



· 水利学科学术著作丛书 ·

底栖动物与河流生态评价

Benthic Macroinvertebrate and Application in the Assessment of Stream Ecology

段学花 王兆印 徐梦珍 著



8

清华大学出版社



· 水利学科学术著作丛书 ·

底栖动物与河流生态评价

Benthic Macroinvertebrate and Application in the Assessment of Stream Ecology

段学花 王兆印 徐梦珍 著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍了河流生态系统的概念与功能、河流生态健康状况的指示物种以及常用的河流生态评价方法,总结了我国河流的主要生态问题,提出了河流综合治理的原则;详细介绍了底栖动物的生态学作用、常见底栖动物群及其生活习性,以及影响底栖动物的主要环境因素;探讨了河床演变、河床底质、水质污染和生物栖息地连通性等生态条件对底栖动物的影响,提出了生物栖息地适宜度指数;以底栖动物为指示物种对东江水生态进行评价并提出受损河段的生态修复方法。本书也介绍了常用的底栖动物采样方法和鉴定方法,并结合国外报道的底栖动物类群资料和作者在我国河流湖泊中采集到的底栖动物样本,给出了底栖动物常见科属鉴定图谱。

本书可作为河流生态学、水力学及水生生物学等相关专业的研究者和高校学生的参考书籍或工具书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

底栖动物与河流生态评价/段学花,王兆印,徐梦珍著.——北京:清华大学出版社,2010.8

(水利学科学术著作丛书)

ISBN 978-7-302-21860-9

I.①底… II.①段…②王…③徐… III.①水生动物:底栖生物—研究②河流—环境生态学—研究 IV.①Q958.8②X171.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第009572号

责任编辑:汪亚丁

责任校对:赵丽敏

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京天成印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:11 字 数:259千字

版 次:2010年8月第1版 印 次:2010年8月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:90.00元

产品编号:035475-01

前 言

河流系统是大尺度生态系统的重要组成部分，具有生物栖息地、传输带、过滤带、隔离带、生物物质和能量的源与汇等六项功能。随着经济的高速发展，土地利用、农林业活动、城市化和水利工程建设等人类活动对河流系统施加了大量生态压力，加速了不同时间尺度内的物理过程、化学过程和生物过程的演进，打破了河流的自然生态过程及其动态平衡，改变了河流的水沙传输特性、滨岸植被演替进程、河床冲淤过程和河流形态等生态条件，造成了河边植被的损失、生物栖息地的隔离和丧失、外来物种的增加和本地生物群落的退化，使得生物多样性骤减，河流生态条件遭到严重破坏，河流的诸多服务功能也逐渐被削弱。河流生态评价与修复方略研究已成为水利学家和生态学家关注的焦点之一。在河流生态评价中，生物评价和监测手段具有化学评价和监测无法比拟的突出优势，已越来越受到重视，并得到广泛应用。对河流生态系统的状态进行完全测量，甚至对河流系统内存在的所有物种进行一次完整的普查都不现实。因此，选择良好的指示物种对河流系统生态状况进行评价成了有效可行的办法。指示物种可以表征环境特征或环境质量，起到一种“预警”的作用，可用来预测环境污染、种群发展趋势和生物栖息地的质量。利用指示物种对河流生态进行快速生物评价的方法因其快捷、准确、简便而得到了广泛应用。

常用的指示物种包括着生藻类、鱼类和大型底栖无脊椎动物（本书简称底栖动物）等。其中，底栖动物具有藻类和鱼类的优点，应用最广泛。欧洲上百种生物评价方法中有2/3是基于大型底栖无脊椎动物。底栖动物是水生生态系统的重要组成部分，具有突出的生态优势和极其重要的生态学作用。底栖动物处于水生食物链的中间环节，可以促进有机质分解，净化水体，又可作为鱼类的天然优质饵料，在水生生态系统的能量循环和营养流动中起着重要作用。底栖动物的出现或消失可以准确地表征自然环境变化或人类干扰对水生生态系统造成的持久性和间断性影响。底栖动物群落结构与周围生境之间有着很强的耦合关系，群落健康与否，在很大程度上反映了整个水生生态系统的健康程度。正因为底栖动物在水生生态系统中的特殊地位及其在生态评价中的优势和重要性，开展河流中底栖动物群落的研究，深入探讨底栖动物与河流水沙特性之间的关系，研究底栖动物对生态压力的响应，有助于更加全面地认识河流生态系统，进一步了解水生动物与河流系统的相互作用关系，对于河流系统的生态保护与生态恢复具有极其重要的参考价值和指导意义。

II 底栖动物与河流生态评价

作者在野外采样与试验期间，余国安博士、王费新博士、黄文典博士、谢小平博士、王文龙博士、田世民博士、刘怀湘博士、江永梅、陈根发、张康、施文婧、贾艳红、王睿禹、韩鲁杰等给予了大量无私帮助，本书受到国家自然科学基金项目（No. 50779027）“底栖动物与河床组成的关系及其在水利工程生态评价中的应用”和水沙科学与水利水电工程国家重点实验室的资助，在此一并致谢。

