

国际河流生态译著丛书

河流生态学

Stream Ecology: Structure and Function of
Running Waters

[美] J·David Allan [委] María M·Castillo 著
黄钰铃 纪道斌 惠二青 罗玉红 苏青青 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国际河流生态译著丛书

河流生态学

Stream Ecology: Structure and Function of
Running Waters

[美] J·David Allan [委] Mar a M·Castillo 著

黄钰铃 纪道斌 惠二青 罗玉红 苏青青 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是翻译 J·David Allan 和 María M·Castillo 的《Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters》(Second Edition)。全书共分 13 章。其中第 1 章是河流生态系统简介;第 2 章介绍河流水文;第 3 章介绍河流地貌;第 4 章介绍河流水化学;第 5 章介绍非生物环境;第 6 章介绍初级生产者;第 7 章和第 8 章分别介绍碎屑能源及其营养关系;第 9 章和第 10 章分别介绍种间相互作用及生物群落;第 11 章和第 12 章分别介绍营养盐循环和生态系统代谢;第 13 章介绍人类活动对河流的影响。

本书可供高等学校生态学、水利工程、环境科学、环境工程等相关专业本科生和研究生参考,也可供河流开发利用与保护行业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

河流生态学 / (美)戴维·艾伦, (委)玛利亚·卡斯特罗著; 黄钰铃等译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 1

(国际河流生态译著丛书)

书名原文: Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters (Second Edition)

ISBN 978-7-5170-5093-3

I. ①河… II. ①戴… ②玛… ③黄… III. ①河流—生态学 IV. ①X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第323203号

书 名	国际河流生态译著丛书 河流生态学 HELIU SHENGTAI XUE
原 书 名	Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters (Second Edition)
原 著	[美] J·David Allan [委] María M·Castillo
译 者	黄钰铃 纪道斌 惠二青 罗玉红 苏青青
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 (营销中心)
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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 19.5 印张 462 千字
版 次	2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	79.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

原 著 前 言

河流水环境的多样性是非常显著的。当提起奔涌的山涧小溪、广袤的平原河流乃至辽阔的大江大河时，我们不能不感叹河流流经之地对河流水环境多样性的影响是多么巨大！同时，河流的生物地球化学、水文和地貌过程对河流系统的结构和功能的影响十分深远；物质和能量的输入对河流系统非常重要；物种丰度、种间或种内的相互作用也深刻地影响着河流生物群落的结构和功能。本书正是介绍了上述这些内容。

本书可为读者提供关于河流生态学的各方面知识。河流生态学，与生态学类似，常以空间属性、时间属性、环境因子和生物物种等来描述其特点。如文中多次提及的“小型林地河流”“开敞的牧场河流”或“大型山谷河流”等，属于不同空间层次的河流，都是通过描述河流的空间特性、时间序列变化、环境因子和河流中的生物物种等来介绍河流特征。虽经多方努力，本书对全球范围内其他国家和地区的研究案例介绍仍较少，主要是美国的案例。对此，深表歉意。过去几十年里，美国在河流生态学方面的研究工作较多。本书介绍了新罕布什尔州哈伯德·布鲁克实验林中的河流、北卡罗来纳州考维塔水文实验室内实验河流的一些研究成果。关于其他一些河流如田纳西州的沃克河、亚利桑那州的梧桐溪、委内瑞拉的瑞·拉斯·马瑞斯河、新西兰的泰瑞河和瓦塔瓦塔河的案例在书中也有介绍。

人类活动对河流生态系统的影响是河流生态学最重要的一个研究领域之一，因为河流生态学研究的最終目的是为了保护河流生态系统。生态学家在研究河流时，若不考虑过去和未来人类活动对河流生态系统的改造，以及河流生态系统对人类活动的响应过程，就会导致认识偏颇，由此制订的河流保护计划缺乏足够的科学依据，很难产生实质效果。因此，人类活动在河流生态学研究非常重要。本书就此单列一章，专门讨论人类改造自然的各类活动对河流生态系统的影响，由此提出未来河流生态系统保护与管理中应采取的态度、对策和措施。

