



水体污染控制与治理科技重大专项

中国重点流域水生生态系统 健康评价

张远 江源等 / 著



科学出版社



水体污染控制与治理科技重大专项

中国重点流域水生态系统 健康评价

张远 江源等/著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书在总结国内外水生态系统健康评价的基础上,系统介绍适合我国流域水生态系统健康综合评价的体系框架与技术方法,重点阐述了水生态系统健康综合评价的技术步骤及方法,并以全国及松花江、辽河、海河、淮河、黑河、东江、太湖、巢湖、滇池、洱海十大重点流域为对象,开展流域水生态系统健康综合评价的技术应用示范,为全国水生态系统健康评价工作的开展提供技术支撑。

本书可供从事水环境和水生态系统管理的科研人员、相关政府管理部门工作人员以及环境科学、生态学等专业的本科生和研究生参考。

审图号:GS(2019)2398号

图书在版编目(CIP)数据

中国重点流域水生态系统健康评价 / 张远等著. —北京:科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061383-7

I. ①中… II. ①张… III. ①流域-水环境质量评价-中国 IV. ①X824
中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第099973号

责任编辑:周 杰 / 责任校对:彭 涛

责任印制:肖 兴 / 封面设计:黄华斌

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年6月第一次印刷 印张:15

字数:360 000

定价:180.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书撰写组名单

主 笔：张 远 江 源

副主笔：(按姓氏拼音排序)

安树青 蔡庆华 陈利顶 高俊峰

黄 艺 王世岩 周启星

成 员：(按姓氏拼音排序)

曹晓峰 程 先 程东升 丁 佼

丁 森 董满宇 高 欣 高 喆

高永年 何逢志 胡 金 黄 琪

贾晓波 李凤祥 林佳宁 刘 畅

马淑芹 渠晓东 孙美琴 孙然好

万 云 于宏兵 张志明 赵 茜

前 言

随着社会发展和人口增长,我国淡水生态系统呈现严重退化趋势,淡水生物的生存条件不断恶化,水生生物数量不断下降。目前我国对河流、湖泊等水体的管理还主要停留在传统的水污染控制方面,水环境管理需要从传统的污染控制向水生态系统健康管理转变。我国的流域水生态系统健康评价工作起步较晚,水生态系统健康评价研究相对滞后,本书在借鉴国内外水生态系统健康评价先进技术方法的基础上,综合考虑中国河流的实际情况,提出适合我国国情的流域水生态系统健康综合评价体系框架,系统阐述流域水生态系统健康综合评价的关键技术。以全国和松花江、辽河、海河、淮河、黑河、东江、太湖、巢湖、滇池、洱海十大重点流域为例,详细介绍了各流域水生态系统健康评价的技术步骤及评价结果,为全国流域水生态系统健康评价工作的开展提供技术支撑。

本书撰写工作由张远和江源主持。全书共5章。第1章由张远、丁森、贾晓波完成,介绍流域水生态系统健康评价研究历程及国内外流域水生态系统健康评价的研究进展;第2章由张远、丁森、高欣、马淑芹完成,介绍流域水生态系统健康综合评价的框架体系及关键技术步骤;第3章由张远、江源、高俊峰、周启星、陈利顶、安树青、王世岩、黄艺、蔡庆华、曹晓峰、程先、程东升、丁佼、董满宇、高喆、高永年、何逢志、胡金、黄琪、李凤祥、刘畅、孙美琴、孙然好、万云、于宏兵、张志明、赵茜等完成,介绍松花江、辽河、海河、淮河、黑河、东江、太湖、巢湖、滇池、洱海十大重点流域的水生态系统健康评价技术步骤及评价结果;第4章由张远、丁森、高欣、林佳宁、渠晓东完成,介绍全国流域水生态系统健康总体评价结果;第5章由张远、丁森、林佳宁、马淑芹完成,对我国流域水生态系统健康评价进行总结和展望。最后由张远完成对全书的统稿和校对工作。

本书由国家水体污染控制与治理科技重大专项“流域水生态功能评价与分区技术”(2008ZX07526-001)课题、“流域水生态保护目标制定技术研究”(2012ZX07501-001)课题、“重点流域水生态一级二级分区研究”(2008ZX07526-002)课题、“重点流域水生态功能三级四级分区研究”(2012ZX07501-002)课题资助。其中,水生态健康评价方法由中国环境科学研究院组织完成,松花江流域水生态调查与健康评价由南开大学组织完成,辽河流域水生态调查与健康评价由中国环境科学研究院组织完成,海河流域水生态调查与健康评价由中国科学院生态环境研究中心组织完成,淮河流域水生态调查与健康评价由南京大学组织完成,黑河流域水生态调查与健康评价由中国水利水电科学研究院组织完成,东江流域水生态调查与健康评价由北京师范大学组织完成,太湖和巢湖流域水生态调查与