作者
2010年4月

目 录

前言	I
第 1 章 指示物种与生态评价	1
1.1 河流生态	1
1.1.1 河流生态系统概念	1
1.1.2 河流生态系统的功能	2
1.1.3 我国河流的生态问题	3
1.1.4 河流治理与生态修复的原则	6
1.2 指示物种	12
1.2.1 指示物种的定义	12
1.2.2 常用指示物种及生态学作用	13
1.3 河流生态评价方法	15
1.3.1 河流生态评价方法的基本原则和分类	15
1.3.2 生物指标	17
本章参考文献	22
第 2 章 大型底栖无脊椎动物	24
2.1 定义及生态学作用	24
2.2 底栖动物介绍	25
2.2.1 昆虫纲	26
2.2.2 蛛形纲	37
2.2.3 软甲亚纲	38
2.2.4 腹足纲	40
2.2.5 双壳纲	41

2.2.6	寡毛纲与多毛纲	41
2.2.7	蛭纲	42
2.2.8	涡虫纲	42
2.3	底栖动物的生活习性	43
2.4	底栖动物的分类	45
2.5	影响底栖动物的环境因素	54
	本章参考文献	62
第3章	河流生态条件对底栖动物群的影响	65
3.1	不同河床演变条件下的底栖动物群	65
3.2	河床底质对底栖动物群的影响	76
3.3	污染对底栖动物的影响及水质生物评价应用	80
3.3.1	底栖动物与水质生物评价关系概述	80
3.3.2	污染对底栖动物的影响及水质生物评价研究	83
3.4	栖息地多样性、适宜性与生物多样性的关系	91
3.4.1	栖息地隔离的生态效应	91
3.4.2	栖息地多样性	92
3.4.3	栖息地适宜性	94
3.5	生态评价及修复实例研究——东江	98
3.5.1	东江流域概况及采样点介绍	98
3.5.2	东江流域生态评价	101
3.5.3	东江生态修复方略	103
	本章参考文献	104
第4章	底栖动物的采样和鉴定方法	107
4.1	采样方法和鉴定方法	107
4.1.1	采样面积	107
4.1.2	采样方法	108
4.1.3	鉴定方法	112
4.2	底栖动物鉴定图谱	113
4.2.1	蜉蝣目	113
4.2.2	毛翅目	121
4.2.3	襀翅目	129
4.2.4	鞘翅目	132

4.2.5 广翅目	142
4.2.6 蜻蜓目	144
4.2.7 双翅目	149
4.2.8 半翅目	157
4.2.9 端足目	159
4.2.10 腹足纲	160
4.2.11 双壳纲	165
4.2.12 寡毛纲	166
4.2.13 蛭纲	167
本章参考文献	168

第 1 章 指示物种与生态评价

1.1 河流生态

1.1.1 河流生态系统概念

河流是大气环流和地球下垫面共同作用的产物，为人类提供了淡水资源和生存环境，在人类社会发展的历史长河中起着举足轻重的作用。

生态系统 (ecosystem) 定义为一定空间上的生物和非生物成分通过能量和物质循环有机地结合形成的完整的生态学功能单位，即生态系统 = 生物群落 + 非生物环境^[1]。河流生态系统 (river ecosystem) 是大尺度生态系统的一部分，同时它又由许多陆生子生态系统和水生生态系统组成。从河流源头至河流系统的入海口之间，环境和生态系统是连续变化的，形成了河流连续体 (river continuum)。生态系统包括四类空间元素^[2]：基底、斑块、廊道和马赛克，各种尺度内的景观均可用这四类空间元素进行描述，见图 1.1。

(1) 基底 (matrix)，起优势作用并与地面大片范围相互连接的景观要素。理论上，基底可以是任何类型的地面覆盖体，常见的基底类型有森林、草原或农业区。在四类空间元素中，基底的面积最大，连接性也最好，往往是形成河流景观的背景。