书稿的完成得到了许多同事和朋友们的帮助，因篇幅有限，在此不一一列举。本书的缺点和错误在所难免，深切希望由此对读者带来的影响最小。本书是第二版，在此对为第一版提供帮助和支持的同事、朋友、出版社、编辑们致以谢意。

最后，对我们的家人致以深深的感激和爱！

J • David Allan 和 María M • Castillo

序

1999年3月，时任水利部部长汪恕诚先生在中国水利学会第七次全国会员代表大会上提出了“由工程水利到资源水利的转变”；刘树坤先生于21世纪初多次提出我国水利建设已进入21世纪的大水利建设时代；董哲仁先生则针对国内外水利工程建设面临的困境，提出了生态水工学及其理论体系。我本人从事传统水利工程的教学和研究工作多年，也深感传统水文学、水力学、河流动力学、工程力学等理论支撑的水利工程学科的发展确实面临新的挑战，认为传统水利工程学科与生态学、环境科学、生物学等学科的交叉融合是未来水利工程学科发展变革的必然方向，并较早在校开设生态水工学课程和从事相关研究工作。人类在开发利用水资源的过程中对河流的改造必然会深刻的影响和左右河流生态系统的结构和功能，反过来又作用于人类社会。传统水工学以满足人们对于供水、防洪、水力发电、航运等方面的需求为目的，以建造水工建筑物达到对水流的控制为手段，以安全、经济、施工方便等为水工建筑物设计准则，其理论基础为水文学、水力学、工程力学等。因此，在研究河流时，传统水工学只关注水、泥沙及其边界的运动规律，较少关注水体里的生物群落及其赖以生存的环境，其结果自然是很难实现人水和谐。要实现人水和谐，首先要认识水生态系统，要深入了解河流生态系统自身的物理、化学、生物过程，深刻认识水生生物群落演替的规律、结构、功能及其与环境的互馈关系。河流生态学正是介绍这方面内容的生态学分支学科之一。

本书译者作为我的研究团队成员，在从事水利工程与生态学、环境科学等交叉领域的研究工作中，充分认识到河流生态学是资源水利、生态水利发展的重要性理论支撑，经多方面比较，特选择J·David Allan和María M·Castillo的《Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters》(Second Edition)进行翻译并介绍给大家。译者均是近年来从事生态水工学教学和研究的骨干，因此本书翻译质量较高，既较好地把握了该书作者的原意，

又结合了国内的常用语及习惯。本书内容十分丰富，不仅介绍了河流水文、地貌、水化学、非生物环境和河流生态系统的结构和功能，也介绍了人类活动对河流生态系统的影响及河流生态系统对人类活动干扰的响应。本书的出版，可为水利高校从事生态水利教学及研究的师生提供认识河流生态系统的基本知识，为我国资源水利、生态水利的发展提供理论支撑，对推动我国水利事业的可持续发展具有重要意义。

刘国富

2015 年 12 月

译 著 前 言

“生态学”一词由希腊文“oikos”衍生而来，意即“住所”或“生活所在地”。生态学家 Eugene P. Odum 将生态学定义为“研究生物或生物群体及其环境的关系，或是生活着的生物及其环境之间相互联系的科学”，并根据栖息地将生态学划分为淡水生态学、海洋生态学、河口生态学、陆地生态学等分支。本书介绍的河流生态学乃属于淡水生态学中的一个小分支。过去在学科分支不甚清晰的年代，通常将生态学范畴的研究内容归入生物学，对于水域生态的内容，国内早些年多归入水生生物学。随着认识水平的提高，科学理论体系不断丰富，学科门类逐渐完善，特别是近年来对河流、湖泊、湿地等不同淡水水域的研究越来越深入，河流生态学作为淡水生态学中的一个重要研究范畴，逐渐引起广泛关注。

J. David Allan 和 María M. Castillo 的这本《Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters》是第二版，由 Springer 出版社于 2007 年出版，内容十分丰富，涵盖了河流水文、地貌、水化学、非生物环境、生物物种、生物群落、物质生产与代谢等方面的内容，还包括人类活动改造自然对河流生态系统的影响及河流生态系统对人类活动干扰的响应。