健康评价由中国科学院南京地理与湖泊研究所组织完成，滇池流域水生态调查与健康评价由北京大学组织完成，洱海流域水生态调查与健康评价由中国科学院水生生物研究所组织完成。

书中每一项成果都凝聚了众多科研人员的劳动，尤其感谢在课题研究和文稿编辑过程中付出劳动而在本书中未提及的工作者。由于本书研究内容涉及学科众多，加之受时间、写作水平等因素所限，书中难免有不妥之处，恳请读者指正。

著者

2018年12月

前言	
第 1 章 流域水生态系统健康评价研究概况	1
1.1 流域管理对水生态系统健康评价的重大需求	1
1.2 流域水生态系统健康评价研究历程	2
1.2.1 流域水生态系统健康评价的总体发展历程	2
1.2.2 国外流域水生态系统健康评价的主要进展	3
1.2.3 中国流域水生态系统健康评价的进展	7
1.3 流域水生态系统健康评价研究现状	8
1.3.1 流域水生态系统健康评价常用指标	8
1.3.2 流域水生态系统健康评价方法	10
第 2 章 流域水生态系统健康评价技术方法	12
2.1 综合评价体系框架的建立与完善	12
2.2 关键技术步骤	13
2.2.1 水体类型划分	13
2.2.2 概念模型建立	14
2.2.3 评价指标筛选	14
2.2.4 评价指标参照值和临界值确定	21
2.2.5 评价指标标准化	25
2.2.6 综合得分计算	25
2.2.7 健康等级划分	27
2.3 流域健康报告卡制作	28
2.3.1 报告卡制作目的	28
2.3.2 流域健康报告卡制作步骤与格式	28
2.4 小结	30
第 3 章 十大重点流域水生态系统健康评价	32
3.1 松花江流域水生态系统健康评价	32
3.1.1 流域基本概况	32
3.1.2 评价数据来源	33
3.1.3 评价方法	37
3.1.4 评价结果	38
3.1.5 问题分析与建议	45

3.2	辽河流域水生态系统健康评价	48
3.2.1	流域基本概况	48
3.2.2	评价数据来源	49
3.2.3	评价方法	54
3.2.4	评价结果	55
3.2.5	问题分析与建议	63
3.3	海河流域水生态系统健康评价	64
3.3.1	流域基本概况	64
3.3.2	评价数据来源	65
3.3.3	评价方法	69
3.3.4	评价结果	70
3.3.5	问题分析与建议	77
3.4	淮河流域水生态系统健康评价	78
3.4.1	流域基本概况	78
3.4.2	评价数据来源	79
3.4.3	评价方法	83
3.4.4	评价结果	84
3.4.5	问题分析与建议	90
3.5	黑河流域水生态系统健康评价	91
3.5.1	流域基本概况	91
3.5.2	评价数据来源	92
3.5.3	评价方法	93
3.5.4	评价结果	94
3.5.5	问题分析与建议	105
3.6	东江流域水生态系统健康评价	106
3.6.1	流域基本概况	106
3.6.2	评价数据来源	108
3.6.3	评价方法	111
3.6.4	评价结果	112
3.6.5	问题分析与建议	119
3.7	太湖流域水生态系统健康评价	120
3.7.1	流域基本概况	120
3.7.2	评价数据来源	123
3.7.3	评价方法	127
3.7.4	评价结果	128
3.7.5	问题分析与建议	140
3.8	巢湖流域水生态系统健康评价	141
3.8.1	流域基本概况	141
3.8.2	评价数据来源	143

3.8.3	评价方法	146
3.8.4	评价结果	148
3.8.5	问题分析与建议	160
3.9	滇池流域水生态系统健康评价	161
3.9.1	流域基本概况	161
3.9.2	评价数据来源	162
3.9.3	评价方法	166
3.9.4	评价结果	167
3.9.5	问题分析与建议	187
3.10	洱海流域水生态系统健康评价	188
3.10.1	流域基本概况	188
3.10.2	评价数据来源	191
3.10.3	评价方法	195
3.10.4	评价结果	196
3.10.5	问题分析与建议	213
第4章	中国流域水生态系统健康总体评价	215
4.1	全国流域水生态系统健康评价结果	216
4.1.1	基本水体理化评价结果	216
4.1.2	营养盐评价结果	217
4.1.3	藻类评价结果	217
4.1.4	大型底栖动物评价结果	218
4.1.5	鱼类评价结果	218
4.1.6	综合评价结果	219
4.2	小结	220
第5章	中国流域水生态系统健康评价研究展望	221
5.1	流域水生态系统健康评价研究中存在的问题	221
5.1.1	流域水生态系统健康评价体系尚不完整	221
5.1.2	流域水生态系统健康评价方法仍需优化完善	221
5.1.3	流域水生态系统健康评价与实际管理衔接仍有难度	222
5.2	流域水生态系统健康评价研究展望	222
参考文献	224

