



滇池流域

水生态系统状态与健康评估

黄 艺 曹晓峰 陈小勇 等 ● 著



 科学出版社



滇池流域水生生态系统状态 与健康评估

黄 艺 曹晓峰 陈小勇 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了滇池流域水生态系统状态与健康评估。全书分为上下两篇共八章,重点分析了滇池流域社会经济、自然地理特征、水生态系统演变与驱动力以及水生态系统类型与特征,并基于不同的水生态健康评估方法,对滇池流域不同水生态功能分区与不同水生态系统类型进行了健康评估。

本书适合生态学、环境科学、水文与水资源、环境规划与管理等专业的教学、科研和从事流域管理工作的读者借鉴和参考。

图书在版编目(CIP)数据

滇池流域水生态系统状态与健康评估 / 黄艺等著. —北京: 科学出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-03-059236-1

I. ①滇… II. ①黄… III. ①滇池-流域-水环境-生态系统-研究 ②滇池-流域-水环境质量评价 IV. ①X832 ②X824

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 244921 号

责任编辑: 刘 超 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 李姗姗

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 400 000

定价: 218.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

流域水系污染和湖泊水体富营养化是我国水环境所面临的主要问题之一。虽然近年来全国地表水的水质已经得到不断改善，但全国水环境形势依然严峻。根据《2015 中国环境状态公报》发布的结果，2015 年全国依然有约 8.8% 的地表水为劣 V 类。其中，全国 62 个重点湖泊（水库）中，4 个为 V 类，5 个为劣 V 类。我国淡水资源主要来自湖泊和水库，每年为我们的生产和生活提供了 70% 的总用水。湖泊水体污染已经成为我国水安全的主要潜在威胁。

因此，一直以来我国水环境管理的重点主要放在水质管理上，即根据不同用途对水资源进行水质控制，以保证其满足社会经济发展和人们生活的需求。对水环境好坏的评价，也主要以水质为关注点，通过监测水中的污染物浓度，评价水环境质量，很少从全流域角度对水环境状态进行综合评估和研究。随着对水资源和水环境管理的深入研究，流域水生态的研究者和管理者逐渐认识到，水质只是水环境的表象之一，只有健康的流域水生态系统，才能为人们的生产和生活提供足够的水量和优质的水质。因此，在了解流域水生态系统现状的基础上，如何通过对流域实施综合管理，维持流域的水生态系统健康，成为水资源管理的重要目标。

近十年来，水生态系统健康评估作为流域管理的科学基础，受到了高度重视。不同国家和地区已逐步把以流域为单元、建立生态系统健康的评价体系、恢复流域生态系统或从生态系统健康的角度综合整治流域环境作为流域开发的重要措施。例如，太湖、淮河、乌梁素海构建了一系列的水生态系统健康评估理论和方法体系。根据流域所在地的自然和社会经济特点，以及水生态健康评估结果，提出了相应的流域管理措施，为维持流域的稳定平衡，促进水生态系统正向演替做出了贡献。这些工作使得流域水生态的研究者和管理者认识到，基于流域分析的水生态系统健康评价，不仅对流域现状进行了客观描述和评估，还有助于决策者确定流域管理活动，对流域自然资源的可持续利用及区域生态环境建设都具有非常重要的意义。

滇池流域为典型高原湖泊流域，以外海和草海为主要水体，以入湖河流水系为廊道，由高山坡地-洪积湖积平原-湖库斑块，组成了一个进水口多、出水口少的相对封闭的汇水区。滇池流域是云南省的政治、文化中心和交通枢纽，是云南省人口最稠密、社会经济最发达的地区。汇水区内包括昆明市和五华、盘龙、官渡、西山、晋宁、呈贡、嵩明七个县区的 30 个街道办事处、25 个乡镇，流域所提供的水资源和水环境，是昆明乃至云南省社

会和经济发展的基础。随着国民经济和社会迅速发展,人口快速增长和城市规模的不断扩大,流域水生态系统发生了很大的变化。昆明市依附于滇池得以不断地发展,且在相当长的一段时间内,其人口和经济增长依然会给滇池流域带来巨大的环境压力。一方面,人口的持续增长,将增加对滇池的用水需求,使得滇池生态用水持续减少,服务功能不断减退;另一方面,城市化进程的推进和人口的持续增长所带来的污染物和生活废水的排放,将继续加剧污染物对水环境的压力。

滇池流域所面临的水资源供需矛盾、湖泊富营养化和水生态系统不安全等问题,引起了管理部门的高度重视和社会各界的广泛关注,从而被列为全国重点治理的“三江三湖”之一。在科学技术部的“水体污染控制与治理科技重大专项”研究中,滇池流域亦作为“三河、三湖、一江、一库”里的重点项目,列为“十一五”和“十二五”国家重大水专项的研究对象。