该书由黄钰铃、纪道斌、惠二青、罗玉红和苏青青等翻译，黄钰铃审校。本书的出版离不开刘德富教授多年来持之以恒的鼓励与支持，更与三峡大学生态水利学、环境工程等专业的师生们的帮助是分不开的。此外，本书的出版除了感谢 Springer 出版社支持外，还要感谢中国水利水电出版社的大力支持。中国水利水电出版社的林京编辑本已退休，仍为本书的出版投入了大量的精力和心血，在此特别致谢！本书的出版得到国家水体污染控制与治理科技重大专项（2014ZX07104-005）和国家自然科学基金（51009080）资助。

书中翻译错误和不准确之处，敬请读者批评指正。

译者

2015 年 12 月

目 录

原著前言

序

译著前言

1 河流生态系统简介	1
1.1 河流生态系统的多样性	1
1.2 河流生态系统	4
1.3 当前河流的状态	6
2 河流水文	8
2.1 水循环	8
2.2 河川径流	13
2.3 流量变化	15
2.4 小结	21
3 河流地貌	23
3.1 河网结构	23
3.2 河道	24
3.3 河流输沙	26
3.4 河道演变	31
3.5 小结	33
4 河流水化学	34
4.1 溶解气体	34
4.2 溶解物质	35
4.3 碳酸氢盐缓冲系统	39
4.4 化学组分对生物的影响	40
4.5 小结	43
5 非生物环境	44
5.1 水流	45

5.2	基质	51
5.3	水温	55
5.4	小结	59
6	初级生产者	61
6.1	周丛藻	61
6.2	大型植物	71
6.3	浮游植物	74
6.4	小结	77
7	碎屑能源	78
7.1	粗颗粒有机物	78
7.2	细颗粒有机物	87
7.3	溶解有机物	88
7.4	小结	93
8	营养关系	95
8.1	微生物食物网	95
8.2	无脊椎动物摄食作用	97
8.3	河流中的脊椎动物	110
8.4	次级生产	114
8.5	小结	118
9	种间相互作用	119
9.1	草食作用	119
9.2	捕食作用	125
9.3	竞争作用	133
9.4	小结	141
10	生物群落	143
10.1	大尺度范围内的生物多样性	143
10.2	局部地区的多样性	147
10.3	群落结构	148
10.4	食物网	154
10.5	群落组成和生态功能	157
10.6	小结	159
11	营养盐循环	160
11.1	氮、磷营养来源与循环	160
11.2	营养输移与养分螺旋	166
11.3	影响营养盐动力学的因素	169
11.4	养分收支估算	176

11.5 小结 179

12 生态系统代谢..... 181

12.1 内源产生 182

12.2 外源输入 184

12.3 输移 188

12.4 代谢 192

12.5 小结 200

13 人类活动对河流的影响..... 201

13.1 河流生物多样性 201

13.2 河流面临的威胁 204

13.3 河流管理 217

13.4 小结 222

参考文献 223

1 河流生态系统简介

本章概述了河流的多样性特点，以及产生多样性的原因和由此带来的后果。

1.1 河流生态系统的多样性

小型河流和大型河流的景观多样性很高，但两者之间没有真正的区别，除了前者规模较小以外。术语“大型河流”一般用来描述湄公河、亚马孙河和密西西比河等类似规模的河流。河流的源头及部分上游区段一般规模较小。目前，开展了相当多的研究。本书主要介绍在小型河流、中等规模河流、大型河流等不同的空间尺度上，水域生态系统的基本原理及变化过程。

河流生态系统的许多附加功能有所不同。有些由于含有高浓度的溶解物质而呈茶色，而另一些则含有较少的化学成分，比较清澈，它们分别被称为黑水河和清水河。河流从陡峭的山坡巨石上翻滚后向下倾泻，蜿蜒曲折地穿过深幽的峡谷，平缓壮观地淌过广阔的平原，然后注入大海。林区河段中的食物网的食物大部分来自于树木落叶，而开敞区的河段较浅，河床基质多卵石，易形成富含藻类和微生物的微生境。河流的主河槽与洪泛区和邻近区域通常有较活跃的有机物和营养物质的交换过程，从而展现出横向、纵向和垂向的高度连通性（见图 1.1）。

