

“博士后文库”序言

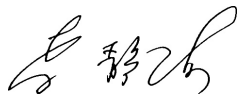
1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。40年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入“博士后文库”，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

序

“沔彼流水，其流汤汤。”

江河奔腾，是天地至理的具象流转；水生万物，是格物致知的无尽探求。奔流不息的河水孕育并延续生命，见证了地球演化与文明进程。河流不单是自然的纽带，更是一部记录生命与人类互动的历史诗篇。因此，系统性认知和保护河流具有深远而持久的科学与实践意义。

被誉为“世界屋脊”的青藏高原，平均海拔逾 4000 m，河流纵横、冰川磅礴、湿地辽阔。巍峨的昆仑山脉冰雪消融，汇成黄河、长江、雅鲁藏布江、怒江与澜沧江之源，形成壮丽的山河奇观。高原冰川融水哺育万物，不仅塑造了亚洲高山区的地貌格局，也深刻影响气候变化、生物多样性更替与生态系统功能演变。探索高原河流系统环境-生物-生态的非线性复杂关系，预测其未来演化趋势，是关乎全球生态安全与人类福祉的重要科学命题。

周雄冬博士是我在清华大学执教期间指导的最后一位博士研究生，为人朴实严谨，潜心于河流生态动力学理论的研究。多年来，他与团队成员协力深入探究了雅鲁藏布江、怒江、若尔盖湿地等生境演替过程，系统分析了以底栖动物为代表的生物群落的结构、功能与过程特征，揭示了青藏高原南部基岩约束型河流与北部冲积型河流的地貌-生态耦合规律及其驱动机制，不仅深化了对高原河流生态本底与动态的认知，还为高原生态保护与水环境治理提供了重要的理论支撑与实践借鉴。

该书大体分为三部分：第 1~3 章系统阐述了河流生态系统的基本理论与研究方法；第 4~6 章分别以雅鲁藏布江、怒江及若尔盖湿地为典型案例，解析了河流演变的局地生态效应；第 7~9 章基于底栖动物群落特征，构建了高原河流生态的统计评价与数值模拟框架。全书以河流生态动力学为核心理论，结合长期的野外观测与模型分析，为读者展示了青藏高原河流生态的脆弱性特征、生物群落及食物网的响应规律与调控机制。书中内容既反映了对河流生态系统演变规律的深入理解，也体现了“江河战略”理念的贯彻与实践，展现了推动系统化治理、科学化保护与人水和谐共生的积极探索。

保护与合理利用河流，是人类永恒的课题。守护江河这一奔流不息的生命

之源，以科学的视角读懂江河的演变与命运，以理性的智慧与持续的行动明其理、知其变、护其生、延其续，皆是未来治水与护水事业中需要长期坚守和求索的方向。



王兆印

清华大学

2025 年 10 月 27 日

前 言

青藏高原被誉为“世界屋脊”和“亚洲水塔”，孕育了长江、黄河、澜沧江、怒江与雅鲁藏布江等亚洲重要河流，“高海拔、低代谢、寡营养”的极端环境特征造就了全球最为敏感和脆弱的河流生态系统之一。近 60 年来，年均 0.03°C 的持续升温趋势加剧了青藏高原“南干北湿”的气候分异，引发了基流衰减、极端洪涝频发等水文情势剧变，导致河流动力过程重塑和生态系统响应失稳。在上述背景下，精准解析河流的生态系统特征，揭示特殊本底下的生态响应机制，构建动态模拟体系，已成为当前青藏高原河流生态动力学研究的核心命题。

作为河流生态系统的关键指示类群，大型底栖无脊椎动物（benthic macroinvertebrate，简称“底栖动物”）为河流生态系统的主要次级生产力，在物质循环和能量流动过程中发挥着承上启下的关键作用。这一类群的体长通常超过 0.5 mm，且部分或完整生活史发生在河床和水体的交界面。据现有记录，我国已发现底栖动物超 6300 种，涵盖水生昆虫、虾、蟹、螺、贝、水蛭等众多门类。底栖动物分布广泛、生境专一、响应灵敏且便于采集，是破解河流生态密码的理想研究对象。

本书立足河流生态动力学理论体系，聚焦底栖动物群落的结构、功能与过程，系统揭示了青藏高原南部基岩约束型河流和北部冲积型河流的地貌-生态耦合规律及其机制。全书共 9 章，逻辑清晰，层次分明。第 1 章介绍了河流生态系统的基本概念和奠基理论，以及青藏高原河流生态系统的主要特征；第 2 章阐述了底栖动物及其多尺度影响因素，探讨了群落构建和食物网动态等关键生态过程；第 3 章构建了方法学体系，涵盖底栖动物采样鉴定、河流健康评价与生态模拟技术；第 4~6 章分别以雅鲁藏布江大型尼克点发育、怒江堰塞湖群形成与白河弯曲河流-牛轭湖系统演变为例，分析了不同河流地貌动力过程对底栖动物多样性和物种组成的影响规律及其机制；第 7 章集中比较了三个典型流域的底栖动物群落格局，构建了适用于青藏高原河流生态评价的多参数指数体系；第 8 章将评价体系和水动力模型相结合，实现了不同径流情景下底栖动物群落的模拟预测，提出了综合考虑生物完整性的生态流量计算方法；第 9 章探讨了食物网介导的物质循环和能量流动过程对河流演变的响应规律。

