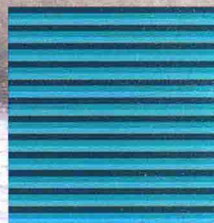


东江河流 生态健康评价研究

江 源 廖剑宇 刘全儒 康慕谊 ● 等著



科学出版社



国家水体污染控制与治理科技重大专项课题

重点流域水生态功能三级四级分区研究 (2012ZX07501002)

东江河流 生态健康评价研究

江 源 廖剑宇 刘全儒 康慕谊 ● 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

《东江河流生态健康评价研究》以亚热带区典型河流东江为研究对象,通过全面调查东江及其不同支流的水生态特征,在充分认识东江水生态系统特征的基础上,参考国内外现有评估方法,开展了河流生态健康评估。鉴于流域内自然条件和社会经济条件的区域差异,也鉴于河流生态系统自身特点的不尽相同,本书不仅仅对东江水系进行了水生态健康评估,同时也根据流域水生态功能分区和河段生态分类,尝试开展了分区评估和按照不同河段类型的水生态健康分类评估,以期揭示东江水生态健康的区域差异,为河流生态恢复与保护和流域生态管理提供科学依据。

本书可以作为高等院校、科研院所以及相关人才培养单位流域生态学、水生态学、环境科学以及环境规划与管理等相关专业的教学参考书,也能够为环保、水利以及东江流域和香港行政区等相关管理机构人员,制定东江流域管理措施提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

东江河流生态健康评价研究 / 江源等著. —北京: 科学出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-03-045567-3

I. ①东… II. ①江… III. ①东江-环境生态评价-研究 IV. ①X522.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 207760 号

责任编辑: 刘 超 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 徐晓晨 / 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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 250 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

根据中国环境状况公报数据显示,近年来全国地表水,尤其是十大流域的水质已不断改善。但全国水环境的形势仍然非常严峻。一方面就整个地表水而言,受到严重污染的劣V类水体所占比例较高,全国约10%,有些流域甚至大大超过这个数值,如海河流域劣V类水体的比例高达39.1%;另一方面,即使是整体污染程度相对较轻的河流,在流经城镇的一些河段、城乡结合部的一些沟渠塘坝污染普遍比较重,并且由于受到有机物污染,黑臭水体较多,受影响群众多,公众不满意度高。

河流是地球表面的重要生态系统,不仅为人类生存提供着宝贵的淡水资源,而且发挥着一系列重要的生态功能。河流生态系统健康与否直接影响着人类福祉。中国环境状况公报数据以水质参数为主,但水质仅仅是表征河流生态系统的一类参数,从生态学和生态保护的视角看,水质变化对河流生态系统中的各类生物物种及其生境质量都会产生影响。因此水质特征和水生生物对水质及其他人类干扰活动的响应方式正在引起广泛关注。20世纪80年代以来,人们对河流生态系统的作用与意义的认识更加明确和深刻,主张对河流生态系统的保护和管理,不仅仅只关注由物理和化学数据所反映的河流水质状况,更应该关注河流生态健康,强调关注河流生态系统的生境特点和自身结构的完整性,以便于河流在自身发展过程中,能够有效服务于人类、服务于地球生态系统的持续稳定,同时也能够具备较强的抵御外界干扰的能力。因此,近年来各国纷纷阐述各自的河流生态健康管理理念,并不断付诸实践。

河流生态健康评估是河流可持续管理的重要科学依据之一,最近十余年中,国际上发展了多套评估方法,采用理想河段或样板河段,或者采用一定的水质指标和生物指标作为评估基准值,对不同地区的河流进行评估,并提出相应的管理措施和管理目标,促进河流生态系统向良性方向发展。我国河流生态系统面临诸多问题,许多河段退化显著,国家相关部门也已充分认识到开展河流健康评估对我国河流可持续管理的紧迫性和必要性,有关河流生态健康评估的案例不断涌现。尽管如此,如何开展河流生态健康评估,指导河流生态系统向良性方向恢复,促进江河休养生息,仍然存在着一些亟待解决的重要问题。我国疆域辽阔,自然条件分异规律清晰,社会经济条件区域差异显著,在河流生态健康评估中难以制定全国范围内的统一标准,也不能完全沿用国外的方法和标准。以自然和社会经济条件分异规律为指导,在充分认识不同地区河流生态系统特征的基础上,分区、分类开展河流生态健康评估,制定相应的管理措施和标准,正在成为我国河流水环境管理的新思路。