在河流科学研究中试图将河流横向、纵向和垂向的各种多样性进行分门别类，归纳总结表象之下的各种机理过程，分析各过程如何响应多种环境参量的变化，以及由此展现出空间上自源头区到下游宽阔河段的多样性特点。目前的河流分类系统有助于更好地了解自然格局的变化，为河流管理如河流健康的恢复与评价等提供参考。事实上，由于河流生态系统的变化是连续的，这些变化过程相对独立，难以综合分析，且各分类系统目的不一。因而，本书很难提出一个大而全的河流分类系统。尽管如此，本书中仍试图提出一些概括性的总结来描述河流生态系统的多样性和多变性。

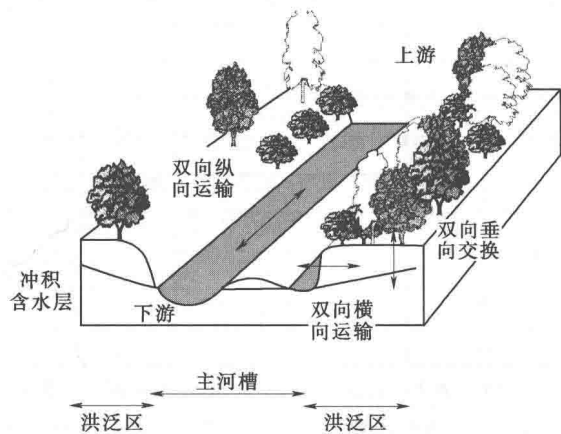


图 1.1 河流生态系统的三维结构图
(Piégay 和 Schumm, 2003)

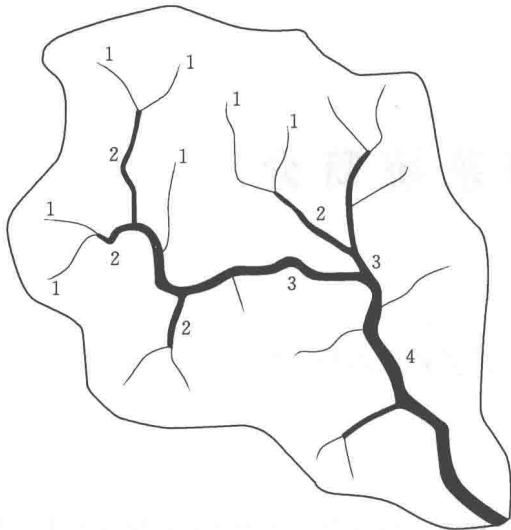


图 1.2 包含 4 级河流的流域汇水网
1—1 级河流；2—2 级河流；3—3 级河流；4—4 级河流
汇流出口可能是湖泊或更高等级的河流。
(译者注：此标记法有别于我国对河流的标记法，
我国的标记法中一级河流指大河。)

1.1.1 河流等级

河流及其汇流区景观单元是有等级的。最小的、长期有水流动的河段是 1 级河流；两条 1 级河流汇流而成 2 级河流；类似的，两条 2 级河流汇流形成 3 级河流等，以此类推（见图 1.2）。河流等级反映了河流规模、汇流面积、河道流量和河道宽度等特点。作为一个简单的河流分类系统，该河流等级划分可提供不同空间尺度的河流的各方面信息（见表 1.1）。绝大多数河流都是由低等级河段或源头河段组成，通常河段短、汇流面积小。中等规模的河流通常是 4~6 级河流，在美国国内比较多，数量超过 2 万条。美国国内约 250 条河流是 7 级河流或更高等级，只有少量河流等级更高，其中，密西西比河以其平均流量位居世界 15 大河流之一。