流域水生态系统健康评价研究概况

1.1 流域管理对水生态系统健康评价的重大需求

全世界淡水生态系统在近一个世纪发生了巨大变化，广泛的水体污染和栖息地丧失导致众多水生生物生存受到威胁 (Vorosmarty et al., 2010)。全球 964 种水鸟中有 203 种 (21%) 现已灭绝或处于受危状态，此外 37% 的淡水哺乳动物、20% 的淡水鱼类、43% 的两栖动物、50% 的淡水龟类以及 43% 的鳄鱼都已处于受危、濒危或灭绝状态 (MEA, 2005)。我国淡水生物也表现出严重的退化趋势，以长江为例，“四大家鱼”鱼苗量急剧下降，由 20 世纪 50 年代的 300 多亿尾降为目前的不足 1 亿尾，上游的金沙江目前也仅能监测到历史上 143 种鱼类中的 17 种，其中还包括 3 种外来种，濒危物种白鱘豚已经消失多年，江豚和中华鲟等物种也岌岌可危。这一情况在我国其他河流、湖泊都较为普遍，淡水生物所受到的威胁和破坏是前所未有的。究其原因，人口增长和经济发展加快两大因素是导致江河、湖泊中水生生物数量锐减的主要间接驱动力，而导致水生态系统退化的主要直接驱动力则包括基础设施过度开发、土地围垦、污染、过度捕捞以及外来物种的引入等 (Dudgeon et al., 2006)。

随着淡水生物生存条件的恶化，河流、湖泊处于何种状态逐渐受到关注，由此流域健康的概念应运而生。美国《清洁水法》(Clean Water Act) 将流域健康定义为水体能够恢复和保持其化学、物理和生物完整性 (Karr, 1999)。尽管目前对流域健康的定义还没有达成共识，但大多数学者都认为流域健康应包括两方面的内容：一方面水体需要维持自身的生存，即流域水生态系统结构与功能的完整性；另一方面水体可以为人类提供服务，即流域社会服务功能的实现。流域健康概念的不断发展，也反映出人类改善流域水生态系统状态的迫切愿望以及在流域管理中所面对的问题，它要求人类能够对流域水生态系统健康状态做出评价。流域水生态系统健康评价是联系水生态系统研究与管理决策的关键环节，其目的是全面认识水生态系统的现状与变化趋势，用通俗易懂的方式向决策者和公众提供生态信息，以减少或消除水生态系统管理的不科学性，并以此为基础开展水体生态修复与恢复，以实现流域水生态系统的可持续发展。

20 多年来，流域健康评价已在很多国家先后开展，取得了很好的实践经验。为了达到《清洁水法》规定的水质目标，美国环境部门在过去 20 多年逐步发展形成了涵盖整个流域，包括水文、化学、生物等多重指标在内的全国性流域健康综合评价体系，并将其纳入了水质管理的法律和行政框架中，以保证国家和各州可以统一开展流域健康评价。在过去仅考虑水化学指标的基础上，该体系融入了更多体现水生生物状态的指标，为水环境保护和水生态系统恢复提供了有力支持。欧盟对水资源的管理也经历了从单一化到一体化的发展阶段。2000 年《水框架指令》(Water Framework Directive, WFD) 颁布，其中第 5 条规

定各成员国应对其境内的每个流域或部分国际流域开展评估与分析，把流域现状评估作为流域规划的起点。为了使各成员国可以对水体监测和评价结果更好地衔接，《水框架指令》也明确要求从水生生物、水文、物理化学要素方面设定评价标准，并统一规定将水体健康划分5个等级。

针对我国近年来水生生物数量的不断下降，2010年环境保护部会同20多个部门和单位编制了《中国生物多样性保护战略与行动计划（2011—2030年）》，要求开展河流湿地水生生物资源调查与评估，制订流域生物多样性保护规划。如何在客观评价过去30年我国水生态系统变化的基础上，总结其保护的利弊得失和经验教训，是当前的基本任务。目前我国对河流、湖泊等水体的管理还主要停留在水化学指标上，主要依据《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）进行水体评价和管理。尽管流域水生态系统健康的管理理念逐渐被接受，以水生生物为核心的评价体系依旧无法取代单一的水化学指标评价。其原因一方面是我国的流域水生态系统健康评价工作起步较晚，缺少以水生生物为核心的综合评价体系的研究；另一方面由于之前对流域水生态系统的重视程度不足，缺少全国、流域等尺度上长期的数据积累。