本书基于国家重大水专项在滇池的研究成果,在全面详细分析滇池流域的水文、水质和水生态特征的基础上,对滇池流域的水生态系统健康进行多维评价,以期为滇池流域水生态系统的保护和恢复奠定基础,为集水文、水质、水生态于一体的流域综合管理提供技术支持。

本书作者主要来自北京大学环境科学与工程学院黄艺课题组。第1章概述流域水生态系统基本构成与健康评估框架,由黄艺和蔡佳亮撰写;第2章介绍了滇池流域的自然环境特征与社会经济情况,由蔡佳亮、曹晓峰、孙金华撰写;第3章总体上介绍了滇池流域水生生物群落特征,由高喆、曹晓峰、陈小勇、赵亚鹏撰写;第4章阐述了滇池流域水生态系统演变及其驱动力,由孙金华、曹晓峰、文航、苏玉、吕明姬、蔡佳亮、汪杰撰写;第5章阐述了滇池流域水生态系统类型和特征,由高喆、樊灏、蒋大林撰写;第6章在综述当前流域生态健康评估方法的基础上,提出了滇池流域水生态健康评估方法,由舒中亚、曹晓峰、黄艺撰写;第7章基于二级水生态功能分区对滇池流域水生态系统健康进行了具体评估,由高喆、樊灏、曹晓峰撰写;第8章基于流域不同的河段类型对滇池流域水生态系统健康进行了具体评估,由樊灏、曹晓峰、蒋大林、高喆撰写。全书由黄艺、曹晓峰主编定稿。

本书的写作与出版受“十一五”国家水体污染控制与治理科技重大专项-重点流域水生态功能一级二级分区研究(2008ZX07526-002)-滇池流域水生态功能一级二级分区研究(2008ZX07526-002-06)与“十二五”国家水体污染控制与治理科技重大专项-重点流域水生态功能三级四级分区研究(2012ZX07501-002)-滇池流域水生态功能三级四级分区研究(2012ZX07501-002-06)资助,并受昆明市环境监测中心、中国林业科学研究院西南生态研究中心和中国科学院昆明动物研究所提供支撑材料。在此,谨向参与本研究工作的所有专家学者、技术人员、研究生,以及给予本研究帮助、指导的单位和个人

人，表示诚挚的谢意！

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请学术界同仁与广大读者不吝批评赐教。

著 者
2016 年 12 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 流域水生态系统概念和内涵	1
1.2 流域水生态系统健康及其评价	4
1.3 滇池流域水生态系统健康评价框架	13

上篇 滇池流域水生态系统状态

第 2 章 滇池流域概况	17
2.1 流域社会经济特征	17
2.2 自然环境	20
第 3 章 滇池流域水生生物特征	41
3.1 藻类	41
3.2 浮游动物	48
3.3 浮游细菌	50
3.4 大型水生植物	59
3.5 底栖动物	61
3.6 鱼类	65
第 4 章 滇池流域水生态系统演变及驱动力	70
4.1 滇池流域水环境及其影响因子	70
4.2 滇池流域水生生物群落结构变化及其影响因子	88
第 5 章 滇池流域水生态系统类型和特征	96
5.1 流域水生态系统类型概述	96
5.2 湖泊流域水生态系统特征	97
5.3 水生态系统分类研究进展	98
5.4 滇池流域水生态系统分类原则	102
5.5 滇池流域水生态系统分类体系	103
5.6 滇池流域水生态系统类型特征	104

下篇 滇池流域水生态系统健康评估

第 6 章 滇池流域水生态健康评估方法	121
6.1 水质综合污染指数	121
6.2 生物完整性指数法	128

6.3 多指标健康综合指数法	149
第7章 滇池流域水生态功能区健康评估	160
7.1 流域健康综合评估结果	160
7.2 流域水生态功能分区健康评估结果	165
第8章 滇池流域河段类型及其健康评价	218
8.1 滇池流域河段类型划分	219
8.2 河段类型水生态健康评价结果	219
8.3 综合对比各河段类型健康评价结果	240
附录 滇池流域水生生物名录	243
健康评估汇总表	259
健康评估分项表	260
参考文献	265

第 1 章 概 述

流域作为一种特殊的区域，不仅以其丰富的水资源为人类提供饮用水、农田灌溉、航运交通和能源，还为千千万万的水生生物提供了栖息场所。流域水生态系统的结构和过程，是形成流域生态功能的基础。只有完整的水生态结构和过程，才能构成健康的流域。该章将通过阐述流域水生态系统的基本结构和过程，为滇池流域水生态健康评价提供基础。

1.1 流域水生态系统概念和内涵

流域（watershed）指由分水线所包围的集水区。根据容纳水体的不同，可分为河流流域（river basin）和湖泊流域（lake basin）。湖泊流域则是以入湖河流水系为廊道，以湖泊为容纳水体，由坡地-平原-湖库斑块所组成的空间联合体。完整的湖泊流域生态系统，包括水生态系统和陆地生态系统。陆地生态系统指湖泊流域集水区内陆地及陆生生物组成的生态系统；水生态系统指水生生物及其非生物环境组成的生态系统，其组成、结构和过程，决定了水生态系统的状态和功能。

