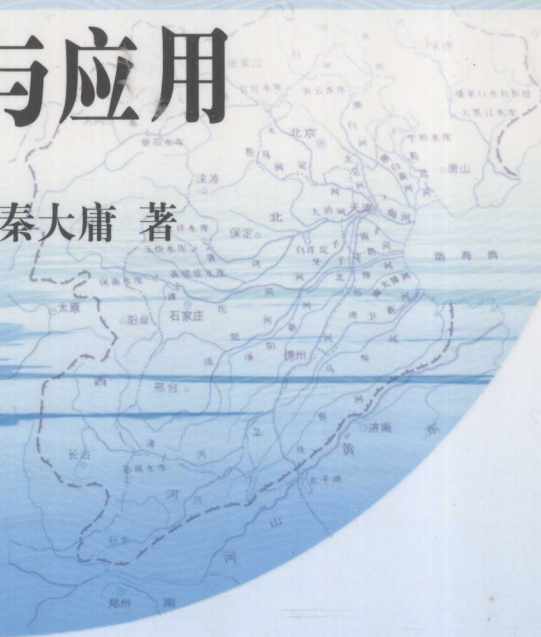
“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

河流生态系统综合分类理论、 方法与应用

高晓薇 秦大庸 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

河流生态系统综合分类理论、 方法与应用

高晓薇 秦大庸 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍河流生态系统综合分类的理论方法,科学分析天然及近天然河流发育形成的地质年代、地理气候条件、河水补给来源、地貌条件、平面形态、微生境特征及生物群落组成,并在考虑人类活动干扰的情况下,探讨河流生态系统综合分类可能的应用途径,包括河流生态系统健康评价、可修复性分析及水生态系统保护与修复,并以深圳河和大汶河生态系统为例,进行河流生态系统综合分类研究,开展水生态系统保护与修复实践。

本书涉及水利、环境和生态等多学科内容,可供从事水资源保护与河湖健康保障的工程技术和规划管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

河流生态系统综合分类理论、方法与应用 / 高晓薇, 秦大庸著. —北京: 科学出版社, 2014. 9

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-041608-7

I. 河… II. ①高… ②秦… III. 河流-生态系统-分类-研究 IV. X321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 183719 号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 / 责任校对: 彭 涛

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

*

2014 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 9 月第一次印刷 印张: 10 1/2 插页: 2

字数: 500 000

定价: 100.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

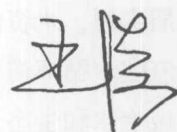
的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在 2010 年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域 973 计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河 973 计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011 年 10 月 10 日

序

“水者何也？万物之本原，诸生之宗室也。”水滋养万物，孕育蕴藉深厚的文化。水势浩荡的尼罗河孕育了灿烂的古埃及文明，幼发拉底河的消长荣枯见证了巴比伦王国的兴盛亡衰，地中海沿岸的自然环境是古希腊文化的摇篮，流淌在东方的长江与黄河则滋润了底蕴深厚的中华文化。水生态文明是以人水和谐为理念，以水资源可持续利用支撑社会经济可持续发展，保障生态系统良性循环为主体的文化伦理形态。无论从自然与社会的视角，还是生态学的视角，水生态系统都不再孤立于人类之外，而是作为人类社会的共同体存在，两者相互依存。

我国政府高度重视水生态文明建设。党的十八大报告中提出了建设美丽中国、推进生态文明的历史命题和“尊重自然、顺应自然、保护自然”的生态文明理念，诠释了生态文明的内涵。报告指出“良好的生态环境是人类社会经济持续发展的根本基础。要实施重大生态修复工程，增强生态产品生产能力”。由此可知，建设水生态文明与人类社会可持续发展休戚相关，而水生态保护与修复是水生态文明建设的关键。

河流生态系统是人类赖以生存和发展的基础，也是水生态文明建设的重要组成部分，以其独特的自然之美，丰富了水生态文明的内涵。然而，由于人类过度开发和利用河流生态系统，忽视了河流生态系统的健康，造成河道断流、水体污染甚至水生生物的消亡。随着人类社会的进步，人们逐步认识到河流生态系统保护与修复的极端重要性，这不仅能够为人类生存和发展提供良好的环境，也可满足人类对于精神和文化的需求。

正是在上述背景和条件下，著者撰写了《河流生态系统综合分类理论、方法与应用》一书。本书较为系统地阐述了河流生态系统相关的概念和理论，建立了面向生态的河流生态系统综合分类方法，探讨了水环境与水生生物的作用关系，并以深圳河和大汶河为例，将河流生态系统综合分类方法应用于河流健康评价，提出生态修复工程措施。该书最大的亮点是从河流的纪、系、统、类、型、境、群多个层次探讨不同时空尺度上影响河流行为的环境因子及其生态效应，反映河流发育的地质地貌、地理气候、河流形态、生境特征及生物群落等在不同河流上的类型归属和生态表现，系统阐述了现有分类方法在综合分类体