为缓解我国流域水生态系统逐渐退化的状况，构建我国以水生态系统健康为核心的水质目标管理技术体系，国家水体污染控制与治理科技重大专项（简称“水专项”）设立了“流域水污染防治监控预警技术与综合示范”主题，提出要构建适合我国的流域水生态系统健康评价技术体系，并在全国十大重点流域进行应用示范，从而全面掌握我国流域水生态系统健康总体状况，识别已发生退化的水生生物及其原因，进而开展生态修复、物种保护等管理工作，为实现我国流域水生态系统健康的宏伟战略目标提供有力支撑。

1.2 流域水生态系统健康评价研究历程

1.2.1 流域水生态系统健康评价的总体发展历程

近年来，受污染水体已越来越被公众重视，简单的物理或化学指标水体监测并不能反映更多的生态信息，而水生生物可以反映更长期的污染特征、难以监测分析的污染物的影响以及综合影响等信息。早在19世纪，Nylander（1866）就肯定了地衣对城市环境变化的敏感性。此后，这种利用生物指标进行生态系统评价的方法被引入水生态系统健康评价之中。纵观流域水生态系统健康评价发展历程，大体可以分为3个阶段。

第一阶段主要是利用水生生物的生物学和生态学属性信息进行水体评价。20世纪初期，德国学者首先提出了“污水生物系统”（saprobien system），这是人们最早利用水生生物对河流有机污染的敏感性进行水体评价。其理论基础是，河流受到有机物污染后，在污染源下游的一段流程里，会发生自净，即随河水污染程度的逐渐减轻，生物种类也会发生变化，在不同的河段出现不同的生物种类。据此，可将河流依次划为4个带：多污带、 α -中污带、 β -中污带（即甲型、乙型中污带）和寡污带，每个带都有各自的物理、化学和生物特征。50年代以后，一些学者经过深入研究，补充了污染带的种类名录，增加了指示种的生理学和生态学描述（Liebmann, 1951；Sladeczek, 1967）。1964年，日本学者津田松苗编制了一个污水生物系统各带的化学和生物特征表，这一水体健康评价

方法主要在中欧和东欧应用较多。但随着对水体生物认识的不断深入,在清洁的水体中也会发现存在着耐污性物种,而污染严重的水体中也会出现敏感性生物。生物种类的分布又受到地区和各种环境因素的限制,因此对于利用污水生物系统指示水体污染状况的可靠性,尚存分歧。

此后,利用生物指数计算、模型分析等数理统计手段成为主流,这是水体健康评价的第二阶段。随着20世纪六七十年代统计分析方法的不断进步,涌现出了大量的水生生物评价指数,如生物指数(biotic indices, BI)、香农-威纳多样性指数(Shannon-Wiener diversity index)等。这些生物评价指数有别于之前利用水生生物物种生态属性的评价方法,而是更多地考虑了水生生物群落结构与功能特征。自20世纪80年代以后,水体评价从单一生物指数逐渐向多参数或综合参数的生物指数过渡。Karr(1981)在运用大量生物参数的基础上开发了一种新的复合指数,即生物完整性指数(index of biological integrity, IBI)。这个指数拥有很强的适用性,在世界范围内的各种水体都有所应用,还有很多类似的复合指数,如鱼类集聚完整性指数(fish assemblage integrity index, FAII)(Kleynhans, 1999)、营养完全指数(index of trophic completeness, ITC)等。同时,人们逐渐认识到河流生物群落具有整合不同时间尺度上各种化学、生物和物理影响的能力,生物群落的结构和功能能够反映诸如化学品污染、物理生境丧失、外来物种入侵、水资源过量消耗、河岸带植被过度采伐等干扰压力,水生生物也成为流域健康评价的核心内容。由此以水生生物要素为核心,综合考虑水文、水化学、物理生境、景观等要素的流域综合评价方法逐步形成并完善。美国、英国、澳大利亚、南非都在此方面开展了颇具代表性的流域健康评价工作。水生态系统综合评价是目前较为科学、成熟的评价方法,许多国家都将其纳入流域管理中。此外,基于数理统计模型的水体评价方法在此过程中也取得了长足的发展,其中以英国的RIVPACS(river invertebrate prediction and classification system)(Wright et al., 1998)和澳大利亚的AUSRIVAS(Australian river assessment system)(Smith et al., 1999)最为典型。

第三阶段则是依靠于当前不断发展的各类生物新技术、新手段、新方法等,从水生生物个体生理、分子水平去评价水生态系统的健康状况。例如,通过分析水体及水生生物体内含污量、关键生理指标活力水平进行水体环境评价,这在鱼类、大型底栖动物方面的研究较多。此外也有通过分析水体环境中DNA^①(environmental DNA, EDNA)反映的生物信息,对河流进行健康评价(Ray, 2014)。目前这一研究方向刚刚起步,在评价指标、评价标准等许多方面还需要不断完善。