表 1.1 美国各种等级河流的数量和河道长度（Leopold 等，1964）

河流等级	数量/条	平均长度/km	总长度/km	平均流域面积/km ²
1	1570000	1.6	2510000	2.6
2	350000	3.7	1300000	12.2
3	80000	8.8	670000	67.0
4	18000	19.0	350000	282.0
5	4200	45	190000	1340
6	950	102	98000	6370
7	200	235	48000	30300
8	41	540	22999	144000
9	8	1240	9900	684000
10	1	2880	2880	3240000

注 美国本土河流总长约 5200000km，有将近一半都是 1 级河流，1~3 级河流总长占比达 85%。大江大河包括阿勒格尼河（7 级）、吉拉河（8 级）、哥伦比亚河（9 级）和密西西比河（10 级）。

每条河流的汇流面积与其规模成正比。确定一条河流自源头到河口的汇流面积比较简单，由此也可确定某条支流的汇流面积。与河流等级划分相似，河流汇流面积也可划分等级。汇流面积和流域面积常用于描述大的单元，小的单元常用小流域或亚流域等术语来描述。

在世界范围内，河流常以其在流域或区域内的等级位置而分类。美国地质调查局水文分类系统 [US Geological Survey Hydrologic Unit Cataloging (HUC) system, HUC 系统] 在十万分之一的地图上将流域划分成不同的地理单元（Seaber 等，1987）。该 HUC 系

统根据流域分布,将美国划分为 21 个大区域,每个大区域包含一条河流的汇流面积或一系列河流的汇流面积之和,还包括更小的汇流面积。8 位编码的 HUC 系统是标准系统,每个汇流面积约 $1000\sim 10000\text{km}^2$ 。还可进一步细分至 11 位编码或 14 位编码的 HUC 系统。

河流系统的等级划分有助于对河流生态系统格局和过程的研究(见图 1.3)。河流的支流汇流、上下游连接,形成汇水网。汇水网的每个河段长 $1\sim 10\text{km}$ 不等,洪泛区和主河槽的区别显著。河段中包含了深潭和浅滩,形成了生物赖以生存的栖息地;此外,砂卵石滩或枯枝落叶层也可形成生物栖息地。

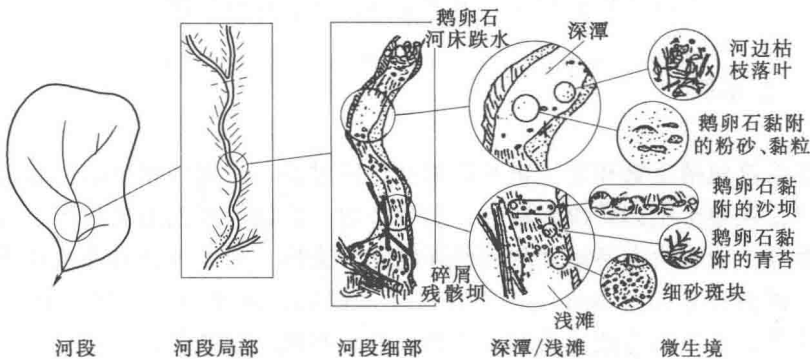


图 1.3 河流系统的等级划分示意图 (Frissell 等, 1986)

河流系统的等级划分还有助于解释上一等级河流的变化过程对下一等级河流的影响以及由此产生的后果。气候、上游来流、地质、地貌等条件作用于河流,在地表冲刷和侵蚀,形成主河槽和洪泛区;河岸稳定性和河水深浅均会影响主河槽和栖息地。

1.1.2 纵向格局

河流自上游流向下,一些物理参数变化较大,已有许多研究。如因支流汇入,下游河道水面变宽、水量增多。河流纵向格局特征显著:源头区和上游河道底坡较大,中下游河道平缓。河道自上而下纵向上可分为三个区域:侵蚀区、过渡区和沉积区。源头区除了河道底坡较大外,河岸陡峭,激流瀑布相间,剧烈冲刷,穿越 V 字形峡谷,携带大量泥沙向下冲泻。中游过渡区峡谷变宽,河道底坡变缓,支流沿途汇入,部分河段蜿蜒曲折,泥沙随水流继续搬运至下游。下游沉降区,河面继续加宽,峡谷低矮平缓,河道蜿蜒,泥沙沉降,形成多河道或辫状河道。