本书的研究案例表明，青藏高原河流的地貌演化和生态本底特殊性决定了其生态系统对动力过程的响应方式显著有别于平原河流。因此，在开展高原河流生

态系统的综合管理和保护利用时，若直接套用平原河流的管理策略和技术方法，可能存在局限，甚至会产生谬误，进而对河流学家、生态学家以及相关管理人员科学调控、利用、保护与修复高原河流生态系统提出更高的要求。

自 2012 年起，作者先后对黄河、雅鲁藏布江、怒江、澜沧江等重要河流进行了野外观测和采样，足迹遍布国内众多重要江河。通过课堂学习、文献研读与实践总结等多方面的积累，作者及时掌握了河流生态动力学领域的最新进展，并将前沿理论和研究成果融汇成本书。值得一提的是，2013~2024 年于清华大学攻读博士学位和从事博士后研究期间，作者师从王兆印教授、邵学军教授和徐梦珍副教授，三位恩师的悉心指导对作者理解河流生态动力过程产生了深远影响，令作者受益终身。

本书的完成凝聚了集体的智慧与付出。作者在野外观测与采样过程中得到了韩鲁杰、范小黎、冀自青、黄科翰、雷发楷、李鑫、刘波阳、刘玮、刘闻新、刘星、刘逸博、罗雅祺、吕立群、孙冻、汤久凯、王聪聪、王向超、王紫荆、翁楚彬、杨瑶、杨雨风、张晨笛、张家豪、周心怡等同事的慷慨协助与无私支持，谨此致以诚挚的感谢。李志威、潘保柱、易雨君、Mike Bisset 和 Giri Kattel 等老师以不同方式为本书的撰写提供了宝贵指导与帮助，特此深表谢意。同时，衷心感谢张荒山、覃超、熊雄对书稿提出的建设性意见；感谢胡玉洁在书稿排版设计、文字校对及图表优化方面的细致工作与大力支持；感谢中国科学院水生生物研究所水生命大数据与人工智能中心以及湖北东湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站在资料整理与书稿撰写阶段给予的有力支撑。对于本书引用的研究成果与学术观点，作者在参考文献中已尽力予以标注，在此一并致谢，如有遗漏，敬请谅解。

本书的出版得到了中国博士后科学基金的资助，各项研究工作也获得了国家自然科学基金项目（52579079；52309094；U2243222；U2240207）和国家重点研发计划项目（2021YFC3200902；2021YFC3200905）的支持，在此一并致谢。

作 者

2025 年 3 月于武汉市东湖畔

目 录

“博士后文库”序言

序

前言

第1章 河流及其生态系统	1
1.1 河流系统	1
1.1.1 河流分类	1
1.1.2 流域和水系	2
1.1.3 河流形态	5
1.1.4 河流景观格局	7
1.2 河流生态系统	8
1.2.1 河流生态系统的特征	8
1.2.2 河流栖息地	9
1.2.3 河流生态系统的重要理论	13
1.3 青藏高原河流及其生态系统	18
1.4 本章小结	21
第2章 河流生态的要素和过程	23
2.1 河流生态要素	23
2.1.1 水生生物类群	23
2.1.2 水环境条件	27
2.2 河流生态过程	34
2.2.1 生物多样性	34
2.2.2 群落构建	36
2.2.3 食物网	41
2.3 本章小结	44
第3章 河流生态评价和模拟	45
3.1 河流生态健康	45
3.1.1 河流健康的内涵	45

3.1.2 指示物种.....	46
3.2 河流生态调查.....	46
3.2.1 栖息地调查.....	47
3.2.2 底栖动物采样和鉴定.....	47
3.3 河流健康常用评价方法.....	49
3.3.1 O/E 指数法.....	49
3.3.2 生物完整性指数法.....	51
3.4 河流生态常用模拟方法.....	53
3.4.1 栖息地适宜性模拟.....	53
3.4.2 食物网结构预测和功能模拟.....	55
3.5 本章小结.....	57
第4章 雅鲁藏布江高能量河流的生态过程.....	59
4.1 雅鲁藏布江流域概况及采样点布置.....	59
4.2 雅鲁藏布江栖息地与底栖动物群落特征.....	61
4.3 底栖动物多样性对正在发育的大型尼克点的响应.....	64
4.4 底栖动物密度对水流功率的响应.....	65
4.5 底栖动物对水流功率的偏好性.....	67
4.6 底栖动物对水流功率的适应力分析.....	69
4.7 底栖动物对高功率水流的适应策略.....	70
4.8 本章小结.....	71
第5章 怒江天然堰塞湖群的生态过程.....	73
5.1 怒江流域概况.....	73
5.2 怒江栖息地与底栖动物群落特征.....	75
5.3 影响底栖动物的环境变量识别.....	80
5.4 底栖动物多样性对堰塞湖群的响应.....	81
5.5 堰塞湖群对新物种分布的影响.....	84
5.6 本章小结.....	88
第6章 若尔盖湿地弯曲河流的生态过程.....	89
6.1 若尔盖湿地概况.....	89
6.2 白河栖息地与底栖动物群落特征.....	91
6.3 底栖动物多样性对牛轭湖演变的响应.....	96
6.4 影响底栖动物的环境变量识别.....	97
6.5 底栖动物密度对牛轭湖演变的响应.....	99