1.2.2 国外流域水生态系统健康评价的主要进展

近年来,社会、经济和河流环境的和谐与可持续发展已成为全球的一个热点,很多国家都尝试去寻找一些既可维持河流生态服务功能又可修复受损系统的方法,其中比较有代表性的国家有美国、英国、澳大利亚和南非。

^① DNA为deoxyribonucleic acid的缩写,中文名称为脱氧核糖核酸。

(1) 美国的流域水生态系统健康评价

美国《清洁水法》的目标之一就是要保护河流物理、化学和生物的完整性。美国从政府层面上执行了“健康流域项目”(Healthy Watersheds Program)以保护水生态系统。其中,流域水生态系统健康综合评价是该项目的重要内容之一,这是一个建立在流域景观状况、栖息地、水文、地貌、水质、生物状况和脆弱性等不同生态评价要素基础上的综合评价体系。在国家层面上美国政府制订的相关评价体系还包括“流域生态状况评价框架”“具有森林服务功能的流域状况评价框架”“流域恢复潜力评价框架”“人类活动干扰对鱼类栖息地影响评价框架”等,这些都为了解水生态系统健康状况提供了基础。在州层面,每个州又建立了各自的流域水生态系统健康评价框架。每个州在评价体系中都将水生生物作为核心考虑的内容。以明尼苏达州和弗吉尼亚州为例,前者从水生生物、联通性、地理形态、水文和水质五方面建立了流域水生态系统健康评价框架,后者则从景观格局、水生生物、栖息地、地理形态、水源保护区等方面进行了流域水生态系统健康评价。

美国最初采用的河流生物评价采样方法是相对简单的指示生物法和单一指数法。这些方法采用的参数较少,每个生物参数只对特定干扰的反应敏感,单独的参数只能对一定范围的干扰有响应,并不能准确和完整地反映出整个水生态系统的健康状况。20世纪80年代,Karr(1981)提出了由12个量度指标组成的IBI指数,包括物种丰度、营养成分、指示种类别(耐污种及非耐污种)、个体数量、疾病情况等。具体采用的指标需要根据监测水体的特定情况进行取舍。IBI方法已被应用于着生藻类、浮游生物、大型底栖动物、鱼类、大型水生植物等相关评价研究中。美国政府为了统一水生生物评价标准,于1989年提出了旨在为全国水质管理提供基础水生生物数据的快速生物监测协议(Rapid Bioassessment Protocols, RBPs),经过近10年的发展和完善,美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, U. S. EPA)于1999年推出新版的RBPs,给出新的快速生物监测协议。该协议提供了溪流或可涉水河流着生藻类、大型底栖动物、鱼类的监测及评价方法(Barbour et al., 1999)。基于此U. S. EPA组织各州在2004~2005年开展了“涉水溪流评价项目”(Wadeable Streams Assessment, WSA),这是第一次将此技术方法应用于实践。此后,为了对大江大河等不可涉水河流进行统一的水生生物调查与评价,U. S. EPA于2006年制订了《不可涉水河流生物评价手册》(Flotemersch et al., 2006)。2008~2009年,美国将溪流健康评价与大江大河健康评价进行了合并,统一为“国家河流与溪流评价项目”(National Rivers and Streams Assessment, NRSA)。目前已经完成了第二期的河流评价(2013~2014年)工作。除了河流之外,美国还制订了《国家湖泊评价的野外工作手册》,并分别于2007年、2012年和2017年开展了“全国湖泊评价”(National Lakes Assessment, NLA)工作。

(2) 英国及欧盟的流域水生态系统健康评价

20世纪70年代初,英国河流管理者为了解河流健康状况制订了为期4年的“水生生物监测计划”,主要针对河流中大型底栖动物开展调查与评价。从1990年起,英国环境署为科学评价水体状况,建立包括水化学、水生生物、营养盐和美学感官等要素的评价方法体系(General Quality Assessment, GQA)。其中,GQA体系中关注的水生生物主要是大型底栖动物,这些工作加之70年代初开展的河流监测为后续基于大型底栖动物建立RIVPACS模型的评价方法提供了数据基础。GQA体系将水体健康状况分为6个等级,在

英国环境署的提倡下一直到 2009 年还在应用,但目前已统一采用欧盟 WFD 的 5 级评价体系。

英国关注河流健康状况的一个重要举措是“河流生境调查”(River Habitat Survey, RHS),即通过调查背景信息、河道数据、沉积物特征、植被类型、河岸侵蚀、河岸带特征以及土地利用等指标来评价河流生境的自然特征和质量,并判断河流生境现状与纯自然状态之间的差距(Raven et al., 1998)。RHS 项目是 20 世纪 90 年代由英国国家河流管理局组织的,并在 1994 年出版了第一版的 RHS 评价方法,而后又在 1995 年、1996 年、1997 年、2003 年分别公布了 4 个版本的 RHS 评价方法。RHS 在 20 多年中逐渐完善,不但被欧洲河流水文地貌评价技术规范编制组和欧盟 STAR 项目所采纳,同时也被 WFD 作为固定评价方法之一而应用。