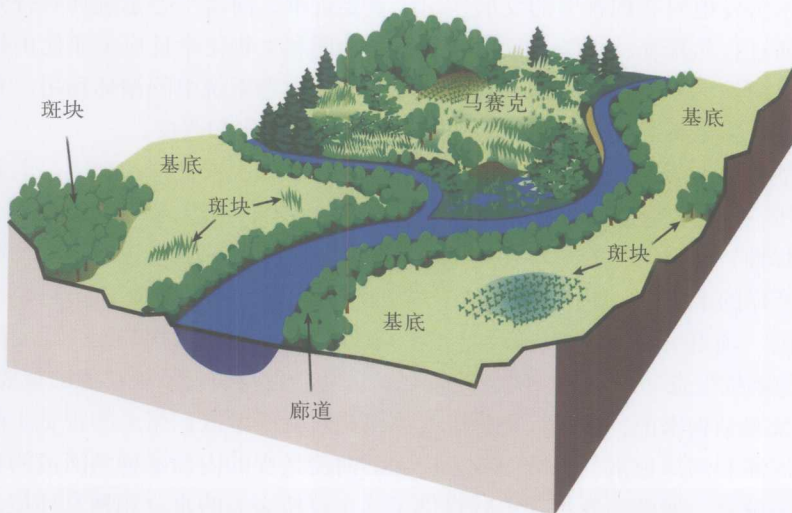


图 1.1 各种尺度内的景观均可用基底、斑块、廊道和马赛克的形式进行描述

(2) 斑块 (patch), 在性质上或外貌上不同于周围环境的地表块, 是景观空间尺度上所能见到的最小均质单元。斑块不如基底丰富, 是不同于基底的非线性区域。

(3) 廊道 (corridor), 具有通道和屏障功能的特殊类型的斑块。通常情况下, 廊道是线性或者带状嵌块, 如道路、河流、农田防护林、树篱、管线、堤坝或沟渠等。其中河流廊道 (river corridor) 是陆地景观中最重要的廊道, 具有重要的生态学意义。河流廊道在景观生态上所扮演的角色与机能非常独特, 不仅可以作为联络陆域与水域之间的生态交汇区 (ecotone), 还可作为物种栖息与迁徙的通道, 对于生物繁衍与生态系统的维持起着相当重要的作用。河流廊道尺度中的斑块同时包括自然结构和人工结构, 如, 湿地、森林、灌木丛或草地斑块、牛轭湖、居民区或商业发展区、河道中的岛屿、静态休憩用地等。河边森林或灌木植被是河流廊道中的常见基底, 但在某些区域, 草本植被也有可能成为河流廊道中的主要景观背景。

(4) 马赛克 (mosaic), 为斑块的集合, 空间尺度大体在几平方公里至几百平方公里的范围, 其中每个斑块的大小都不足以达到在景观内相互连接的优势程度。

1.1.2 河流生态系统的功能

河流生态系统在维系地球的水循环、能量平衡、气候变化和生态发展中具有极其重要的作用, 同时也是人类最重要的生命支撑系统, 对于人类的生存和发展有着重大的意义。总体来看, 河流系统具有社会功能和自然功能两大功能。

社会功能是指河流在人类文明和人类社会的持续发展过程中所发挥的功能, 主要包括供水、航运、发电、纳污净化等。河流提供了淡水资源, 为人类饮用水、工农业用水以及城市生态环境用水等提供了保障。与其他运输方式相比, 水路运输在经济和环境方面都具有独特的优势, 我国长江目前已成为全世界内河运输最繁忙、运量最大的通航河流。为了开发河流的航运功能, 往往通过修建闸坝、疏浚泥沙、堵塞汉流、开挖运河等方法保证河流的航道水深。水电资源是一种“环境友好”的可再生资源, 与火电和核电相比, 水力发电具有发电效率高、维护费用低、对环境污染小等突出优势, 我国主要河流 (如长江、黄河、珠江等) 的水力发电对我国社会的发展作出了重要贡献。河流生态系统具有较强大的自净功能, 能够通过自然稀释、扩散、氧化等一系列物理和生物化学反应来净化由径流带入河流的污染物。河流的自净功能保证了各种物质在河流生态系统中的循环利用, 有效地防止了营养物质过度积累所形成的污染, 使河流水环境得到净化和改良。

自然功能是指河流在地球和自然界的演变、发展过程中所发挥的功能, 主要包括输送物质 (如泥沙、水流、营养) 和能量、塑造地质地貌和生态功能 (如维持景观、调节气候、维持生物多样性) 等。河流的输水功能可及时排泄降水引起的地面短期积水, 在非降水期汇集源头和两岸的地下水, 使河道中保持一定的径流量, 同时可调剂不同地区间的水量^[3]。输沙是河流的一项重要功能, 河流输沙功能的衰竭会导致河道淤积加剧, 改变河床演变进程, 导致河流系统生态功能退化。河流的景观娱乐功能也是河流系统功能的重要组成部分。狭义的河流景观是指水面、河岸绿化带以及滨河建筑物等给人们带来的视觉上的美感, 通常由河道、河滩和河岸植被三部分组成。广义的河流景观的内涵延伸到河流的自然循环和系统的平衡与健康。河流为各种动植物提供了其生存所必需的水分和栖息环境, 其生态功能主要体现在河流对生物生存繁衍以及对栖息环境的支持方面, 包括六大方面, 即生物栖