1.1.1 流域水生态系统结构和组成

在流域中，陆地通过地表径流和地下水参与流域的水文过程。陆地上不同土地利用方式决定了地面径流中的物质组成，从而影响水生态系统中的水体理化性质（污染物种类和数量）和水生生物的生长发育与群落组成，进而改变水生态系统服务功能（图 1-1）。

水生态系统与其他生态系统相同，由水生生物和非生物环境两部分组成（图 1-2）。

在水生态系统的非生物环境组成中，地理环境在大尺度范围内决定了水生态系统的基本特征，是其他环境要素的基础。地理环境与地球的生物地理进化过程相关，受人为影响较少，是流域中的不可控制因素。水生态系统的非生物环境组成中的基质和介质，包括水、底质、河床和河岸所组成的水生态系统空间，它们既是水生态系统存在的关键因素，也是联系水域和陆地的重要纽带。水生态系统空间按其组成可划分为水体、河床和河岸带，其结构特征和物理状态，决定着水生态系统中生物栖息地的特征和状态，是水生态系统的重要组分。水量、水质、河流形态、河道和河岸带等水生态系统的基质和空间范围，是流域中容易受人类活动影响的因素。

水生态系统的水生生物组成主要指生活在水体中的浮游动植物和微生物、着生藻类、水生植物和鱼类，以及水域周围陆地和水陆交错带的其他生物。它们形成了水生态系统中包括生产者、消费者及分解者在内的完整营养结构，并通过食物链完成水生态系统中能流

和物质交换的过程，是水生态系统中的主要组分。水生态系统中的水生生物组成、结构和群体状态，是水生态系统中相关各部分综合作用的结果，其状态综合反映了水生态系统的健康程度。

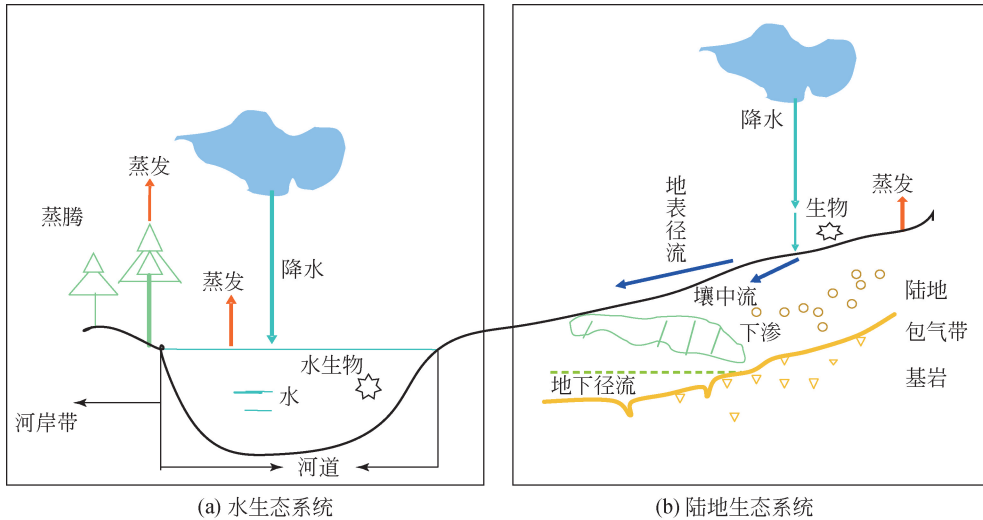


图 1-1 流域水生态系统

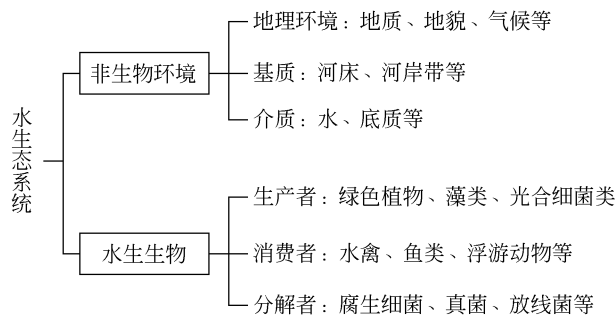


图 1-2 水生态系统组成要素

1.1.2 水生态系统过程分析

能量流动和物质循环是水生态系统的两个基本过程，它们使水生态系统中的非生物环境和水生生物结合成一个有机的整体（图 1-3）。

水生态系统中的地表水，通过蒸腾、水汽输送、地表径流和下渗等环节，在系统中进行着能量传递和水资源更新。与陆地生态系统不同，水生态系统内的能量主要来自地表水输入和大气沉降。地表径流携带陆地生态系统固定的能量输入到水生态系统，是水生态系统主要的能源和物质的来源。大气沉降包括干沉降和湿沉降，干沉降主要指悬浮于大气中的各种粒子以其自身速度沉降的过程，湿沉降主要指悬浮于大气中的各种粒子由于降水冲