另一个值得关注的评价实践是 1998 年提出的英国“河流保护评价系统”(System for Evaluating Rivers for Conversation, SERCON),该评价系统通过调查评价 35 个属性数据构成的六大恢复标准(即自然多样性、天然性、代表性、稀有性、物种丰度及特殊特征)来确定英国河流保护价值(Boon et al., 1998)。SERCON 于 1998 年启动了第一期项目,随后在 2002 年吸纳了 RHS 后启动了第二期项目。该评价系统已经成为一种广泛运用于英国河流健康状况评价的技术方法。

2000 年欧盟出台了 WFD,要求各成员国在 2015 年实现地表水体达到“良好化学与生态状态”,成员国根据各自情况制订具体办法。在明确了目标之后需要界定水体状态。WFD 规定了对地表水体的监测主要是针对河流、湖泊、过渡性水域和沿海水域。其中,河流与湖泊是主要的淡水水体,通过测定特定生物的、水文地貌的和物理化学的质量要素条件,来反映水体的健康状况。河流生物要素以水生植物、底栖动物、鱼类为主,湖泊生物要素则增加了浮游植物的评价要素;河流水文地貌要素以水文状况(流量、水流动力学)、河流连续性、形态条件(深度与宽度变化、河床结构与底质、河岸带结构)为主,湖泊水文地貌要素则以湖泊形态条件和水文状况为主;河流化学要素主要考虑热量条件、氧平衡条件、盐度、酸化状况、营养条件、特定污染物等,湖泊化学要素则增加了透明度指标。WFD 规定成员国必须监测生物质量要素条件的参数指标,综合使用多重度量指数来对水体进行生态状况分类,并规定了 5 个水体生态等级的划分标准。

(3) 澳大利亚的流域水生态系统健康评价

澳大利亚有长期的河流评价历史,初期河流评价主要借助于两种方法:定性的河流状况描述和河流物化参数监测。河流评价工作在维多利亚州、昆士兰州、新南威尔士州都有所开展,但各州的河流评价方法各不相同。为了建立全国统一的流域水生态系统健康评价方法,澳大利亚联邦政府于 1992 年开展了“国家河流健康计划”(National River Health Program, NRHP)项目,用于监测和评价澳大利亚河流的生态状况,评价现行水管理政策及实践的有效性,并为管理决策提供更全面的生态学及水文学数据(唐涛等, 2002)。NRHP 项目的首要任务就是制订一套标准的河流生物调查与评价技术规范,因此 NRHP 技术咨询组提出了快速生物评价协议,而后这套生物评价方法逐渐得到优化(Norris R H and Norris K R, 1995)。NRHP 项目还建立了可用于澳大利亚全国河流健康评价的 AUSRIVAS,这是 NRHP 项目在英国 RIVPACS 的基础上针对澳大利亚河流而开发的,并利用相同的方法原理运用到鱼类和着生藻类上,而后发展了“河流鱼类预测与分类计划”(River Fish

Prediction and Classification Scheme, RIFPACS) 和“硅藻预测与分类系统” (Diatom Prediction and Classification System, DIPACS)。

澳大利亚联邦政府于 2005 年启动了“澳大利亚水资源项目”(Australian Water Resources, AWR), 这是一项为提升澳大利亚水体质量标准所开展的重要项目, 其中河流健康评价是重要的研究内容。AWR 建立了一套“全国河流与湿地健康评价体系”(Framework for Assessment of River and Wetland Health, FARWH), 主要从河流物理形态、水质、水生生物、水文干扰、边缘区、流域干扰 6 个方面进行综合评价。该评价体系中所有指标都进行标准化处理, 以 0 表示河流严重退化, 1 表示河流未受到干扰。这一河流健康评价系统在维多利亚州和塔斯马尼亚州进行了应用示范。到 2011 年, FARWH 经历了 4 次完善, 已经可以用于全国及州等不同尺度的河流健康评价工作 (Senior et al., 2011), 并引入了溪流状况指数 (index of stream condition, ISC)。ISC 由澳大利亚自然资源和环境部提出, 采用河流水文学、形态特征、河岸带状况、水质及水生生物 5 个方面的指标, 综合评价河流健康状况, 并对长期的河流管理和恢复中管理干预的有效性进行评价, 其结果有助于确定河流恢复的目标, 评估河流恢复的有效性, 从而引导河流管理的可持续发展。