6.6 底栖动物食物网对牛轭湖演变的响应	101
6.7 本章小结	105
第 7 章 基于底栖动物的青藏高原河流生态评价	106
7.1 底栖动物多样性和物种组成比较	106
7.2 河流生态质量评价的多参数体系框架	109
7.3 多参数体系框架的底栖动物群落指标选取	110
7.4 底栖动物群落指标的权重确定	113
7.5 多参数体系的评价能力	115
7.6 青藏高原边缘区河流生态质量评价结果	117
7.7 本章小结	119
第 8 章 底栖动物群落对河道流量的响应模拟	120
8.1 兰木措曲流域概况和数据集构建	121
8.2 各流域的底栖动物群落指标特征	123
8.3 MM-HSM 模型的训练和验证	127
8.4 水动力模拟及底栖动物对流量的响应	129
8.5 本章小结	133
第 9 章 底栖动物食物网对水文连通性的响应模拟	134
9.1 泉吉河流域概况	134
9.2 栖息地的环境和底栖动物群落特征	136
9.3 底栖动物食物网的结构和通量	139
9.4 栖息地的食物网稳定性和关键营养单元	141
9.5 泉吉河不同栖息地的食物网特征差异	143
9.6 水文连通性变化对高原河流生态系统的影响	146
9.7 本章小结	147
参考文献	148
附录 底栖动物类群的分类、功能与耐污水平等信息整理	159
编后记	176

第1章 河流及其生态系统

1.1 河流系统

河流是大气环流和下垫面共同塑造的地表径流系统，其形成、维持与演化深刻体现了水文循环和地质地貌的复杂耦合作用。作为陆地水循环的核心载体，河流在淡水供给地貌重塑与生态系统服务方面具有不可替代的作用。

在自然系统服务方面，河流呈现出多维价值体系：通过栖息地供给驱动生物多样性形成、维持与变化；通过食物网过程维系物质循环和能量流动；通过洪水调蓄、气候调节与水质净化维持区域生态安全。

在人类社会方面，河流展现出基础性支撑作用：农耕时代通过河渠灌溉推动文明演进；工业时代依托水能开发和航运网络驱动经济增长；现代城市群通过构建河流廊道实现资源优化配置。当前，全球绝大多数城市依河而建，印证了河流在水源供给和交通枢纽方面的综合价值。

1.1.1 河流分类

根据水流作用及地理位置、河床边界的可动性、流经地区与地质地貌特征，河流或其河段可进一步分类（邵学军和王兴奎，2005）。这些分类方式从多维度揭示了河流的动态演化特性和空间分异规律。通过分类研究，可以更全面地认识河流的水沙过程及其与生态系统的耦合作用，从而为流域综合管理和生态修复提供重要参考。

根据水流作用及地理位置，河流通常分为上游、中游与下游三个区域。上游为河流的发源地，通常位于山区或高原，以侵蚀作用为主。河源类型多样，包括冰川、湖泊、沼泽或泉眼等，地形陡峭，水流湍急，侵蚀作用强烈，常伴随大量泥沙输运。中游多位于山前丘陵或平原地带，以泥沙搬运和沉积作用为主。此区域河床坡度逐渐平缓，水动力条件相对减弱，搬运和沉积作用交替发生，常形成河流弯道和冲积平原。下游通常位于平原地区，河谷宽广，水流平稳，沉积作用显著。河口是河流与海洋、湖泊或其他水体的交汇点，常形成三角洲或湿地，具有重要的生态功能。

根据河床边界的可动性，河流可分为冲积河流和非冲积河流两类。冲积河流

的河床主要由松散的泥沙组成，水流侵蚀、搬运与沉积作用明显，形态变化频繁。此类河流在流量或泥沙供给发生变化时容易发生河道迁移或河床形态调整。非冲积河流的河床由较为稳定的岩石或固结沉积物构成，冲积作用较弱，形态相对固定。

根据流经地区，河流又可分为山区河流和平原河流两类。山区河流通常位于地势起伏较大的区域，多为非冲积河流，河床边界较稳定，侵蚀作用占主导，河道狭窄，水流湍急。平原河流多分布在地势平缓的平原地区，通常为冲积河流，河床易受侵蚀和沉积作用影响，水流相对缓慢，河道较宽广。大河流域通常呈现明显的纵向分区特征：上游多为山区河流，中游兼具山区与平原河流的特性，下游则以平原河流为主。对于小型河流，其流域可能完全位于山区或平原。