息地,物质和能量及生物物种的传输带、隔离带、过滤带与发生区(源)、接受区(汇)^[2]。

①生物栖息地(habitat)。栖息地是生物赖以生长、繁殖、摄食和运动的环境空间结构,河流栖息地则为植物和动物的生命活动及生命循环周期中的其他重要环节提供了必需的要素,如生活空间、食物、水源以及庇护场所等。②传输带(conduit)。传输带是指河道系统通过水流的传输作用运移能量、物质和生物。河道既可作为纵向通道,也可作为横向和竖直通道,为水流、泥沙、水生生物、能量、有机质和营养物质在任何方向(主要从上游向下游方向)的传输和运移提供可能。如,洄游鱼类——鲑鱼在海洋中生长,到了成熟期,它们会溯河而上到上游适宜的产卵场产卵。③过滤带(filter)与隔离带(barrier)。河流的过滤带功能为河流可允许能量、物质和生物选择性地通过,起到过滤器的作用。河流的隔离带功能为河流阻止能量、物质和生物运移的发生,起到屏障的作用。河流的过滤带和隔离带功能均可有效地减少水体污染,降低泥沙输移,同时又有选择地为河流输入营养物质。④源(source)和汇(sink)。源是河流为周围流域提供水、能量、生物及其他物质。汇是河流不断地从周围流域吸收物质、能量和生物。

从生态特性上可把河流分成三个区:①河流上游为山区河流,是流域主要的产沙区。河流生态系统受到河岸植被的显著影响,植被给河流带来大量的外来生物残屑。山区河流的河床质主要由大石块、卵石或裸露的基岩构成。一般来说,在河流上游地区,人类活动的影响较小,河流水质较好,生物栖息地条件良好,生物多样性高。②中下游从山区河流过渡到冲积河流,主要以物质传递和输运为特征。多数河流的中下游河段输沙平衡,来沙量与输出量相等,床沙质多为粗沙和细沙。流域的温度季节性变化范围宽,昼夜温差大,流量等水文条件有节律地变化,为不同生物类群提供了适宜的栖息地条件。在这一区域,陆生有机质输入的重要性降低,同时本地产生的有机质重要性增加。有的河流含沙量高,水生生物群落的发展受到限制。有的河流接受大量污水,水质较差,生物多样性降低。③第三区即冲积平原、三角洲或河口区,该区域以泥沙淤积为主。这一区域的河床质为细沙或粉沙,流量相对稳定。由于大量水体的调节作用,昼夜湿度差和温度差都较小。由于河水和海水的交汇作用,该区域的不同水域具有不同的含盐度、水深和流速,为不同生物提供了多样化的栖息环境。尤其是河口湿地,是物种多样性较高的地区。

1.1.3 我国河流的生态问题

对一个流域而言,在地质、土壤和地貌类型等大尺度的环境背景条件基本不变的情况下,河流系统经过长期演替会达到一种动态平衡。气候演变、火山爆发、洪涝灾害、森林火灾等自然压力,以及农业开发、开矿、土地利用、植被恢复与破坏等人类活动都会打破这种平衡。这些自然压力或人类活动引发的作用于河流系统的各种扰动都会影响或改变原有河流生态系统的发育和演变过程,有的学者将这些扰动称为生态应力或者生态压力(ecological stresses)^[4],有的学者称之为生态胁迫^[5]。

我国河流的生态环境极其脆弱,环境保护形势严峻,一系列生态环境问题亟待解决。所谓生态环境问题,是指人类为其自身生存和发展,在利用和改造自然的过程中,破坏和污染自然环境所产生的危害自然生态及人类生存的各种效应。其原因可分为两类:一是不合理地开发和利用资源对自然环境造成的破坏,以及由此所产生的各种生态效应;二是因工农业发展和人类生产、生活等活动所造成的环境污染。在某些地区,环境问题可能以

其中一类为主,而在大部分地区两类问题往往同时存在。河流生态系统具有一定的生态脆弱性,也具备一定的生态弹性。生态脆弱性是生态系统在特定时空尺度上相对于干扰而具有的敏感反应^[1]。生态弹性是在生态压力还没有超过生态系统的承载阈值之前,河流系统进行自我修复的能力。

随着经济的高速发展,中国的大小江河相继步入了资源开发的高峰期,人类活动对河流系统施加了大量的生态压力作用,打破了河流生态系统的动态平衡,使其生态条件遭到严重破坏,河流的诸多服务功能也逐渐被削弱。生态平衡是生态系统达到的一种稳定状况,是指在一个生态系统中,其生物因素内部以及生物因素与环境因素之间的稳定状态,包括生态系统中物质、能量的输入和输出的平衡,生物种群的数量及其相互关系的协调,生物与环境之间的相互适应状态等。

河流生态系统是开放的系统,总有物质和能量的输入、输出,但是,土地利用、农林业活动、城市化建设,以及大堤、大坝、护岸结构、河道渠化等水利工程建设改变了河流的水沙传输特性、河床冲淤过程和河流形态,造成了河边植被的退化,破坏了河流的连续性,导致栖息地破碎化,使其逐渐变成一个个小的或半封闭的子生态系统,从而使生物栖息地的多样性降低,影响了河流的生态服务功能。生境面积是影响种群稳定发展和生存的重要因子,而生境破碎化将导致生境面积的萎缩和生物栖息地的隔离、丧失,是导致物种退化和生物多样性降低的重要原因。生境是生物群落的生存条件,二者不可分割,生境多样性是生物群落多样性的基础,生物群落多样性随生境的空间异质性增加而增加^[6]。河流形态的多样性是生境多样性的重要表现形式,不同的河流支持着不同水平的生物多样性。一般来说,河流的弯曲度越高,生物群落的多样性就越高。但是河流的渠道化和裁弯取直等水利工程改变了河流蜿蜒的形态,导致河流形态均一化、规则化和破碎化,生境异质性降低,进而,生物群落多样性水平下降,影响了河流的生态健康,从而使得河流生态系统退化,河流的生态服务功能下降。