本书以东江为研究对象,通过全面调查东江及其不同支流的水生态特征,在充分认识东江水生态系统特征的基础上,参考国内外现有评估方法,开展了河流生态健康评价。鉴于流域内自然条件和社会经济条件的区域差异,也鉴于河流生态系统自身特点的不尽相

同,本研究不仅仅对东江水系进行了水生态健康评价,同时也根据流域水生态功能分区和河段生态分类,尝试开展了分区评价和按照不同河段类型的水生态健康分类评价,以期揭示东江水生态健康的区域差异,为河流生态恢复与保护和流域生态管理提供科学依据。

作者所在的北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室中的景观过程与资源生态研究团队长期以来致力于人类活动与生态响应方面的科学研究,在“十一五”和“十二五”期间,先后承担了国家水体污染控制与治理科技重大专项课题“重点流域水生态功能一级二级分区研究”和“重点流域水生态功能三级四级分区研究”课题,同时还承担着国家自然科学基金相关研究课题。东江河流生态健康的分区、分类评估正是在已经取得的水生态功能分区和河流生态分类的基础上才能得以顺利开展。

东江河流生态健康评价工作历时将近两年,评价以获得的第一手调查数据为基础,力求全面客观反映东江及其支流各类河段的生态健康状况,并基于评价结果提出流域管理建议。需要说明的是,本书所采用的水质和水生生物数据不仅来自于东江干流,也来自于支流调查,与以往发表的研究成果相比,具有覆盖河流类型全面、采样生境多样等特点。此外,我们在开展河流生态健康评价的同时,也重视对评价中发现的相关问题的探讨。本书的研究目的在于期望通过东江河流生态健康评价,不仅为区域性生态保护提供客观而全面的评价结果,也能够为在全国范围内分区、分类开展水生态健康评价提供提供经验和借鉴,为我国开展水生态系统保护、推进江河生态恢复和休养生息、实现河流资源可持续利用提供科学依据。

本书由北京师范大学资源学院江源教授主持写作,主要参加人员及其所负责的章节如下:第1章:廖剑宇、付岚、江源;第2章:吕乐婷、彭秋志、康慕谊;第3章:刘琦、廖剑宇、付岚、江源;第4章:廖剑宇、彭秋志、付岚、吕乐婷、康慕谊;第5章:丁佼、付岚、刘琦、江源;第6章:丁佼、刘琦、付岚、彭秋志、刘全儒;第7章:彭秋志、丁佼、刘琦、付岚、江源、刘全儒;第8章:江源、廖剑宇。全书由江源、廖剑宇统编定稿。

本书在研究和撰写过程中,受到了来自多方面的支持与关心。中国环境科学院孟伟院士对于我们的研究工作自始至终给予了热情的鼓励和指导,中国环境监测总站王业耀研究员、中国环境科学院张远研究员和中国水利水电科学研究院水环境研究所渠晓东研究员对本研究工作的指导和期许,使我们的工作推进得更加顺利。北京师范大学周云龙教授和衡水学院武大勇教授在藻类物种鉴定和底栖动物鉴定方面给予了大力帮助,没有你们在显微镜下的辛勤工作,本项工作便不能顺利完成。北京师范大学伍永秋教授参与了许多野外调查工作和项目研究与讨论,这种无私的参与为东江研究团队带来了地理学人的智慧和敬业风范。北京师范大学董满宇博士、朱文泉、周丁杨和田育红副教授,深圳大学张永夏副教授的参与和奉献,让项目团队更加充实和富有活力。水体污染控制与治理科技重大专项办公室对课题的精细化管理和督促检查等为研究工作顺利推进提供了保障。

本书的写作和出版受到以下项目资助:国家水体污染控制与治理科技重大专项课题“重点流域水生态功能三级四级分区研究(2012ZX07526-002);”国家自然科学基金项目(41271104)。

在此,谨向参与本研究工作的专家学者和研究生、为本研究工作提供过帮助和指导的

朋友与同事，以及对本研究给予热情支持的单位与个人，表示衷心感谢！东江水生态健康评估工作向前推进的每一步，都与你们的关心、支持和参与密不可分。

本书涉及内容较为广泛，限于我们的理论水平和实践经验，错误和不足之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