根据地质地貌特征，河流在纵向上通常可划分为侵蚀区、输运区与沉积区三个区域。侵蚀区（河源区）主要位于山区或高原地带，以侵蚀作用为主，河流下切深度较大，侵蚀作用强烈。输运区的水流以搬运泥沙为主，水动力强度较高，搬运和沉积作用交替发生，泥沙输运效率较高。沉积区则通常位于平原或河口区域，沉积作用占主导，形成冲积平原、三角洲或其他沉积地貌。

1.1.2 流域和水系

流域是水资源汇集和分配的基本单元，涵盖所有汇入河流、湖泊或海洋的水系，包括地表水和地下水的集水区域。流域内的径流如同生命的动脉，向最低点汇聚，并通过河流、湖泊或地下水系统不断流动与循环。相邻流域之间的边界称为分水岭，由山脊或河间高地构成，其最高点的连线称为分水线。分水线不仅形塑了地表水流的走向，还深刻影响水文与生态过程（董哲仁等，2013）。

从与海洋连通的情况来看，流域可分为外流区和内流区。外流区指水流最终流入海洋的流域，如长江、黄河流域，并依据所流入海洋可进一步分为太平洋、大西洋、印度洋与北冰洋流域等。与此相对，内流区指水流未与海洋相连而汇入内陆湖泊或消失于沙漠的流域。塔里木河流域便是典型的内流区，其水流最终消失于台特玛湖，水文与生态过程相对封闭，与外界环境的联系较弱。从地表分水线和地下分水线的重合情况来看，流域又可分为闭合流域和非闭合流域。闭合流域指地表分水线和地下分水线重合，地表水和地下水的汇集范围相同，通常呈现出规则的形态，水文特征较为简单。非闭合流域指地表分水线和地下分水线不重合，地表水和地下水的流向可能不同，水文过程较为复杂，通常受到岩性与地质构造的强烈影响。

水系是由河流干流和众多支流相互连接共同形成的集水系统，河网则是集水系统中干流与支流交错相通所构成的网状结构及其分布模式（王光谦等，2017）。

根据干支流分布形态,水系可分为多种类型,常见的有树枝状、矩形状、羽毛状、平行状、放射状与环形状等,受地质和地理条件影响,其形态展现出水系的复杂性和多样性(图 1-1)。树枝状水系通常在岩层均匀、坡度较小的地区形成,支流与干流之间的夹角较小;矩形状水系受基岩的节理和裂隙影响,支流通常以直角与干流交汇,呈现矩形分布格局;羽毛状水系出现在狭长地形,由主干河流及其两侧几乎对称的小河道组成,整体形态似羽毛;平行状水系常见于缓坡地区,干流沿着节理和裂隙平行排列;放射状水系通常出现在火山口、穹丘或残蚀地形,水流从中心高地向周围辐射扩展;环形状水系常见于丘陵地区,形态类似放射状水系,但支流的分布受节理和裂隙控制,呈同心圆状。

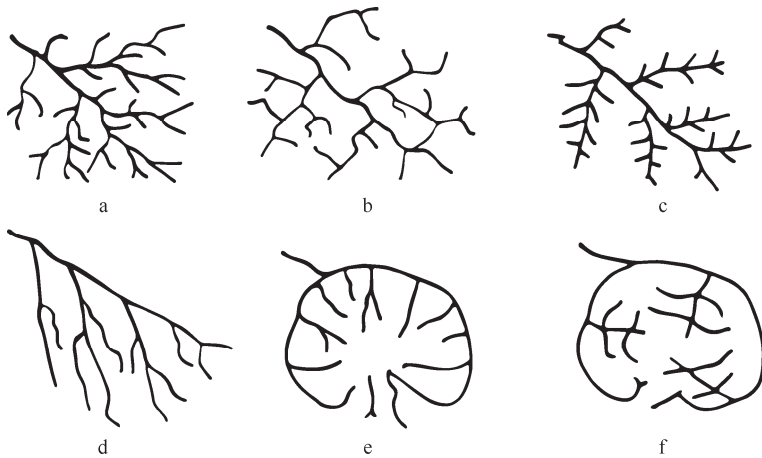


图 1-1 常见的水系形态

a. 树枝状; b. 矩形状; c. 羽毛状; d. 平行状; e. 放射状; f. 环形状

河网形态可反映地表水系的结构特征,对水文过程、土壤侵蚀、河流演变、流域地貌等方面具有重要影响。目前,描述河网形态的方法主要有三种:一是 Horton-Strahler 分级法;二是随机河网模型,包括随机游走模式和 Shreve-Smart 随机拓扑模式;三是基于相似性和分形理论的 Tokunaga 分级法。

(1) Horton-Strahler 分级法

Horton-Strahler 分级法将不同级别的河段作为水系的基本组成单元(图 1-2a),最早由 Horton (1945) 提出,后来由 Strahler 改进,形成目前应用最为广泛的 Horton-Strahler 体系。该体系中,最上游没有支流的河流称为一级河流。当两条同级别的河流汇合时,形成一条高级别河流;但一条较高级别的河流与一条较低级别的河流汇合时,形成的河流级别不会提升。河流的 Horton-Strahler 级别与流域