大坝对于下游的影响可以分成三级^[7]:第一级与大坝合龙同时发生作用,影响能量、物质往下游河道的传递。第二级为河床演变的变化,需要1~100年甚至更长的时间才能达到新的平衡状态。第三级为生物种群包括浮游生物、底栖动物和鱼类的演变。底栖动物是许多鱼类的主要食物来源,所以底栖动物群变化会影响鱼类数量,这些影响将需要更长的时间才能达到平衡。我国正处于大坝建设的高峰期,已建和在建大坝数量居世界第一。近五十年来,长江通江湖泊群逐渐变小、变隔离。大坝的修建使得大坝上游河谷变成人工湖,使原有的河滩沼泽地等浅水生态系统转变成水库生态系统,部分陆生动物和适合居住于河流的鱼类被迫迁徙,取而代之的是适合居住于湖泊的鱼类等。大坝蓄水后,上游人工湖水从流动状态转成半静止状态,不同类型大坝的静水区面积不同,对大坝下游的影响也不同(表1.1)。水流流动状态的改变易导致库区水体富营养化。大坝还使得上游河段和水库发生泥沙淤积,造成卵石河床被细沙和淤泥覆盖,改变了原有的生物栖息条件,阻碍了鱼类的溯河迁移,影响了鱼类的正常产卵。大坝将对洄游鱼类造成难以逾越的障碍。许多国家试图通过修建鱼梯或鱼道来弥补大坝对洄游鱼类造成的这种影响,但鱼道的作用相对有限,不能完全抵消大坝的阻隔影响,且通过鱼道完成上下游迁移的鱼类比例较低,大部分鱼群会误入大坝机组被碾死。有文献记载^[8],由于环境条件的改变和通过水电大坝时发生伤亡,估计有90%的幼鱼死于产卵地到河口的迁移途中。而且修建鱼道的成本较高,提高

了工程投资。洪水和水位的周期性上升是鱼类产卵的主要信号^[9]，图 1.2 给出了天然条件下宜昌站和监利站的水位变化和鱼类产卵时间的对应关系，可以看出，鱼类产卵会受到水位升高和流量增加的刺激而增强。而水库运行对洪峰的削减作用导致原先季节性水位浮动被调平或减弱，从而改变了某些鱼类的生命循环和产卵繁殖条件。

表 1.1 不同类型大坝的静水区面积及其对下游的影响^[8]

大坝类型	静水区面积	对坝下游的影响
防洪坝	最小	坝下水流深急，对河床冲刷作用很强
蓄水坝	最大	枯水季节水位大大下降，沿岸动植物所受压力大
发电坝	中等	泻量极大，冲刷力极大，原先栖息的动物难以定居

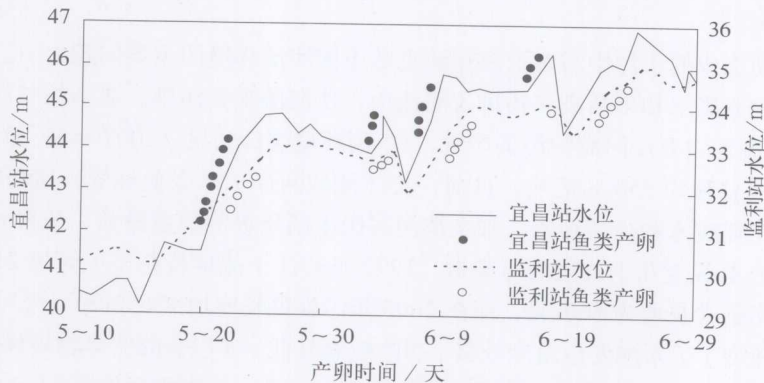


图 1.2 天然条件下宜昌站和监利站的水位变化和鱼类的产卵时间^[10]

堤防是为了抵御洪水或潮水给人类正常活动和生存环境带来的自然灾害而修建的水利防护工程的总称。人们常通过裁弯取直、边岸衬砌、修建防洪堤等把原来蜿蜒多变、流动缓慢的天然河流改造成外形归顺、水流顺畅的人工河道，以达到稳定河势、加大过流能力、尽快宣泄洪水的目的^[11]。我国已建堤防总长 20 余万公里，尚有若干堤防工程正在规划与建设之中，主要分布在各大江河的干、支流上和湖泊周围及沿海一带。堤防极大地改变了流域内不同区域原有的自然水文特性，水流不能自由漫岸上滩，以致引起河边湿地和滨河植被面积减小，干扰了河流滩地和附近沼泽之间的物化、生物作用，原来在水位回退期间会发生的有机质更替、无脊椎动物和草食性鱼类迁移均由于受到干扰而消失。堤防将蜿蜒曲折的天然河流改造成直线或折线型的人工河流或人工河网，将自然河流的复杂形状变成梯形、矩形及弧形等规则几何断面，使得河流形态直线化，横断面几何规则化，降低了河流形态的多样性。