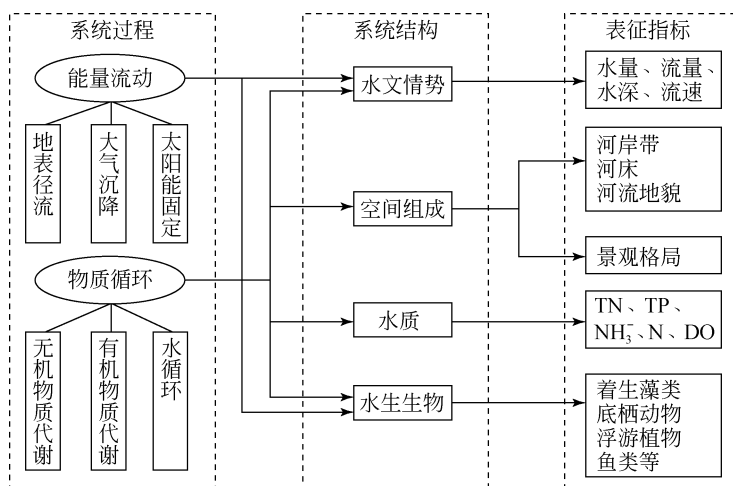


图 1-3 水生态系统过程

刷而沉降的过程。这两个过程以大气为媒介向水生态系统传递能量，只有少量的能量来自浮游植物和水生植物对太阳能的固定。地表水携带和大气沉降过程输入水生生态系统中的能量和物种，通过生物的食物链在水与生物中进行流动和循环。水生态系统的能量输入与转换的特点，使得相邻陆地生态系统可以通过改变能量输入的速度和强度，强烈地干扰其系统稳定性，即陆地生态系统的变化成为水生态系统变化的主要驱动因素。

水生态系统的各种有机物和无机物，以水为媒介完成物质从基质到生物体，再从生物体回到基质的循环。在这个周而复始过程中，水文过程是连接水生态系统中非生物环境与生物的重要纽带，它所提供的流量、流量是物质循环过程的基本保证。地表径流携带的营养，是水生生物生命活动的能量和物质基础，适当的流速和良好的水质为生物生境提供保障。河流形态、河床结构等构成的水生态系统空间，是生物之间食物链营养传递和水与生物之间物质代谢发生的场所。河流地貌是景观格局的组成之一，景观异质性是水生态系统水陆物质循环的重要保障。

在水生态系统中的分解者（微生物）通过降解陆地和大气输入的有机物，释放能量支持水生态系统的过程，提供无机物质以推动物质的循环；生产者主要指具有光合作用的绿色植物、浮游植物、着生藻类和浮游细菌等光能自养生物，是水生态系统能量部分来源；消费者是以其他生物为食的各种异养生物，主要包括鱼类、底栖动物、浮游动物等水生或两栖动物等。这些生物群落的完整性，决定了水生态系统的健康状态。

因此，充足的水量、自然的水域形态和稳定的近水域陆地环境，是水生态系统过程顺利进行的基本保障。而水生态系统中的这些非生物基质，作为水生生物生境的基础，为水生生物生存和繁衍提供基本栖息地，其变化将直接影响生物的数量、组成和生物多样性，进而影响水生态系统的健康状态。

1.1.3 水生态系统的结构和空间尺度

水生态系统的结构指系统内各组分通过一定的时空排列或营养关系所形成的结构层

次。水生态系统有两种方式表达其结构，一是形态结构，二是营养结构。形态结构指水生态系统中非生物环境特征及其空间格局，以及相应的生物种类、数量、群落组成结构。例如，土壤、水、地形环境等形成的复杂的环境梯度，在入湖河流上游山区地带，形成水流急、河水清洁的河流结构和相应的山地水生生物种群。在河流入湖口，形成河床平坦、水流平缓的河道及相应缓流水生生物种群。而湖体作为典型静水生态系统，则具有相应的静水生物。营养结构是以营养为连接桥梁，将生物与非生物连接起来的特征结构，它通过食物链交织而成的食物网在生态系统中传递物质和能量。