澳大利亚每个流域都开展了各自的水体健康评价工作。墨累-达令流域是澳大利亚东部一个重要的流域, 墨累-达令流域管理局 (Murray-Darling Basin Authority, MDBA) 开展了“河流可持续性核算”(Sustainable Rivers Audit, SRA) 项目。SRA 实质上是十分复杂的河流水生态系统健康评价, 由独立的河流可持续性核算组 (Independent Sustainable Rivers Audit Group, ISRAG) 定期报告, 包括墨累-达令流域的 23 条河流的生态健康状况。2008 年, MDBA 完成了该流域第一轮水生态系统健康评价。这次评价是以鱼类、大型底栖动物和水文 3 个方面要素构成的综合评价 (Davies et al., 2008)。2008 ~ 2010 年, MDBA 又开展了第二轮的 SRA, 并在河流生态系统健康评价体系方面有所改进, 形成了包括鱼类、大型底栖动物、植物、物理形态和水文五要素的综合评价体系。第二轮的 SRA 使用了 2004 ~ 2010 年收集的水生生物数据和 1998 ~ 2009 年收集的水文数据, 在结果方面显然比第一轮 SRA 更能为 MDBA 提供必要的管理支持。2011 ~ 2013 年, MDBA 又收集了更多的水生生物调查数据, 其中包括雨季的数据, 这为开展第三轮 SRA 提供了更多的数据, 可以更好地反映河流生态系统自然变化的情况。在监测方面, MDBA 自 1978 年以来对墨累-达令河及其支流实施了长期的水体理化指标的周、月、季度监测, 部分点位还开展了水生生物监测, 包括大型底栖动物和浮游植物。其中, 大型底栖动物每年春季和秋季各监测一次, 由墨累-达令淡水研究中心负责完成并提供生态质量报告结果。

澳大利亚各州在水生态系统健康评价方面也开展了很多工作, 以昆士兰州为例, 除了联邦政府启动的 FARWH, 昆士兰州还开展了“溪流与河口评价项目”(Stream and Estuary Assessment Program, SEAP)(1994 年)、“淡水生态系统健康监测项目”(Ecosystem Health Monitoring Program-Freshwater, EHMP)(2002 年)、“湖泊环境与生态系统健康监测项目”(The Lakes Environmental and Ecosystem Health Monitoring Program, LEEHMP)(2005 年)、“昆士兰墨累-达令区委会监测项目”(Queensland Murray-Darling Committee Community Monitoring Program, QMDCCMP)(2006 年)、“艾尔湖流域河流健康评价项目”(Lake Eyre Basin River Health Assessment, LEBRHA)(2011 年)等。SEAP 所使用的评价方法较为灵

活,各地区可以根据自己情况使用不同的评价指标,也可参照利用其他项目中所使用的方法和指标。EHMP利用理化参数、营养盐、生态系统过程、大型底栖动物和鱼类建立了区域性的综合评价体系。LEEHMP针对湖泊生态系统特点使用了水质、浮游藻类、感官反应、降水与温度变化等指标,识别了自然湖泊生态系统的变化与健康状况。QMDCCMP所使用的评价体系相对简单,只包括基本水体理化指标和大型底栖动物。LEBRHA的评价体系则包括鱼类、鸟类、植物、物理生境、水质和水文等要素,在不同流域尺度上每5年和每10年分别开展一次河流健康评价。

(4) 南非的流域水生态系统健康评价

南非水利和森林部(Department of Water Affairs and Forest, DWAF)于1994年发起了“河流健康计划”(River Health Programme, RHP),该计划选用河流大型底栖动物、鱼类、河岸植被、生境完整性、水质、水文、形态等河流生境状况作为河流健康的评价指标,提供了可广泛用于河流生物监测的框架。南非还针对河口底栖生物提出了EHI(estuarine health index),即用生物健康指数、水质指标及美学健康指数来综合评估河口健康状况(Copper, 1994)。此外,南非的快速生物监测计划也发展了“生境综合评价系统”(Integrated Habitat Assessment System, IHAS),系统中涵盖了与生境相关的大型底栖动物、底泥、水化学指标及河流物理条件。

1.2.3 中国流域水生态系统健康评价的进展

随着国内河流环境问题的日益突出以及对河流管理方法需求的不断增强,21世纪初我国学者开始围绕河流健康的概念与内涵展开探讨(蔡庆华等,2003;董哲仁,2005;赵彦伟等,2005),探讨的热点在于河流健康是否只是单纯考虑其自然服务功能还是应该寻求与社会服务功能之间达到一种平衡。学者们也对其他一些相关概念或提法,如生态势(ecological potential)、健康工作河流(health working river),进行了生态内涵的剖析(董哲仁,2005)。部分学者还针对河流健康评价提出了一些质疑,如河流健康基准点难以确定、河流健康无法量化等问题。与此同时,国内在河流健康评价方法学方面开展了一定工作(赵彦伟等,2005;吴阿娜等,2005;张远等,2006)。对河流健康内涵的认识上,最初围绕河流健康评价内容的探讨较多,主要是从河流服务功能的角度进行考虑,评价内容主要为河流对人类社会的支撑功能(蔡庆华等,2003)。随后,河流健康评价的内容逐渐演化到河流自然生态系统特征本身,如水体理化条件、河道形态、生物栖息地状况、水生生物组成、河岸带植被类型等要素。随着河流健康评价内容的逐渐清晰,不同评价内容下具体的评价指标被不断提出并完善(叶属峰等,2007),利用综合指标评价河流健康逐渐有所发展。