这个区段划分也揭示了河流泥沙侵蚀、搬运与沉降的过程。河流挟沙能力是底坡和流量的函数,河流挟沙能力越强,挟带泥沙粒径越大。因此,也可以说河流是泥沙分级的“机器”。事实上,河流纵向格局的多样性如深潭、浅滩、跌水等的形成也正是取决于泥沙输移、河流能力等因素。

1.1.3 河流及其流域

河流生态学家早就注意到流域土地开发与利用对河流生态系统的重大影响 (Hynes, 1975)。雨雪降落在流域内,通过千万条路径汇入河流,如地表汇流、地下入渗等。地质条件、坡度和植被覆盖情况等强烈影响水流汇集过程,人类活动如土地开发利用影响更甚。降雨冲刷地表物质、挟带有机物进入河道,地下入渗水流挟带下垫面表征性溶解物质

进入河道。在河流源头，因峡谷陡峭，河床的泥沙冲刷进入河道；中下游则是河流两岸泥沙冲刷进入河道，特别是河道蜿蜒曲折，河流几经改道，河岸经受洪水周而复始的冲刷而发生侵蚀。因此，河流的水文过程、河流形态、化学特性等是气候、地形地貌、地质条件和植被覆盖等多因素综合作用的结果。

河流周围的土地即消落区毋庸置疑对河流及其生态功能的影响巨大。消落区包括河岸滨水带、洪泛区等，消落区中植被对河流的影响是最大的。植物根系稳固河岸、防止坍塌，水中的枝条和茎秆提供生物栖息地，树冠遮阴，落叶和无脊椎动物为河流生物提供食物和能量。人类活动若改变植被分布，河流系统会发生许多变化。

1.2 河流生态系统

河流生态系统包括生物和非生物及其相互作用过程，表现出相应的生态功能。河流的某些属性可以反映整个生态系统的特性：总生产力、代谢、有效能量利用、可利用能源多样性、物种数等。所有生态系统都与周围环境发生交换，河流生态系统尤其开放，显示出高度的纵向、横向和垂向连通性。人类自古逐水而居，河流为人类提供饮水、灌溉、运输、发电等功能，几乎所有的河流都有人类开发和利用活动的印记。

1.2.1 能量来源

在河流食物网中，所有的能量来源于初级生产。初级生产者包括周丛藻、硅藻及其他自养微生物，分布在石块、木头和其他基质表面，当光照、营养盐和其他条件适宜时迅速生长繁殖。来自消落区的有机物如枯枝落叶、动植物残骸等进入河流，成为重要的能量来源。细菌和真菌是初级消费者，将有机物分解利用，为次级消费者提供食物和能量。

河流有机物来源于上游或周边的消落区，取决于滨水带植被及其与洪泛区的连通性。林区河源和大型洪泛区河流中，大部分能量由外源输入，称为外源能源；草原河流的多砂石床质吸附大量泥炭、藻类，故大部分能量是内生的，称为内生能源。一般的河流中能源有外源也有内生，如何区别两者并分析其对河流营养级的贡献是一个不小的挑战。

1.2.2 食物网和生物群落

正如适应周围的物理环境一样，为了适应食物的来源与供给，以及赖以生存的栖息地，河流生态系统中的生物显示出其特有的捕食能力和觅食模式。大型无脊椎动物包括昆虫、甲壳类、软体类等，因其相似的觅食方式、食物类型而归为一个功能群组。刮食性的水生动物取食河床基质上黏附的藻类，食碎屑者分解枯枝落叶，肉食者猎杀其他动物，功能群组的划分主要依据捕食方式而不是食物来源。