不同尺度水生态系统之间相互作用形成完整的水生态系统过程，即一个小尺度水生态系统是另一个更大尺度水生态系统的组成部分。一方面，小尺度水生态系统内部是一个整体，有着完整的生态系统过程；另一方面，小尺度与大尺度水生态系统之间又存在着输入-输出关系（董哲仁，2009）。例如，河流在流域内形成了不同级别的子流域。不同级别的子流域之间，通过河流在不同斑块之间进行能量和物质的输移，完成全流域生态过程。景观生态学中用斑块、廊道和基质定义特定尺度下的空间结构，不同空间内呈现出不同的结构和格局。以景观生态学为理论基础，湖泊流域就包括湖泊和河流水体，以及湖泊和河流水体直接交换的生态单元，具体包括河静水生态系统、流水生态系统、河岸湿地沼泽生态系统和河流陆地生态系统。河流廊道是整个流域水系尺度的一部分，流域内的水生态系统过程是河流廊道的一个外部环境。因为结构和空间格局的相识性，生态系统在一定的空间尺度下呈现出均一性和同质性。

根据流域的空间尺度效应和相关关系，在评价水生态系统健康时，可根据系统内部的同质性和系统之间的异质性，将流域划分为不同尺度的集水区独立单元，如湖泊流域水生态系统可划分为不同尺度的子流域系统，根据水生态功能的相似性和异质性，合并或区划为评价单元。

1.2 流域水生态系统健康及其评价

1.2.1 水生态系统健康的提出和发展

健康的生态系统是人类可持续发展的重要前提（Costanza et al., 1997）。生态系统健康这一概念产生于20世纪70年代全球生态系统普遍退化的背景下，始于人们对环境污染和生态破坏的关注。Rapport（1989）首次探讨了有关生态系统健康度量的问题，认为生态系统健康指生态系统所具有的稳定性和可持续性，即在时间上具有维持其组织机构、自我调节和对胁迫的恢复能力。虽然明确提出生态系统健康才20年，但生态系统健康内涵却在18世纪80年代就出现了，苏格兰生态学家James Hutton在1788年的文章中提到“地球是一个具有自我维持能力的超有机体”，并且提及了“自然的健康”。1941年，美国著名生态学家、土地伦理学家Aldo Leopold首先定义了土地健康（land health），并使用了“土地疾病”（land sickness）这一术语来描绘土地功能紊乱（dysfunction），并预见土地健康将发展成为一门学科，它的目的是“监测其生态学参数，以保证人类在利用土地的时候

不会使它丧失功能”(Leopold, 1941)。生态系统健康的概念来源于土地健康的概念,并逐渐转向生态系统健康研究。

目前国内外专家学者对生态系统健康的定义尚未形成一个较为统一的认识和标准。综合普遍认同的观点,生态系统健康的内涵可以诠释为以下两点:一是从生态系统结构和功能的稳定与可持续出发,认为健康的生态系统应该是能够维持组织结构和自治能力的系统,且对外界胁迫具有较好的恢复力。通过分析生态系统的活力(vigor)、组织结构(organization)和恢复力(resilience)等主要特征来判断生态系统的健康程度(Karr et al., 1986; Ulanowicz, 1986; Rapport, 1989; Costanza et al., 1992; Page, 1992)。二是从生态系统的生态服务功能的角度出发,认为健康的生态系统具有完整的服务功能,与人类社会和谐共存,共同发展。例如,健康的生态系统能够为人类提供足够的食物、饮用水、清洁空气,吸收或循环废弃物,以维持人类社会的可持续发展(O’Laughlin et al., 1994; Mageau et al., 1995; Bormann, 1996; Burger, 2000)。而生态系统健康研究的内涵则公认国际生态系统健康学会的定义,即生态系统健康为研究生态系统管理的预防性、诊断性和预兆性特征,以及生态系统健康与人类健康之间关系的一门综合的学科。

流域水生态健康的概念来自人们对河流健康的研究,主要是侧重于河流水质的评价。美国在20世纪70年代中提出了“河流健康”(Carr, 1999),并于1972年在水污染防治修订案中提出,《清洁水法》所设定的河流健康指水体的物理、化学和生物的完整性。随着研究的深入,人们逐渐认识到,仅对水质进行评价,并不能揭示损害河流健康的多方面因素,从而转向对河流生态系统的评价,并逐渐认识到,流域作为河流生态系统的外源影响因素,其气候、地质特征和土地利用状况等决定着流域内河流的径流、河道、基质类型等理化特征。一个健康的流域环境是维持一个健康的河流生态系统的前提,而健康的河流生态系统又是健康流域的基础。近年来,流域生态系统健康的研究日益受到人类的重视,国内外的生态学家已经开始着手从流域层次开展河流(湖泊)生态学的相关研究,强调流域的系统性及完整性,以流域为单元,建立水生态系统健康的评价体系。恢复流域水生态系统,从水生态系统健康的角度综合整治流域环境,已经成为流域开发的重要措施(龙笛, 2005)。