面积、河道长度等参数有密切关系。因此，通过 Horton-Strahler 级别可以推测河流的相关特征，如纵向位置、河道宽度和深度等。例如，流域中河流级别同河流数量、河流平均长度及河流平均坡降的关系可近似表达为

$$\ln N_u = A + B_u \quad (1-1)$$

$$\ln L_u = C + D_u \quad (1-2)$$

$$\ln s_u = E - F_u \quad (1-3)$$

式中， u 为河流级别； N_u 为 u 级别河流数量； L_u 为 u 级别河流平均长度； s_u 为 u 级别河流平均坡降； A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 均为常数，且 B 、 D 和 F 为非负数。

Horton-Strahler 分级法常用于河网的理论分析，但在工程实践中应用价值较低，因为往往难以确定一级河流。工程实践中常采用 Hack 分级法（图 1-2b），其中集水区的干流被划分为一级，支流被划分为二级，而支流的支流被划分为三级，依此类推。

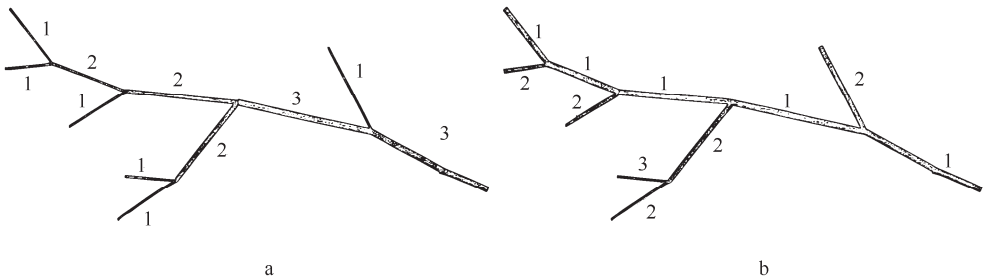


图 1-2 Horton-Strahler 分级法 (a) 和 Hack 分级法 (b)

(2) 随机河网模型

随机河网模型包含随机游走和 Shreve-Smart 随机拓扑两种模式 (Wang et al., 2014)，从理论方面解释了流域水系发育的 Horton-Strahler 定律，极大地推动了流域和水系研究从定性分析向定量分析发展。

随机游走模式是 Leopold 和 Langbein (1962) 提出的河网发育模型，通过矩阵或方格图来模拟河网的演变，提供了一种简化而有效的途径来模拟河网的随机生成过程。该模型中，每个方格单元代表维持单位长度河道所需的面积。每个方格单元的降水形成径流，径流方向由概率决定。例如，依据我国的地形特点，径流方向的概率分布可设置为：西向东 $P=0.5$ ，东向西 $P=0.1$ ，北向南 $P=0.2$ ，南向北 $P=0.2$ 。箭头表示每个单元的径流方向，通过计算机生成的随机数来确定。例如，随机数为 0~5000，径流为西向东；随机数为 5001~7000，径流为北向南；随机数为 7001~8000，径流为东向西；随机数为 8001~9000，径流为南向北。若

两个相邻单元的箭头方向不相反，则二者可连接在一起形成一级河流，然后两条一级河流汇合形成二级河流，依此类推。

在 Shreve-Smart 随机拓扑模式中，由节点相连所形成的链构成了河网的基本单元。该模型通过引入随机性，结合主导因子（如地球引力）和次级因子（如地质、气候等）对水系布局的影响，可模拟不同条件下的河网变化。不同于确定性模型，该模型通过随机拓扑反映次级因子对水系结构的影响，展现了河网布局的多样性。同时，基于拓扑学原理，关注了水系中节点、河段和交汇点的连接方式，并可根据具体流域和水系的特点调整模型参数，以适应不同的研究需求。

（3）Tokunaga 分级法

Tokunaga 分级法是在 Horton-Strahler 分级法的基础上提出的一种更加精细的河网分级方法，通过刻画侧支流与主河段之间的等级差异，揭示了河网分支结构、汇流关系及其自相似特征。这一方法更加符合河流系统的几何特征，并为研究侵蚀地貌演变和河流水系发育提供了新视角。Tokunaga 分级法通过统计侧支流的数量，提供了河网在统计意义上的定量关系。根据 Tokunaga 分级法的定义，低级侧支流汇入某一级河流的数量（侧支分叉比）可以通过公式 $T_k = ac^{k-1}$ 计算，其中 a 为汇入第 n 级河流的 $n-1$ 级侧支流的平均数量； c 为低级侧支流数量的平均增长速率。

1.1.3 河流形态

（1）平面形态

河流的平面形态指河型，即河流在特定水文、泥沙与边界条件下，通过水流和泥沙相互作用所形成的河道特征。河型的形成同河道的水力学特性、泥沙输运行为与能量耗散过程密切相关。山区河流和平原河流的河型差异明显。山区河流通常流经陡峭地形，水流速度较快、能量较大，河道易受侵蚀作用影响，呈现峡谷型、阶地型或瀑布型等形态，河道较窄且以基岩和碎石为主，沉积作用较弱。与此不同，平原河流受泥沙沉积和侵蚀作用的综合影响，往往形成更为多样化的平面形态。理论上，河型的判别应涵盖流量、含沙量、泥沙类型、坡降、地质地貌条件以及植被状况等多个因素，但由于河型问题复杂，现有研究成果尚未建立包含所有因素的完整判别体系，通常采用基于经验公式或统计拟合的判别方法，且多以单一或部分参数为基础。