河流生态系统中的脊椎动物同样也有多样化的捕食方式，对周围环境的适应性较强，可充分利用环境中的资源。营养等级包括食藻动物、食腐动物、杂食动物、食虫动物和食鱼动物，捕食区域（如河床或表水层）也非常明显。很多鱼类主要以无脊椎动物为食，蜥蜴、一些鸟类和哺乳动物也是如此。藻类是很多鱼类和两栖类动物的主要食物，特别是热带地区的河流。杂食动物的杂食性意即可取食植物（或碎屑）、动物和鱼类，杂食动物幼年期主要取食无脊椎动物，其中很多种类食谱较宽。

河流生态系统中的生物群落由适应各类物理环境和食物来源的不同种群组成，各种群间相互作用。与大尺度的气候、植被、地质等条件变化作用于小尺度的河流生态系统物理和化学过程相似，一系列的环境因子同样影响生物群落中的种群。河段中能够定居并生存繁衍下来的物种能忍受水文、水温和水化学条件的变化。同时，也适应物理栖息地、食物来源、水温条件和水流变化等。

1.2.3 河流生态系统

河流生态系统包括水文循环、多变的河道、各种类型的栖息地、溶解物质、沉积物和生物体。生态系统各层次具有一些物理和化学过程，包括能流、物流（碳、氮、磷等物质循环）、自源头入海的物质传输等。河流不仅与全球水循环密切联系，还利用并重复利用生物活性元素。

任何生态系统中，营养盐循环描述了溶解无机物质的吸收、有机体的同化利用过程。营养物质以有机物形式储存于动植物体中，被其他消费者利用，最终通过呼吸或排泄释放出来（见图 1.4）。在河流中，无机物质和有机物质自上而下随水流传输，特别是无机物质，随水流形成养分螺旋。故营养盐的生物可利用性可用营养盐的吸收距离而不是吸收时间来表征。

在流域尺度下，营养盐利用量可用质量平衡分析法来进行估算，将流域作为一个整体，量化所有输入和河口的输出，从而弥补河段尺度下的不足。估算误差主要来源于生态过程对营养盐的吸收和土壤及沉积物对营养盐的滞留。例如，输入流域的总氮有 25%（有时候达 50%）自河口输出，有时候会产生误差，主要由陆地、湿地和河流本身的反硝化作用产生（Howarth 等，1996）。这种分析法在密西西比河流域上游和墨西哥湾缺氧区的农业施肥管理中非常重要，因为这些地区营养盐富集，很大范围内影响了当地的渔业。营养盐输出是输入的百分比，输入因流域的人类活动、食物和作物的输入输出、大气沉降等不同而异。要降低河流系统营养盐的输出，需要减少营养盐的输入或加大内部消耗利用。

河流连续体概念描述了河流生态系统纵向上的河流等级、能源和食物网等格局特点（见图 1.5）。森林河流中，源头（1~3 级河流）河段被树阴遮蔽，河水中有大量的枯枝落叶，藻类生长受到光限制。4~6 级河流的河宽加大、河面开敞，水体中有较多的水生植物，上游输移有机颗粒物至此。源头区多外源输入，初级生产量与呼吸消耗量的比值较小；中游河段的初级生产量与呼吸消耗量的比值较高。高等级河流河面进一步变宽，水深增大，藻类难以生长，来自于上游和洪泛区的有机物大量输入，浮游生物大量繁殖，其种群占优。

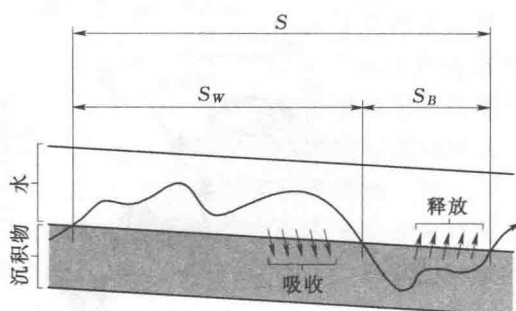


图 1.4 河流中营养盐的吸收与释放过程图
(Newbold, 1992)