然而,由于河流和湖泊水体自身的动态特征,以及各个国家和地区自身地理条件、基本国情和自然价值观的差异,至今国际上对水生态健康的概念和内涵仍没达成共识。Costanza等(1992)认为,健康的流域水生态系统不一定是原始的生态系统,但它必须是一个相对完整的生态系统,具有复杂生境异质性特征,是稳定和可持续的,即随时间的进程有活力并且能维持其组织及自主性,在外界胁迫下容易恢复;Rapport(1992, 1998)则认为,健康的流域生态系统是远离流域生态系统危机综合征的。危机综合征主要表现为:初级生产力的下降(对流域内陆地生态系统而言)或增加(对流域内水生态系统而言)、营养的流失、生物多样性的丧失、关键种群的波动增强、生物结构的退化和疾病的广泛发生及严重性等。Schofield和Davies(1996)认为,水生态系统健康与相同类型未受干扰的水生态系统相似,Karr和Dudley(1981)也认为,应该将生态学的基本概念纳入水生态系统健康中,提出只要水生态系统当前的使用价值不退化且不对其他系统产生影响,虽其完整性有所破坏,该系统仍可认为是健康的;Meyer(1997)和Vugteveen等(2006)

认为,水生态系统健康应纳入生态标准和人类获得的服务功能,即健康的水生态系统是既能够维持系统结构和功能,也能满足人类与社会的需要和期望的水生态系统。在国内,龙笛(2005)将水生态系统健康的尺度扩展至流域健康上,认为流域决定河流,健康的水生态系统必须有一个健康的流域环境为背景,同时健康的水生态系统又是健康流域的基础。刘昌明和刘晓燕(2008)认为,立足于我国水生态系统的现状,健康的水生态系统应该在自然功能和社会功能上是和谐且均衡的。张晓萍等(1998)认为,流域健康是流域的这样一种特性,即可以自我持续发展,可以从各种不良的环境影响中自行恢复,其结构和环境功能达到相对最佳稳定状态,在自然条件下,健康的流域总是从一种原始状态向生物种类多样化、结构复杂化和功能完善化的状态发展。

总结国内外学者对流域生态系统健康的理解,本研究认为健康的流域水生态系统应该:①对流域进化过程中遇到的正常干扰(如污染、洪水、干旱、火灾等)具有一定恢复力;②远离流域生态系统危机综合征;③能自我维持,即在没有外部输入时能存在;④管理实践和生态系统过程不损害邻近生态系统;⑤经济上可行,能够提供合乎自然和人类需求的生态服务(Rapport, 1995; Harwall et al., 1999)。其水生态系统在时间和空间的变化过程中能够保持其完整的结构和功能,能够满足人类日益增长的物质需求,对人类的干扰具有良好的缓冲能力和恢复能力,具有较高的可持续服务功能。

1.2.2 水生态系统健康评价概念和内涵

水生态系统健康评价起始于河流系统评价。在河流系统评价的发展初级阶段,主要将评价指标局限在物理-化学性质上,通过测定一系列水体理化指标,如pH、硬度、阳离子含量等。环境管理相关监督则对水体的物化指标进行管理。随着评价体系的逐渐完善,大多数欧洲国家将《水框架指令》(Water Frame Directive)纳入环境政策,而水框架指令体系就是将水量、水质和水生态系统进行一体化管理;美国则形成自己的管理体系,逐渐从水体的物理、化学指标扩展到生物完整性现状,大多数的水体评估项目将评价体系扩展到水生态系统健康和修复的生物、物理和化学等多个方面,以支持河流环境管理策略。

水生态系统健康及其评价的研究一直是应用生态学研究的重点领域,水生态系统健康的标准界定和评价方法也有较快的发展。但是,大部分的研究都集中在水生态系统健康评价及其方法的探讨方面,而如何将水生态系统健康评价作为一种工具,为制定水生态系统管理计划策略提供技术支持,这样成功的案例并不多。同时,在水生态系统健康状态评价基础上,准确甄别受损因子并对其程度分级,是制定水生态保护管理计划不可缺少的步骤。但在微观层面的类似分析方法并不成熟。所以,在水生态系统管理的层面,建立一个完整的水生态系统分析框架和评价方法,快速评价水生态系统的健康,且对退化水生态系统能准确甄别其受损因子和受损程度,为制定水生态系统管理计划提供全面的技术支持,是流域水生态系统健康管理的重要基础。

因此,本研究定义水生态系统健康评价就是从生态系统的角度,按照一定的评价标准和方法,对一定区域范围内的水生态系统稳定性和功能进行客观的定性和定量调查分析、评价与预测。水生态系统健康评价实质上是对水生态系统状态的优与劣的评定过程,该过

程包括评价因子的确定、水生态监测、评价标准、评价方法、驱动因子识别。

1.2.3 流域水生态系统健康评价方法综述

近 20 年来，以河流健康评价为典型代表的流域水生态评价方法学不断发展，形成了一系列各具特色的评价方法（表 1-1）。从评价原理可将这些评价方法分为预测模型法、单指标评价法和多指标评价法。