近年来我国经济、社会发展迅速，城市和农村地区社会生产力与生产规模都得到了极大提高，然而城市化的加剧给河流生态系统带来了巨大的压力。城市是人口、资本、生产和消费聚集的区域。城市化对河流生态环境的影响主要表现在改变了河流下垫面的透水性，致使河流水文、泥沙产输和水生态环境发生变化，导致河流对地下水的补给减弱，洪水频率增大，阻挡泥沙入流，破坏生物栖息地等。城市化建设缩短了汇流时间，增加了地表径流，加大了洪水风险，引发地下水资源短缺，引起严重的水土流失。诸如过度放牧、毁林

开荒等农业活动同样会引起流域水沙变异,从而影响河流生态系统的健康发展。农业活动对河流生态系统的改变主要表现在以下几个方面:①为获取农业上的丰厚回报,人类通常以破坏河岸地和河流阶地上的天然植被来换取耕地,或通过河湖围垦来获取耕地,导致生物多样性水平很高的河岸、漫滩和阶地上的植被被单一的农业植被代替,破坏了河岸生物栖息地的多样性。河湖围垦还使得河湖环境功能失调及水体富营养化,引起水生生物栖息地减少和濒危物种栖息地消失。②耕作对土壤的扰动,破坏了土体结构,导致土壤侵蚀加剧,造成水土流失,增加了高地的地表径流和污染物的迁移。③大量化肥和农药的使用使耕地、农田成为河流的重要面源污染源,工农业污水排放降低了河流的水质质量。④农田中修筑的防洪设施和田间灌溉系统改变了地表结构和水文特征,其潜在的影响破坏了地表和地下径流过程,改变了水体理化性质,导致水生和陆生生物栖息地多样性降低。城市化建设和工农业生产的飞速发展还使得地表水和地下水过度开采,使得河流水量补给量减少,导致河流生态缺水^[12]。

人类活动造成的水污染与水资源短缺也是中国河流环境的主要问题之一。人类活动使得大量的工农业废水和生活废弃物排入河流中,使河流受到污染。我国的长江、淮河、海河、太湖、东湖等主要江河湖泊污染严重。《全国环境统计公报(2007年)》显示,2007年,全国废水排放总量为556.8亿吨。目前,长江流域两岸工矿企业林立,城市化建设加快,产生大量的工业废水和生活污水,加上滨河居民生活垃圾的肆意排放,使得长江两岸形成了长度达几公里甚至几十公里的污染带。1992年长江干流攀枝花至上海等21个主要城市江段的近岸污染带长度为560km,而在2003年污染带长度增至650km^[13]。大坝建设也使得水质发生改变:①水库发生温度分层;②溶解氧降低;③拦截的营养物质导致富营养化;④水流流动性降低,水流稀释和降解污染物的能力下降,污染物含量增高。

1.1.4 河流治理与生态修复的原则

鉴于河流在人类社会中的重要地位,维持河流生态系统健康对于保护河流的生物多样性,促进人与自然和谐发展具有深远的意义。河流生态系统的健康不仅意味着要使河流保持生态学意义上的结构合理,生态过程的延续,功能的高效与健全,能量流动和物质循环的正常进行,对自然干扰的长期效应具有抵抗力和恢复力,能够维持自身的组织结构长期稳定,还强调河流生态服务功能的有效发挥。河流健康的恶化主要表现为水中的养分、水的化学性质、水文特性和河流生态系统动力学特性等的改变,以及由此对原有水生生态系统和原有生物物种造成的巨大压力^[3]。

一旦在河流开发利用过程中对河流施加的生态压力超过其自身的最大承载能力,即临界阈值,河流生态健康将恶化,再使系统从高度退化状态得到恢复将非常困难,需要很长一段时间才可能实现,并需要大量的资金投入和人类的不断干预。生态修复或生态恢复(ecological restoration)是指修复由于人类活动而遭受破坏的生态系统的多样性和生态功能,使其恢复到受干扰前的自然状况^[14]。生态修复的目标是:提高植被的覆盖率,提高区域的生物多样性和生态系统的稳定性,保持生态系统的健康,并尽可能提升景观效果,带来视觉和美学享受。它追求的不仅仅是重建结构或修复特殊的物理过程和生物过程,而是重建有价值的生态功能。生态功能的修复可为重建一个自我持续发展的生态系统提供可能。实施河流生态修复是为了使河流廊道的功能得到有效修复,恢复河流系统健康,实现