系中的地位和作用，该方法不仅涉及河流生态系统的自然属性，还融合了流域内的社会因素，强调了河流生态系统的多属性综合效应。本书是在交叉学科发展方面呈现的创新之作，从理论方法上可为我国的水生态保护与修复提供科学指导。

刘培斌

2014年8月

前 言

党的十八届三中全会作出加强生态文明建设的重大部署，并明确了生态文明的建设内容为“实施重大生态修复工程，增强生态产品生产能力，推进荒漠化、石漠化、水土流失综合治理，扩大森林、湖泊、湿地面积，保护生物多样性……”。可见，水生态修复在生态文明建设中占据了突出地位，因此开展河流生态系统相关研究意义重大。

河流生态系统是典型的淡水生态系统，包括河道水流区以及与此发生水力联系的承载水环境和水生生物的区域。河流生态系统主要包括流水生态系统、河岸带陆地生态系统和湿地沼泽生态系统。河流生态系统是水生生物重要的栖息环境，洪水和泥沙的输送通道，社会经济生产的水源供给者，也是人类活动过程中排放物质的受体。河流生态系统通过自我调节机制，保持自身的生态平衡，并在最大程度上克服和消除来自外部的扰动。

河流生态系统的多功能属性决定其在被开发利用过程中受到人类活动的强烈干扰，甚至导致河流结构和功能受损或退化。如何合理开发利用河流资源，开展受损河流生态系统保护与修复工作，将成为社会广泛关注的热点，也是进行河流生态系统分类和健康评价的最终目的。

河流生态系统综合分类有助于认识河流系统形成、发育、发展及演化机理，为河流生态系统健康评价提供基础支撑，同时也是开展水生态系统保护与修复的科学依据。随着人类对河流生态系统认识程度的深入，单一的河流生态系统分类方法已不能满足新的历史时期开发利用以及保护修复河流的需求。本书通过对河流生态系统形成背景及结构特征的深入分析，综合了传统河流系统分类的优势，提出河流生态系统综合分类方法。该方法从不同时空尺度上探讨影响河流生态系统的环境要素及其生态效应，科学分析河流发育形成的地质年代、地理气候条件、河水补给来源、地质地貌条件、平面形态、微生境特征及生物群落在特定河段上的类型归属及其生态表现，系统阐述现有分类方法在综合分类体系中的地位和作用，并揭示传统分类方法之间的关系及适用范围。

本书研究指出河流生态系统综合分类层次结构中不同空间尺度环境要素的生态效应差异显著，其中地理气候和地貌条件是决定河流水生生物分布的决定性因素。结合国内外研究资料，按照河流生态系统综合分类的层次递进关系分析各典型河流生态系统的特征，包括河道基本通量（径流量、输沙量等）与水生生物群落（浮游生物、水生植物、底栖生物和游泳动物等）的组成和分布状况。通过对生物群落中部分广适种、气候种和典型地方

种的辨识,至少在“属”的水平上详细刻画典型河流生态系统的特征,以期为河流生态系统健康评价及保护修复提供近似的“生物基准”。

本书列举了深圳河和大汶河两个案例。深圳河案例是基于“深圳市水环境改善若干关键问题及其技术对策研究”项目的研究成果提炼而成。该项目于2008年立项,由北京大学与深圳市环境科学研究院联合开展技术攻关。深圳河是典型的城市河流,20世纪80年代已出现水污染现象,但是其河流水文和生物监测工作直至90年代中后期才逐渐开展,数据资料系列较短且缺失严重,亟须借助河流生态系统综合分类弥补数据缺失问题。该案例依据河流生态系统综合分类的层次结构,从深圳河流域自然环境背景和历史演化过程出发,兼顾社会经济快速发展的特点,对深圳河生态系统进行结构解析、功能辨识、健康评价与改善措施优化等,提出了一套切实有效的河流健康评价方法。大汶河案例基于“泰安市现代水网建设规划”项目的部分核心内容总结而成。该研究将河流生态系统综合分类拓展为流域分区,以现代治水理念为指导,依托大汶河流域自然水系,结合主导功能判别,分区域有针对性地开展水生态系统保护与修复工作。项目研究成果已应用于泰安市现代水网建设规划,也为山东省其他地市水生态系统保护与修复工作提供了良好示范作用。