表 1-1 国际上主要的河流健康状况评价方法（吴阿娜等，2005）

类型	评价方法	主要设计者	内容简介	特点
预测模型法	RIVPACS (Wright et al. , 2000)	Wright J F	利用区域特征预测河流自然状况下应存在的大型无脊椎动物，并将预测值与该河流大型无脊椎动物的实际监测值相比较，从而评价河流健康状况	能较为精确地预测某地理论上应该存在的生物量；但该方法基于河流任何变化都会影响大型无脊椎动物这一假设，具有一定的片面性
	AUSRIVAS (Hart et al. , 2001)	Simpson J C 和 Norris R N	针对澳大利亚河流特点，在评价数据的采集和分析方面对 RIVPACS 方法进行了修改，使得模型能够广泛用于澳大利亚河流健康状况的评价	能预测河流理论上应该存在的生物量，结果易于被管理者理解；但该方法仅考虑了大型无脊椎动物，并且未能将水质及生境退化与生物条件相联系
单指标评价法	IBI (Karr, 1981)	Karr J R	着眼于水域生物群落结构和功能，用 12 项指标（河流鱼类物种丰富度、指示种类别、营养类型等）评价河流健康状况	包含一系列对环境状况改变较敏感的指标，从而对所研究河流的健康状况做出全面评价；但对分析人员专业性要求较高
多指标评价法	RCE (Petersen, 1992)	Petersen R C	用于快速评价农业地区河流状况，包括河岸带完整性、河道宽/深结构、河岸结构、河床条件、水生植被、鱼类等 16 个指标，将河流健康状况划分为 5 个等级	能够在短时间内快速评价河流的健康状况；但该方法主要适用于农业地区，如用于评价城市化地区河流的健康状况，则需要进行一定程度的改进
	ISC (Ladson and White, 1999)	Ladson A R	构建了基于河流水文学、形态特征、河岸带状况、水质及水生生物 5 方面的指标体系，将每条河流的每项指标与参照点对比评分，总分作为评价的综合指数	将河流状态的主要表征因子融合在一起，能够对河流进行长期的评价，从而为科学管理提供指导；但缺乏对单个指标相应变化的反映，参考河段的选择较为主观
	RHS (Raven, 1998)	Raven P J	通过调查背景信息、河道数据、沉积物特征、植被类型、河岸侵蚀、河岸带特征及土地利用等指标来评价河流生境的自然特征和质量	较好地生境指标与河流形态、生物组成相联系；但选用的某些指标与生物的内在联系未能明确，部分用于评价的数据以定性为主，使得数理统计较为困难
	RHP (Rowntree and Ziervogel, 1999)	Rowntree K M	选用河流无脊椎动物、鱼类、河岸植被、生境完整性、水质、水文、形态 7 类指标评价河流的健康状况	较好地运用生物群落指标来表征河流系统对各种外界干扰的响应；但在实际应用中，部分指标的获取存在一定困难

(1) 预测模型法

预测模型法假定水生态系统的任何变化都会反映在某个单一物种上，以这个单一物种对水生态系统健康状况进行评价。典型预测模型法为英国的河流无脊椎动物预测和分类系统（river in vertebrate prediction and classification system, RIVPACS）和澳大利亚河流评价计划（Australian river assessment scheme, AusRivAS）。该方法首先选择参照点（reference sites）或最小干扰点；其次，通过比较参照点与干扰点的单一物种组成来评价水生态系统健康，以此建立环境特征和生物特征的经验模型；最后，通过比较测量点生物组成的实际值（ O ）与模型预测值（ E ），即 O/E 值，确定评价结果（图 1-4）。 O/E 值范围为 0~1，越接近 1 说明该测量点健康状况越好。

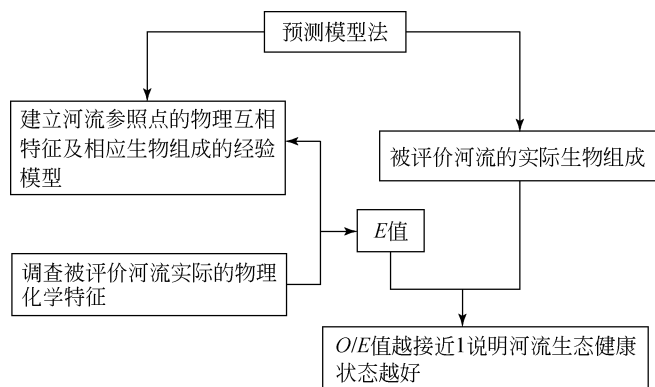


图 1-4 预测模型法原理

(2) 单指标评价法

单指数评价法，又叫指示物种法。主要是依据河流中的关键物种、特有物种、濒危物种、长寿命物种和环境敏感物种等的数量、生物量、生产力、结构指示、功能指示及其一些生理生态指标等，描述生态系统的健康状况。利用选取的指示物种（类群）的结构和数量等要素的变化与河流的退化程度之间的联系，评价河流系统的健康程度，为水域系统的管理提供技术支持。