注：营养盐的吸收与释放随水流向下游输移，形成养分螺旋，养分螺旋的长度是水体中营养盐以溶解无机态颗粒随水流输移的距离（也称吸收长度 S_w , m）及被生物体吸收利用、分解释放到水体中的距离（也称周转长度 S_B , m）之和。箭头显示了营养盐在河床基质中的吸收与释放过程。

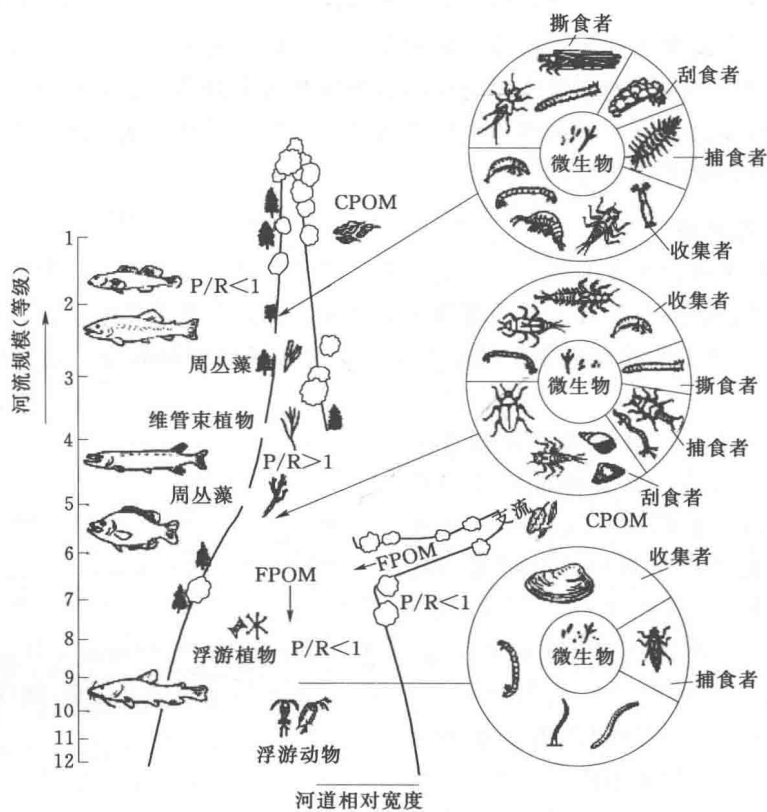


图 1.5 河流连续体概念示意图 (Allan, 1995; Vannote 等, 1980)

CPOM—粗有机颗粒; FPOM—细有机颗粒; P/R—初级生产量/呼吸消耗量

注: 河流连续体概念总结了河流纵向上能量输入和消费者变化的过程。初级生产量与呼吸消耗量比值较低表明来自有机物和微生物活动的能源输入到河流食物网, 大部分来自于河道外的陆源。初级生产量与呼吸消耗量比值接近 1 表明输入食物网的大部分能源来自于河道中的初级生产。上下游的连通性是指细颗粒有机物 (fine particulate organic matter, FPOM) 自源头输移到下游。

1.3 当前河流的状态

如今只有少数河流保持原始风貌, 大多数都久经开发利用, 特别是人类活动密集的地区, 河流发生的变化足以使经验丰富的生态学家们都难以寻觅其原始踪迹。因此, 有必要看看哪些地区的河流已受到人类破坏而并未被察觉。美国西部落基山地区科罗拉多流域前山地区的河流即有类似案例。特别是曾有原住民聚居的高山地区, 鲜花盛开, 富产鲑鱼, 野生动物丰富, 游客常以为那里的河流都保持原始自然状态, 然而, 事实并非如此。据 1840 年首次考察即发现该地区有捕兽夹, 用于猎捕河狸。生活在河流中的河狸喜挖掘、筑坝, 从而改变水流、形成湿地、营造栖息地, 便于鲑鱼生活和溯游, 但由于人类大规模捕杀河狸, 这一切都发生了改变。1859 年该地区发现金矿和银矿, 引发大规模矿产开发, 导致山谷破坏、土壤和水体酸化, 危害至今未消除。1860 年以后, 河谷地区人们安营扎