在实践方面,我国的河流健康评价初期基本是以方法学的研究为主。例如,利用大型底栖动物完整性指数评价安徽黄山地区溪流健康状况(王备新等,2006);探讨RIVPACS等预测模型方法在我国河流健康评价中的应用(张杰等,2011);构建河流健康状况的综合评价体系(张远等,2006)等,这些工作为国家层面推广流域水生态系统健康评价奠定了基础。为推动流域水生态系统健康评价工作在行业内和全国的推广,2007年商务部与澳大利亚国际发展署(AusAID)发起了“中澳环境发展伙伴项目”(Australia China

Environment Development Program, ACEDP), 该项目旨在将河流健康与环境流量评估的国际方法在中国进行试验并改进使其适应中国的国情。ACEDP 建立了一套包含社会服务功能和河流生态环境的健康评价指标体系, 其中河流生态环境由水生生物、水文、水质、物理形态 4 个要素构成, 并在黄河、珠江和辽河 3 个流域进行试点研究。2010 年水利部启动“全国河湖健康评估计划”(National River and Lake Health Program, NRLHP), 建立了统一、全面的河湖健康评价指标体系。该评价体系从生态完整性和社会服务功能完整性两方面综合考虑, 其中生态完整性包括化学、水文、物理和生物 4 个完整性内容。该套评价指标体系建议河流、湖泊、水库等不同类型水体使用不同指标。NRLHP 通过 2010~2012 年和 2013~2015 年分别在全国重要流域开展两期试点工作, 以期在 2016 年以后实现在全国推行定期评估制度。此外, 财政部 and 环境保护总局于 2007 年联合开展我国湖泊生态环境保护专项工作, 构建了“驱动力-压力-状态-影响-风险”的生态安全综合评估体系(金相灿等, 2012), 经过几年的实施, 获得了许多湖泊的生态保护与治理经验。2014 年, 财政部又会同环境保护部、水利部开展国土江河综合整治试点工作, 强调要加强流域江河湖泊资源与环境现状调查、开展生态安全评估工作。2008 年, 国家启动了水体污染控制与治理科技重大专项, 计划在 2008~2020 年, 分 3 个阶段投资 300 多亿元开展我国水体污染控制技术和水污染防治管理技术的研究。其中“十一五”阶段和“十二五”阶段设置了“流域水生态功能分区与质量目标管理技术”“流域水生态承载力调控与污染减排管理技术”两个项目, 其中在辽河、松花江、海河、淮河、东江、黑河、太湖、巢湖、滇池、洱海十大流域开始了水生态长期观测, 在借鉴中澳 ACEDP 研究成果的基础上, 开展了十大流域的水生态系统健康评估工作, 这是我国首次大范围的流域水生态系统健康评估工作。

总体而言, 我国的河流健康评价研究相对滞后, 在河流健康理论和评价体系方面取得了一定进展, 但研究水平与国外相比仍有较大差距。相比于国外, 国内的研究更加注重于人水关系, 如注重平衡利益冲突、满足人类社会需求等方面。另外, 河流健康评价主要借助于化学手段和少量的生物监测评价河流水质情况, 从生态系统健康的角度认识河流健康需要进一步深入。此外, 研究案例仍非常匮乏, 现有的研究多以单条河流为主, 缺乏流域、水系、河流不同空间尺度上的探讨, 尚未形成完善的理论框架和方法体系, 且缺乏体现我国区域分异特点并具实际指导意义的评价指标与实践案例。

1.3 流域水生态系统健康评价研究现状

1.3.1 流域水生态系统健康评价常用指标

19 世纪末, 人们已经开始注意到人类干扰活动对河流生物造成的伤害, 并尝试追踪这种生物退化的程度, 而河流生物退化也被视为人类活动的指示因子, 由此拉开了河流生物监测的序幕。进入 20 世纪后, 化学污染物对水质的影响引起了许多学者的重视, 但鲜有人把化学和生物两者结合起来考虑。直到最近 30 年, 人们才逐渐认识到河流生物群落具有整合不同时间尺度上各种化学、生物和物理影响的能力, 生物群落的结构和功能能够反映诸如化学品污染、物理生境消失、外来物种入侵、水资源过量消耗、河岸带植被过度