本书共8章,涵盖了河流生态系统综合分类理论、方法以及其在深圳河和大汶河的实践应用。主要内容如下:

第1章介绍河流生态系统综合分类的基础知识,包括河流生态系统的特征与功能、构成基本要素、研究尺度与分级等内容,明晰河流生态系统的内涵与外延。第2章从学科角度,系统归纳河流生态系统综合分类的科学基础。河流生态系统的水文过程、地质地貌过程以及水环境与水生态等基础研究均为河流生态系统综合分类提供了科学支撑。第3章论述河流生态系统综合分类方法,揭示传统河流生态系统分类方法与综合分类方法的内在联系,提出河流生态系统综合分类的层析结构以及编码方法。第4章介绍河流生态系统综合分类的生态特征研究,通过探讨环境要素与水生生物的作用关系,预测典型河流生态系统的生境条件及生物群落组成。第5章探讨河流生态系统受到的人类活动干扰,研究对象由天然或近天然河流扩展为全部河流生态系统,为河流生态系统综合分类理论的实践应用提供前提条件。第6章分析河流生态系统综合分类可能的应用途径,包括在河流生态系统健康评价和水生态系统保护与修复中的应用等。第7章介绍河流生态系统综合分类在深圳河的应用案例,基于河流生态系统综合分类提供的特征信息,开展深圳河生态系统健康评价与可修复性分析。第8章介绍河流生态系统综合分类在大汶河的应用案例,将河流生态系统综合分类在流域面上进行拓展,分区开展水生态系统保护与修复研究。

本书在编写过程中,参考了许多国内外学者的著作和论文,在此谨向他们表示由衷的感谢。本书的撰写与出版还得到王浩院士、北京大学倪晋仁教授的指导与帮助,并获得中

国水利水电科学研究院科研专项“水资源开发利用控制红线确定及指标体系建立”(课题号: ZJ1224) 项目的资助, 在此一并感谢。

由于本书涉及内容较为前沿且领域广泛, 很多问题仍需要探索和深入研究, 加之作者水平所限, 因此难免出现一些不妥之处, 恳请读者谅解并不吝赐教。希望本书的出版能起到抛砖引玉之功效, 为从事水资源保护与河湖健康保障相关科研与实践的工作者提供参考。

作 者

2014 年 2 月于北京

目 录

总序

序

前言

第1章 河流生态系统综合分类的基础知识	1
1.1 河流生态系统的特征与功能	1
1.1.1 河流生态系统的特征	1
1.1.2 河流生态系统的功能	4
1.2 河流生态系统构成基本要素	8
1.2.1 环境要素的构成	8
1.2.2 生物群落的构成	11
1.3 河流生态系统的研究尺度与分级	11
1.3.1 河流生态系统的研究尺度	12
1.3.2 河流生态系统分级	15
1.4 河流生态系统模型	16
1.4.1 河流连续统模型	16
1.4.2 过程等级模型	17
1.4.3 自然水流模型	18
第2章 河流生态系统综合分类的科学基础	19
2.1 河流生态系统的水文过程	19
2.1.1 河流水系	19
2.1.2 河流水循环	20
2.2 河流生态系统的地质地貌过程	25
2.2.1 水生态系统演化的地质年代	25
2.2.2 流水作用与地貌形态	26
2.2.3 流水地貌与河床	27
2.3 河流水环境与水生态	28
2.3.1 河流水环境	28
2.3.2 河流水生态	30
第3章 天然及近天然河流生态系统综合分类	32
3.1 河流生态系统的地质年代	32
3.1.1 地质年代与古生物群落演化	32

3.1.2	不同地质年代的生物条件分析	33
3.2	河流生态系统的地理气候和水源补给	33
3.2.1	气候类型	33
3.2.2	补给来源	35
3.2.3	不同地理气候和水源补给的水文情势	36
3.3	河流生态系统的地貌条件	37
3.3.1	流水地貌形成过程	37
3.3.2	依据地貌条件的分类	39
3.4	河流生态系统平面形态	40
3.4.1	河型成因各种理论	40
3.4.2	依据平面形态的分类	42
3.5	河流生态系统综合分类层次结构	42
3.6	河流系统编码方法	45
3.6.1	多尺度编码系统	45
3.6.2	简化四叉树编码	45
第4章	典型河流生态系统特征分析	47
4.1	河流水生生物群落的组成	47
4.1.1	浮游生物	47
4.1.2	水生植物	48
4.1.3	底栖生物	49
4.1.4	游泳动物	50
4.2	河流水生生物与环境要素	51
4.2.1	藻类与环境要素	52
4.2.2	水生植物与环境要素	53
4.2.3	底栖动物与环境要素	54
4.2.4	鱼类与环境要素	55
4.3	典型河流生态系统生境条件及生物群落组成	57
4.3.1	各地质年代河流生态系统的生境条件	57
4.3.2	各地理气候区河流生态系统的生境条件	58
4.3.3	各水源补给类型河流生态系统的生境条件	59
4.3.4	各地貌条件区河流生态系统的生境条件	61
4.3.5	各平面形态河流生态系统的生境条件	64
4.3.6	典型河流生态系统的生物群落组成	65
第5章	人类活动干扰对河流生态系统的影响	71
5.1	河流生态系统与人类活动的发展关系	71
5.1.1	干扰与河流生态系统演变	71
5.1.2	河流治理与修复的阶段划分	72