人与河流的和谐共存与发展。生态系统修复是使受损河流恢复其功能健康的根本途径。河流生态修复的基本内涵是在遵循自然规律的前提下,根据生物群落演替理论,通过物理、化学和生物的手段,控制待恢复生态系统的演替方向和演替过程,把生态系统恢复或重建到既可以最大限度地为人类所利用,又保持了生态系统必要的功能,并使系统达到自我维持与健康发展的状态。具体地说,河流生态修复包括防洪减灾、生物保护、保水固土、水质优化、改善景观等六个方面,在修复中要体现出历史原则、自然原则、生态原则、美学原则和整体原则^[15]。

在河流的不同发育阶段,河流修复的理念和任务有很大不同。河流生态修复需包含对河流几何形态、河岸带、缓冲带和河流水质的修复,并保障河流的生态需水。如,在河流两岸设置缓冲带是重要的河流生态修复措施之一。生态保护要着眼于建立良好的生物赖以生存的栖息地,要维持较高的水生生物多样性就必须保证河流系统具有较高的生态完整性,如,通过建立连续的滨河植被廊道、增加滨河湖泊与河流的连通度、建设附加通河工程如鱼梯,来降低大坝等水利工程对河流连续体的隔离。注重点源污染与非点源污染治理相结合,如果只注重治理点源污染,而不解决非点源污染,将不能使水生生态系统得到任何的改善^[16]。评论水利工程的可行性和效益,应以生态影响为先,然后才是社会效益和经济效益^[17]。

一直以来,河流治理都是关乎国计民生的大事。国内外的河流治理将生态保护、鱼类洄游等各项指标列入治理的大目标中。治河不仅要考虑兴利防害,还必须考虑河流利用对生态的影响和其长期可持续性发展。这些新的思考和全局的把握都要求我们要确定一系列更为合理、更符合自然规律的河流治理方向和原则。河流的综合治理必须对河流的上、中、下游及河口全面考虑,统一规划,不因局部效益牺牲整体,必须综合考虑河流的水文、泥沙、地貌、景观、生态、土地利用和河流利用(包括发电、航运、供水和水上娱乐)等。王兆印等^[18]总结国内外的治河经验,提出了河流治理应遵循的四个原则。

1. 增加河水在陆地上的流动时间

河流是生命的载体,为各种水生生物提供了栖息场所,增加河水在陆地上的流动时间可为水生生物的繁衍生息提供更好的栖息条件。增加河水在陆地上的流动时间可通过加长河道和降低流速两条途径来实现。由此来看,小型的防洪型水库为各种水生生物提供了稳定的栖息环境,是符合该原则的。而河道渠化、裁弯取直和清障减糙等以利洪水尽快下泄的工程不符合该原则。

许多河流的河岸被硬化,而且堤岸都十分光滑。设计者的初衷是使水流能够更快地通过,增加行洪能力。然而,光滑的堤岸使得贴岸水流的速度增长,随处都可能撕裂沿岸大堤造成灾害。开展泥沙起动试验可以发现,在床沙拍实整平时,较低的流速就能使泥沙起动,而松散不平整的河床在较高流速下才发生泥沙起动。所以堤岸愈光滑愈不利于大堤安全。增加堤岸粗糙度对保护河岸非常重要。自然界的河岸都不是平滑的,大石块和植被分布或镶嵌在岸边,既降低近岸流速保护了河岸,又稳定了河势。近年来,水利工程建设者们已经认识到这个问题,开始采用岸壁加糙的方法来降低流速,图1.3是苏丹青尼罗河加糙的硬化河岸。

河流的阻力建设十分重要,阻力的分布决定着河流纵剖面和河床的稳定性。增大河流



图 1.3 苏丹青尼罗河加糙的硬化河岸

上游的河道阻力，降低水流流速，使尖而高的洪峰变得低平，大大降低了下游的洪水威胁。2007年嘉陵江洪水陡长陡落，许多大船因为河水陡落而搁浅，如果加大河道阻力，就能够有效控制当地洪水的涨落，减小下游的防洪压力。

洪水到来之前进行清障减糙的初衷是清除滩地和河道中的障碍物，以利洪水能够更快地下泄。但是这样做的结果是将洪水威胁由高水位的威胁转化为高流速的威胁。实际上，洪水漫滩后由于糙率增加，流速会降低，泥沙发生沉降和淤积，清水回流至河道，有利于形成高滩深槽的稳定河势。另外，洪水高水位的威胁比较容易解决，因为现在我们有足够的经济和技术实力加大堤来控制高水位；而来自高流速的威胁则难以应对，高流速会对河床和河岸的任一位置造成冲刷破坏。另外，高水位往往对于维持较高的生物多样性是必不可缺的，但是高流速却往往会对河流生态系统造成破坏。