Wolman 和 Leopold (1957) 将平原河流的河型分为弯曲型、辫状型与顺直微弯型。Schumm (1973) 则进一步将河道形态细分为蜿蜒型、顺直微弯型与分汉型，其中分汉型又可分为辫状型、网状型与游荡型。钱宁 (1985) 将 Wolman 和 Leopold

的辫状河型细分为游荡型（以黄河下游为代表）和稳定分汉型（以长江中下游为代表），后者也称为江心洲河型。本书根据现有研究，将河型划分为顺直型、弯曲型、分汉型、辫状型与网状型 5 类。

（2）纵剖面形态

河流的纵剖面指从河源到河口沿河床最低点连线所形成的剖面。通过测量河床最低点的高程变化，并将河长作为横坐标、高程作为纵坐标，可绘制出河流的纵剖面图，能够反映河流的纵坡变化，通常用坡降 i 来表示，即

$$i = (H_u - H_d) / L \quad (1-4)$$

式中， H_u 和 H_d 分别为河段上游和下游河底的高程； L 为河段长度。

山区河流的纵剖面通常较为陡峭且形态不规则，常呈现深潭-浅滩交替的现象，并可能出现台阶状变化，形成跌水或瀑布（Richards, 1976）。平原河流由于河床以沙质为主，纵剖面较为平缓，虽然没有明显的台阶状变化，但也呈现深潭-浅滩交替的现象，整体呈下凹曲线，因此坡降在上游较大，中下游逐渐减小，整体表现为典型的下凹型纵剖面。总体而言，河床的纵剖面并非完全平滑，常见浅滩和岩槛（高起地貌）、深潭与瓯穴（低陷地貌）等起伏变化，而地形起伏反映了河流内部的深潭-浅滩序列（图 1-3），且局部地形变化剧烈，主要受岩性、地质构造、流量、流速与泥沙运动等因素影响。

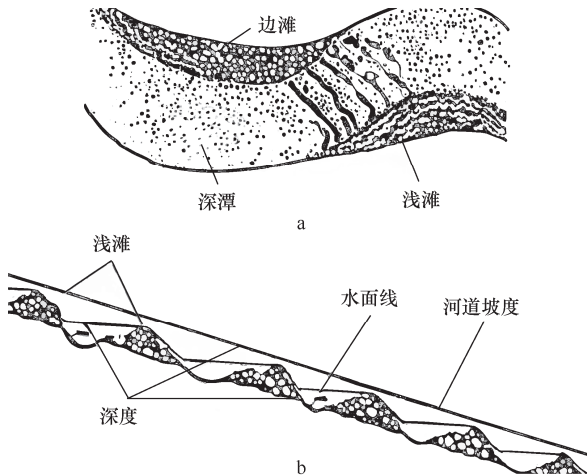


图 1-3 河流平面（a）和纵剖面（b）形态的对比

（3）横断面形态

河流通常由主河道和河漫滩组成，而河谷包括河漫滩以外的高地边缘过渡带

(图 1-4)。河流横断面指垂直于水流方向的剖面，下界为河床，上界为水面，两侧为边坡。根据水流与河床之间的相互作用，河流的横断面形态通常可分为抛物线形、三角形、马鞍形与多汊形 4 种，可反映河流动力过程和河床特性之间复杂的相互关系，且具有一定的规律性。

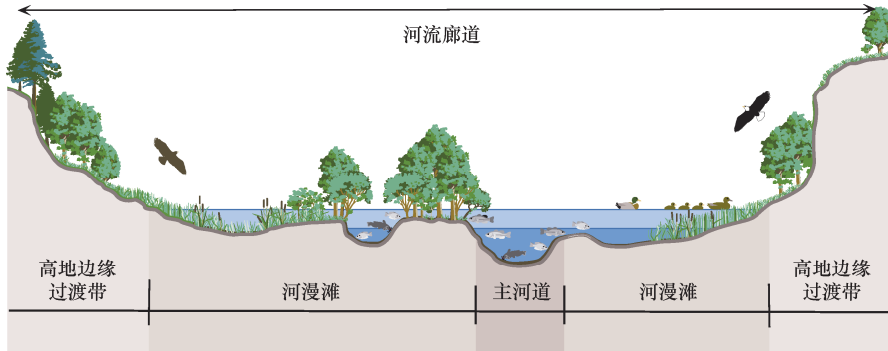


图 1-4 河谷的横断面结构示意图

与河流的横断面相比，河谷的横断面通常更为宽广，涵盖高地边缘过渡带，通常还涉及阶地、坡地等地貌单元。山区河流的横断面多受强烈的下切作用影响而呈“V”字形或“U”字形，尤其在陡峭的地形下，河谷的深切和束窄导致河道几乎无明显的汛期与枯水期界限。相较之下，由于流经的是地势平坦、底质松散的地区，平原河流形成主要受冲积作用影响，横断面相对较宽浅，两侧通常发展为宽阔的河漫滩，与以侵蚀作用占主导的山区河流形成鲜明对比。