5.2 人类活动干扰对河流水文情势的影响	74
5.2.1 河川径流量减少	74
5.2.2 城市化水文效应	74
5.2.3 水文节律改变	75
5.3 人类活动干扰对河道形态的影响	80
5.3.1 河道窄弯取直	80
5.3.2 水域侵占	81
5.4 人类活动干扰对水环境条件的影响	82
5.4.1 本底化学特征值改变	82
5.4.2 污染负荷加重	83
5.5 人类活动干扰对水生生物的影响	84
5.5.1 生物资源量减少	84
5.5.2 生物多样性锐减	84
第6章 河流生态系统综合分类的应用	86
6.1 河流生态系统健康评价	86
6.1.1 河流生态系统健康	86
6.1.2 河流生态系统健康评价方法	88
6.2 河流生态系统可修复性分析	92
6.2.1 河流生态系统结构的稳定性	92
6.2.2 河流生态系统的可修复性评价	94
6.3 水生态系统保护与修复技术	95
6.3.1 物理修复技术	95
6.3.2 化学修复技术	95
6.3.3 生物-生态修复技术	96
第7章 深圳河生态系统健康评价与可修复性分析	98
7.1 深圳河流域概况	98
7.1.1 自然地理及生态特征	98
7.1.2 社会经济特征	101
7.2 深圳河生态系统健康评价	102
7.2.1 深圳河生态系统功能现状分析	103
7.2.2 深圳河生态系统功能表征	107
7.2.3 深圳河生态系统功能权重	113
7.2.4 深圳河生态系统健康综合指数	114
7.2.5 深圳河生态系统健康评价敏感性分析	116
7.3 深圳河生态系统可修复性分析	117
7.3.1 深圳河生态系统修复目标	117
7.3.2 深圳河生态系统可修复性评价	119

7.4 深圳河生态系统主体功能修复	122
7.4.1 水质净化功能修复	122
7.4.2 输水泄洪功能保护	123
7.4.3 泥沙输移功能保护	123
7.4.4 景观娱乐功能修复	124
第8章 大汶河生态系统保护与修复	125
8.1 大汶河生态系统特征	125
8.1.1 地理位置	125
8.1.2 地质年代	126
8.1.3 地形地貌	127
8.1.4 水文气象	127
8.1.5 水资源及水生生物资源状况	129
8.1.6 社会经济发展	129
8.2 大汶河生态系统综合分区	130
8.2.1 分区指标体系	131
8.2.2 综合分区结果	132
8.3 大汶河生态系统分区保护与修复	133
8.3.1 水土流失重点治理区的水生态系统保护与修复	133
8.3.2 水功能重点保护区的水生态系统保护与修复	137
8.3.3 生态景观建设区的水生态系统保护与修复	140
8.3.4 河流廊道景观建设区的水生态系统保护与修复	144
参考文献	147

| 第 1 章 | 河流生态系统综合分类的基础知识

1.1 河流生态系统的特征与功能

河流生态系统是水生态系统中最为重要的一种类型，包括河道水流区以及与此发生水力联系的承载着水环境和水生生物群落的区域。河流生态系统主要包括流水生态系统、河岸带陆地生态系统和湿地沼泽生态系统。

1.1.1 河流生态系统的特征

河流生态系统是在一定空间中栖息的水生生物与其环境共同构成的统一有机体，是水生态系统重要的结构和功能单位。河流水生生物群落包括浮游生物、水生植物、底栖生物、游泳类动物和水生微生物等，每种水生生物位于河流生态系统食物链的不同位置，分别作为生产者、消费者和分解者出现。河流环境是指组成河流生态系统的非生物环境，主要包括水温、水质、底泥条件等因素，其为水生生物生存和繁衍提供了必要的生存环境。河流水生生物既适应于河流的水环境，同时也在不断地改变着水环境。