弯曲是河流的本性，将蜿蜒的河流改成顺直或裁弯，就违背了河流的本性。裁弯取直减少了河道长度和河水流动时间，减少了河流的沿岸利用，同时使得水流能量集中，破坏力增加。将弯曲河流变得顺直虽然缩短了航运距离，但增加了水流流速，增强了水流冲刷作用，造成河岸侵蚀，破坏了航运设施。目前关于长江簪洲湾裁弯的呼声很高，裁弯工程能暂时降低洞庭湖的洪水位和洪水威胁，但集中的水流能量要在下游得到发泄，会对下游造成更大的威胁，对长江中下游防洪来说并不是一件好事。簪洲湾下游群众有俗语说“簪洲湾弯一弯，武汉水落三尺三”，因此，与其裁弯不如加高洞庭湖大堤。

对于生态来讲，水陆交界区域具有最高的栖息地多样性和生物多样性。大洋深处和沙漠中的生命体很少，而湿地之所以具有较多的生态功能，就是处于水陆交界区的缘故。加长河道可增大水陆交界区，对生态是非常有利的，也提供了可利用的河流滨岸区域。

2. 维持河势稳定和输沙平衡，逐步降低产沙和输沙

河流治理中一般应尽可能维持河势不变。改变现行河势的治理工程往往会带来一系列

连锁反应,造成很多不利影响。如三门峡水库已建成49年,尽管有许多负面作用,特别是渭河淤积问题,但如果突然废弃,将导致黄河和渭河的河势发生剧变,对已经稳定的河流生态系统造成冲击和破坏。河流的阻力建设是稳定河势的关键,河流的能量分布和阻力结构要相匹配,才能维持稳定的河势。可以采用人工阶梯-深潭(step-pool)等仿天然的人工阻力单元来建设河流的阻力结构^[19]。阻力意味着水流能量的消耗(如河中卵石),也意味着水流能量的储存(如水坝)。管理河流的阻力分布,有效进行阻力建设,对整体河势的稳定具有重大意义。

河床演变的动力在于泥沙,而泥沙运动的根本在于冲刷,没有冲刷就没有泥沙运动和淤积,也就没有河势的变化。因此控制侵蚀是稳定河道的根本。泥沙主要来自上游山区河段,山区河流的下切作用是造成河岸侵蚀、沟道侵蚀、细沟侵蚀和坡面侵蚀的根本原因。可以采取一系列的措施,引导山区河流发育出能够抵抗侵蚀下切的河床结构,既能稳定河床,防止下切和侵蚀,又能保持良好的河流生态。山区治理侵蚀应当以治河治沟为本,治坡为辅。如果河床沟床不再下切甚至抬高,岸坡不再增加甚至减少,侵蚀就失去了动力。如黄土高原的淤地坝建设和在砒砂岩地区沟道种植沙棘形成植物柔性坝来拦沙,对减沙、保护生态和稳定河势等都起着重要作用^[20]。应该指出,输沙达到平衡的河道应尽可能维持稳定。来沙的突然减少和增加都会引起河势剧变,引发一系列河流利用和生态的问题。河流对来沙变化有一定的调适能力。目前河流泥沙减少已成为国内外河流的大趋势,如果能够维持河流泥沙缓慢减少,河流将能适应这种变化。

有的河流治理工程目标是增强河道输沙能力,实际上不利于河势的稳定和河流生态的保护。历史上,明代治河专家潘季驯提出“束水攻沙”的治河思路,即束窄河道,增加流速,提高输沙能力,以解决黄河的泥沙淤积问题^[21]。然而束水攻沙不利于稳定河势,也给下游河床演变带来了不稳定因素。潘季驯用束水攻沙理论来治理黄河,在治理初期比较有效,但其去世后不久,黄河又不断泛滥成灾,说明束水攻沙不是科学的治河思路。

3. 提高生物栖息地的多样性和连通度

生物多样性是河流健康的重要指标。作者及研究小组发现,河流系统的生物多样性与河流栖息地的稳定性和多样性呈正相关关系。因此,河流治理应朝着提高生物栖息地多样性的方向发展。为此要做到两方面:一是增加河流和通河水域的水面面积;二是增加具有低流速和不同水深的水域,如河湾、通河湖泊等。河道渠化使河道均匀整齐归一化的治理思路和治理工程不符合该原则,渠化后的河道所能提供的生物栖息地比较单一,导致水生生物多样性降低。

河流中存在各种生物,包括浮游生物、底栖动物和鱼类等。对底栖动物影响最大的物理因素是河床稳定性和底质组成:河床愈稳定,物种愈多;卵石河床、浮泥及水生植物对底栖动物的生长繁衍比较有利,沙质河床最不利。因此,在山区河流维持卵石河床稳定,在平原河流促使粘性细颗粒淤积形成浮泥层,以及促进水生植物生长的河流治理工程,对于净化水质和维持良好的河流生态非常有利。在许多山区河流,采取措施促进阶梯-深潭系统发育可以增加生物栖息地的多样性,能有效提高生物多样性,改善生态条件^[22]。

目前,一些河流开发治理工程造成了生物栖息地的隔离。例如北京市的河道多采用混凝土硬化河岸甚至河床,使得底栖动物和两栖动物难以生存(图1.4)。最近北京市政府规