1.1.4 河流景观格局

生态学的研究对象按层级结构可划分为生物圈、生物群系、景观、生态系统、群落、种群和个体；从个体内部结构来看，可进一步划分为组织、细胞、基因与分子等层次。因此，景观在河流生态动力学中代表一种尺度，其层次位于生态系统之上。在景观生态学的框架下，景观被视为由多个生态系统或土地利用模式交织组成的复合体。景观格局则指景观空间结构的特征，包括景观元素的多样性与空间布局 (Farina et al., 1998)。基于斑块-廊道-基底模式，河流的景观格局可通过基底、斑块、廊道与马赛克 4 种空间元素描述 (图 1-5)。这些空间元素是相对的概念，有助于理解河流景观结构的复杂性。

基底指在景观中占据最大面积并具有较高连通性的元素，通常为森林、草原或农业区等类型，构成河流景观的背景部分。斑块指与周围环境在性质或外观上有所不同的地表块，是景观中的最小均质单元，其特性、形状与大小各异，常见于

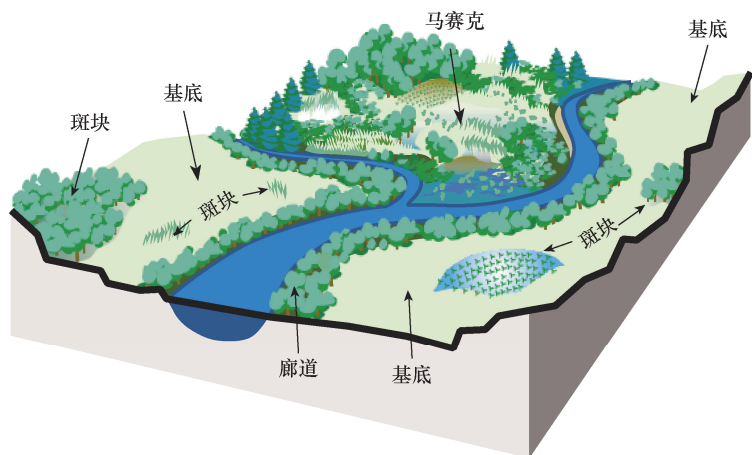


图 1-5 河流景观的主要元素及其空间格局

湿地、湖泊或农田等区域。廊道指一种线性的具备通道和屏障功能的特殊元素，常见于道路、河流、农田防护林等。廊道在河流景观中占据核心地位，连接陆地和水域，是物种栖息和迁徙的重要通道，有助于维持生态系统健康。马赛克指由多个斑块组成的整体，通常分布于尺度较大的区域。河流景观格局为流域综合管理和生态修复的规划提供了重要的空间分析框架，通过定量分析景观要素的数量、大小、形态与空间位置等特征，能够有效识别和评估河流景观，进而采取相应的管理和修复措施。

1.2 河流生态系统

1.2.1 河流生态系统的特征

河流作为一个复杂的大尺度生态系统，由生物和非生物环境两大核心部分构成，涵盖多个陆生和水生子系统，具有五大关键生态属性：水质、水文情势、栖息地、连通性与生物组成，其共同维系河流生态系统的动态平衡（Schick et al., 2019）。其中，非生物环境为生物生存奠定了基础，主要包括四大因素：水质，即水体的物理化学性质，直接影响生物的生存环境；水文情势，涉及水量和水流的变化形式，能调控河流生态系统的物质循环和能量流动；栖息地，为生物完成生长、发育与繁殖等生命活动的物理庇护场所，用于提供必要的生存空间；连通性，可影响不同水体间通过河流发生物理、化学和生物联系的频次与程度。对于生物组成，可根据营养方式划分为三大类群：生产者，主要为自养生物，如水生维管植物、藻类与部分微生物，能通过光合作用或化学合成将无机物转化为有机物，

从而为生态系统提供初级生产力；消费者，属于异养生物，包括鱼类、底栖动物、浮游动物等水生动物，依赖摄取其他生物来获取营养和能量；分解者，亦为异养生物，以微生物为主，负责将复杂的有机物分解为简单的无机物，从而实现物质循环和能量流动的闭合（蔡庆华等，2003）。