河流生态系统主要具备以下 4 个方面的特征：①河流生态系统表现出水流的持续流动。河流生态系统区别于湖泊水体的直观特征是河流水体具有流动性，借助水流的运动，河流生态系统不断地进行着物质循环和能量流动。②河流生态系统是典型的多等级体系。河流生态系统是具备递进关系的多重空间和时间等级结构，具体表现为河流生态系统中大尺度的环境要素决定小尺度环境要素的边界条件和演变过程（Brierley and Fryirs, 2000）。③河流生态系统具有时空异质性。在空间上，河流生态系统从源头开始沿纵向的河宽、水深、流

速、水温等物理量呈现连续变化；在时间上，河流生态系统处于不断地运动变化之中，在百万年、百年、月和日甚至更短的时间尺度下，河流生态系统的演化造成环境要素和生物群落组成的差异。④河流生态系统具备生物适应性。河流生态系统的生物群落适应于其栖息的水环境，在自然条件下，相似的河流生态系统环境中会出现类似的水生生物群落。但是随着人类活动范围和强度的增加，构成生境条件的环境要素受到不同程度的人类活动干扰，造成生物群落的组成和结构发生不可预测的改变。

1.1.1.1 河流生态系统的流动性

河流生态系统的水体具有流动性，在水体流动过程中伴随着能量流动、物质输移和信息传递。

(1) 能量流动

河流生态系统的能量流动是服从于热力学第一定律和第二定律的，即河流生态系统内部增加的能量等于外部输入的能量，且能量的传导具有方向性。能量流动分别在生态系统、食物链和种群3个层次上进行。例如，能量可以通过食物链从生产者到顶级消费者各层次种群间进行传递，通过测定食物链各环节上的能量值，可为研究河流生态系统能量损失和存储提供资料。

(2) 物质输移

河流生态系统物质输移存在两种形式：一种是借助于水体流动产生的物质输移和扩散，输送的物质包括泥沙、溶于水体的营养物质和各类污染物；另一种是发生在食物链各营养等级间的物质输移。

(3) 信息传递

河流生态系统的信息传递媒介包括水文周期、水位、流速、流量、水温等水环境要素，河流生态系统通过水环境要素的变化传递信息。例如，水位的涨落、水量的丰枯变化以及流速和流向的改变会导致鱼类产卵或休憩场所的迁移。

1.1.1.2 河流生态系统的多等级体系

河流生态系统作为典型的多等级体系（傅伯杰等，2001），体现为大时空

尺度的环境要素控制小尺度要素的变化过程。尺度越大,环境要素变化速率越慢,因此,小尺度环境要素的变化速率相对较快。同时,大尺度环境要素为小尺度环境要素提供边界条件。河流生态系统的空间等级划分可以包括区域、流域、水系和河段4个尺度。

1) 区域是指一个或数个流域在内的行政区域。该尺度河流生态系统不一定满足水文完整性要求,但有助于识别行政干预的影响。河流生态系统在区域尺度变化过程的约束条件涉及人口、社会经济、基础设施和区域管理等诸多人为因素。

2) 流域是地表及地下分水线所包围的空间区域。一方面,流域是通过水文循环将自然资源与社会资源整合在一起;另一方面,流域是区域的一种特殊形式,主要通过土地利用和水资源配置影响河流生态系统的发展演化。流域具有水文完整性,因此流域尺度的研究有助于河流生态系统重要过程、分布模式和定性分类的识别。

3) 水系是由干支流构成的脉络相通的结构系统。它包括源头、流路、汇流、河口、干支流等分布要素,还包括与河流相连接的湖泊、水库、池塘、湿地、河汊、蓄滞洪区等。主干流的局部扰动会通过水系内部的传递呈现放大趋势,并影响整个河流生态系统。

4) 河段是水环境要素较为均质和功能相对单一的空间尺度单位。作为河流生态系统空间等级上的最小单位,河段尺度的环境要素变化受到大尺度环境要素的控制和影响。因此,针对于河段实施的生态修复工作需同时考虑河段在水系、流域及区域所处的位置和作用,以实现修复目标并维持修复效果。

1.1.1.3 河流生态系统的时空异质性

在空间上,有学者在20世纪80年代提出了河流连续统概念(Vannote et al., 1980),该理论模型将河流生态系统视为一个连续、流动并且完整的系统。在实际观测中,河流生态系统沿着河流走向表现出空间上的差异,即纵向地带性。河流生态系统从源头集水区至河流下游的物理量呈现连续变化的特征。与此同时,生态过程也因为物理量的连续变化表现出空间差异。

在时间上,河流生态系统不断地发展演化。不同的年份、季节甚至一日内