不同的生物在水生态系统内具有不同的生态特征和时空尺度，因此，应根据具体地区情况选择生物进行评价。鱼类指标由于其能够在不同空间范围内对环境影响进行表征，已被广泛运用。英国莱茵河拯救项目（The Rhine Action Programme）通过分析莱茵河中鱼类的生存和繁殖受表征河流健康的主要指标，如溶解氧、流量和河道形式等，对鱼类在河流中的生存和繁殖存在一定影响，将远距离迁移鱼类作为莱茵河的河流健康评价和生态修复主要标志，大西洋大马哈鱼是常用的指示鱼种（Raaijmakers, 2001；Neumann, 2002）。大马哈鱼在莱茵河的迁徙，以及再度成功的自然繁殖被认为是该河流健康逐渐恢复的重要指标；同时根据大马哈鱼的习性和产卵地区，将莱茵河的汇水区域全都纳入河流管理及修复范围。法国水利部门把鱼类列为可在全国范围内使用的指标，因为其可以说明河流地理、生态和特定地区的具体情况之间的相对重要性（Thierry et al., 2001）。同时也因为：①鱼类在很多水体中都广泛存在；②鱼类的分类、生态需求和生命周期都比其他综合指标（大型无脊

椎动物和着生藻类等)更明确;③鱼类具有不同层次的营养水平;④鱼类具有经济和美学价值,同时有助于提高保护水生态环境的意识。许多生物指数方法也是基于鱼类物种建立起来的。

生物完整性指数(the index of biotic integrity, IBI)(Karr, 1981)通过测定鱼类种群的特征来评价鱼类的生境状况,进而评价河流健康状况。IBI包含河流鱼类物种丰富度、指示种类别、营养类型、鱼类数量等12项指标,由于其具备以下特征:①将河流的结构和功能整合;②在生态上具有十分广泛的意义;③灵活性强且应用广泛;④相对健全;⑤被广泛用于环境管理(Yeom and Adams, 2007),被用于美国中西部河流的健康状况评价中。鱼类集合体完整性指数(fish assemblage integrity index, FAII)则是建立在鱼类群落耐污性差异基础上的河流健康评价方法(Kleynhans, 1999)。

鱼类健康指数(the health assessment index, HAI)是另外一种指示物评价的数学方法,其能够通过鱼类种群数量评价河流健康状况(Goede and Barton, 1990)。这种方法通过比较不同鱼类物种之间的数量差异,能够迅速、简便及廉价地用于相关评价方面(Adams et al., 1993)。基于罗马尼亚境内多瑙河流域区段建立的预备综合指标(preliminary multimetric indices, PMI)不需要鱼类物种的种数丰富度这一参数(Paul and Grigore, 2004)。

除此之外,还有在IBI基础上进行改进的水生态健康指数(an aquatic ecosystem health index, AEHI)(Yeom and Adams, 2007)和基于主成分分析的多元计量评分(multivariate condition score, MCS)(Kevin, 2009),这些评价指数都存在选取目标物种、选取参考点、进行相应数学统计和等级评分划分的一个过程,进而达到对水生态系统健康进行评估的目的。

河流无脊椎动物也被广泛用于水生态健康评价研究中,主要因为其具有如下优点:①生活史相对稳定;②对外界干扰的敏感性较强;③分布较广;④有一定的生命周期,能够反映水体阶段性的变化;⑤有较高的生态多样性;⑥相对容易辨别。被广泛接受的基于水体无脊椎动物的河流健康评价有河流无脊椎动物预测和分类系统,澳大利亚河流评价计划,南非计分系统(South African scoring system, SASS)(Chutter, 1998)和营养完全指数(index of trophic completeness, ITC)(Pavluk et al., 2000)。

除鱼类、无脊椎底栖动物外,有学者开始研究将浮游微生物和底栖微生物纳入指示生物指标体系中,但由于这种方法对技术要求较高,要在短时间内进行普遍应用和接受仍存在一定难度。

在国外,指示物种指标之所以被广泛运用,不仅仅是因为指示物种指标相对简单,步骤清晰,同时也是因为国外在水体环境的研究中,更侧重于水体生态系统的研究。例如,Karr(1981)利用鱼类种群特征来判断鱼类生境而提出生物完整性指数。Kleynhans(1999)基于鱼类的食物耐受性、栖息地偏好性、水量需求等的差异而集聚在不同生境片段的特征,提出鱼类集合体完整性指数。刘明典等(2010)基于IBI评价河流生态系统的原理,建立了适合长江中上游干流及附属湖泊的鱼类指标体系。Kerans和Karr(1994)在评价美国田纳西州河流健康的实践中提出底栖动物完整性指数(benthic-index of biological integrative, B-IBI),共包括13个指标。中国自20世纪70年代开始应用大型底栖无脊椎动