河流作为典型的复杂生态系统，具备一般复杂生态系统的共性特征，而这些特征共同构成其独特的生态动力学机制。首先，河流生态系统具有显著的非线性特征。系统内部各部分之间的关系并非简单的线性叠加，而是呈现出非线性效应。具体而言，微小的变化可能触发系统内部显著的响应，即放大效应；反之，较大的变化仅可能引起系统内部微弱的响应，即钝化效应。这种非线性特征使得河流生态系统的行为复杂多变，难以通过简单的因果关系进行预测。其次，河流生态系统展现出涌现性。系统的整体特征无法通过单纯叠加个体属性来预测，而是源于个体之间的相互作用。例如，水生食物网的结构和功能等全局特性正是涌现性的具体表现，体现了系统整体大于部分之和的特质。再次，河流生态系统表现出适应性。系统中的生物群落能够通过与环境持续互动来调整结构和行为，从而适应外部变化。这种适应能力使得河流生态系统能够在动态变化的环境中保持相对稳定。此外，河流生态系统具备自组织性。在没有外部干预的情况下，系统可通过内部各部分之间的相互作用自发形成高度有序的结构。这种自组织现象是生态动力学作用的直接结果，反映了系统的内部协调性和自我调节能力。最后，河流生态系统拥有多尺度性。系统中的不同动态过程可能发生在多个时间和空间尺度，这些过程相互作用，共同影响系统的整体行为。这种多尺度性使得河流生态系统在不同层面具有复杂的反馈机制（董哲仁等，2010）。

与其他类型的生态系统相比，河流生态系统还展现出以下三个显著特点，而这些特点赋予其独特的生态功能和生物多样性。首先，河流生态系统的生态过程主要发生在水环境中，与陆地生态系统形成鲜明对比。水环境在理化特性方面具有显著特点，其强大的溶解能力为浮游生物生存提供了营养基础，但水层中的低光照强度限制了绿色植物的分布。其次，河流生态系统的生物组成与陆地生态系统不同，其主要生产者为较小的浮游植物和微生物（如蓝藻），而这些生物单位面积的生产力远高于陆地植物。最后，河流生态系统具有空间线性特征。在宏观尺度上，河流的主河道和河漫滩将生态系统限定为一个线性空间系统，水流的纵向运动使得环境和生物分布在空间上呈现连续性。对于纵向洄游的生物，其生命周期依赖河流的纵向连通性及水流的纵向连续性。

1.2.2 河流栖息地

栖息地为河流生态系统的关键生态属性，是将非生物环境和生物联系起来的

重要桥梁。具体而言，栖息地指生物个体、种群或群落生存和繁衍的空间，可在不同生命阶段为生物提供必要的条件，包括食物、水源与庇护场所等。此外，栖息地深刻影响生物的行为模式、繁殖策略与迁徙规律。在多个物种共享同一空间资源的情况下，为强调非生物环境与生物之间的共存关系和单元整体性，常采用“生境”这一概念来描述栖息地。生境强调生物和非生物环境之间的相互作用与相互依赖关系，是河流生态动力学研究的重要内容。

从空间尺度来讲，河流栖息地可分为微观、介观与宏观三个层次（图 1-6）。宏观栖息地指整个河流系统，空间范围可能延伸数千千米；介观栖息地指特定河段，尺度一般在数十米到数千米；微观栖息地聚焦于更精细的环境结构，通常仅涵盖数米甚至更小的范围。就空间位置而言，河流栖息地不仅包括主河道区域，还涵盖河漫滩地带，甚至在某些情况下延伸至高地边缘过渡带。河流的地貌特征如主河道与河漫滩的整合性，可对栖息地的稳定性、复杂性与适宜性产生直接影响。同时，河流形态的多样性决定了栖息地的异质性和连通性，进而影响生物组成和生态过程（Thorp et al., 2006）。

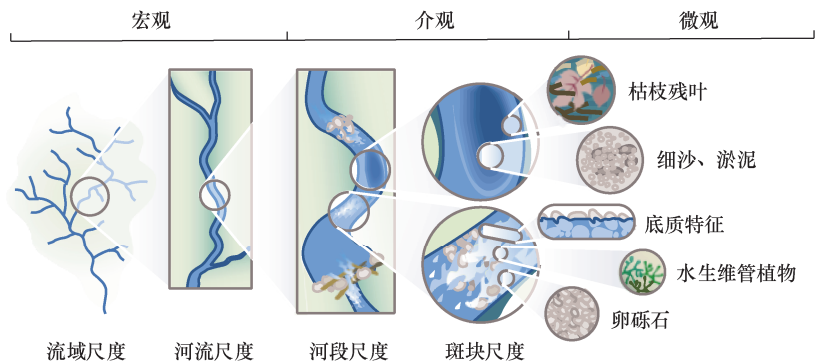


图 1-6 河流栖息地的空间尺度性

(1) 异质性和复杂性

栖息地的异质性亦称多样性，指在特定尺度的生态系统空间内，由非生物环境因素（如光照、水分、土壤与地形等）的水平空间分布差异导致的栖息地特征的不均匀性（Palmer et al., 2010）。简言之，异质性描述了栖息地特征的水平空间分布差异。在河流生态系统中，深潭-浅滩结构是典型的高异质性栖息地。浅滩区域泥沙粒径较大，流速较快，适合流水型生物栖息，营养主要来源于水中随流运输和泥沙表面吸附的有机碎屑；深潭区域泥沙粒径较小，流速较慢，更适宜缓流型生物栖息，营养来源主要为沉积在河床底部的有机碎屑。