作 者

2014 年 12 月

于北京师范大学

目 录

第 1 章 河流健康评估国内外进展	1
1.1 基于浮游藻类特征的水生态健康评估	1
1.2 基于底栖动物的水生态健康评估	13
参考文献	15
第 2 章 东江流域自然与社会经济概况	22
2.1 流域气候特征	23
2.2 流域水文特征	24
2.3 流域地质地貌特征	26
2.4 河湖水系特征	29
2.5 植被与土壤特征	31
2.6 社会经济特征	32
2.7 东江流域水资源和水生态问题概况	35
参考文献	36
第 3 章 东江流域水生态系统特征	38
3.1 东江水文和水资源特征	38
3.2 浮游藻类特征	47
3.3 底栖动物群落特征	50
参考文献	53
第 4 章 东江流域水生态系统特征调查与样品分析方法	56
4.1 样点设置与样品采集	56
4.2 水质分析方法	57
4.3 叶绿素 a 浓度分析方法	58
4.4 水生生物鉴定与统计方法	58
参考文献	59
第 5 章 东江河流生态健康评价体系和评价方法	60
5.1 基于河流生态分类和生态功能分区的健康评价体系	60
5.2 评价方法	62
参考文献	77
第 6 章 东江流域河段类型水生态健康评价	79
6.1 河段类型评价结果	79
6.2 综合对比各河段类型健康评价结果	103

第7章 东江河流生态健康分区评价	106
7.1 东江上游山区河流水源涵养水生态功能区 (RF I) 河流生态健康评价结果	106
7.2 东江中游谷间曲流水量增补水生态功能区 (RF II) 河流生态健康评价结果	116
7.3 东江下游感潮河网水量均衡水生态功能区 (RF III) 河流生态健康评价结果	133
7.4 东江流域水生态健康总体评估结果	147
第8章 流域水生系统健康保护对策	155
8.1 流域内的主要水生态问题	155
8.2 流域水生态保护对策	157
参考文献	162

第 1 章 河流健康评估国内外进展

20 世纪 60 年代以来,随着世界人口急剧增长和经济迅速发展,世界各国的河流都经受了不同程度的干扰和损害,各地河流频频爆出水质污染事件,区域生境退化、河流断流及生物多样性减少等种种生态环境问题突出。在这一背景下,河流水生态系统的保护及可持续管理引起了各国政府的广泛关注 (Boon et al., 1997; Brookes and Shields, 2001)。

河流生态健康评价是河流可持续管理的重要依据,早期的河流水生态健康评价是通过河流水环境的物理、化学指标分析来判断河流水生态系统所处的生态环境状况,对有关水生态系统中水生生物特征对水环境影响的综合反应特征关注不足。20 世纪后期以来,水生生物对水物理和水化学特征变化的响应受到重视,能够反映水生生物特征的各类指标也随之成为一种不可或缺的河流生态健康评估参数,并在河流环境风险的生物预警和长期监测中逐渐获得应用。

长期以来,我国许多地区出现水资源过度利用、水质下降或者恶化,水生态系统健康状况令人担忧。从 20 世纪 80 年代以来,我国政府对水污染防治和水环境保护的重视程度不断提高,并建立了以污染物总量控制为主要手段的水生态保护和管理体系,各地形成了不同级别的水质监测网络和污染物总量控制标准。然而,与发达国家水生态系统管理相比,我国缺乏针对水生生物的常规监测与评价体系。我国于 2008 年启动了国家水体污染控制与治理科技重大专项 (简称水专项),其中设立了多个与水生态管理密切相关的研究项目和课题,并明确指出了通过广泛的流域水生态调查,构建我国水生生物监测与评价的技术标准和规范的现实要求,这对于提高我国流域水生态系统可持续管理水平具有重要意义。

东江是珠江三大支流水系之一,也是我国南方湿润地区最早出现整体水资源供需矛盾的流域之一。其下游地区位于珠江三角洲中心地带,经济高速发展、城市化进程迅猛、人口数量急剧增加,工业废水和城市生活污水排放导致河流污染范围不断扩展,局部河流污染十分严重,水质安全保障压力很大。此外,东江流域自然条件差异显著,流域内各地经济发展水平也不均衡,流域水质空间性变化明显。因此,对东江流域开展水生态健康评估,对保护区域河流生态安全具有重要实践指导价值,对推动我国水生态健康评估具有典型示范意义。

1.1 基于浮游藻类特征的水生态健康评估

在河流水生境与水生生物关系的研究中,常用的指示生物包括藻类、底栖动物和鱼类等。浮游藻类是水生态系统的重要初级生产者,具有在河流水生态系统中分布广泛及对生境变化敏感等特征,其物种结构与数量组成是衡量水环境状况的重要标准。利用浮游藻类群落对水环境变化所产生的反应来监测水生态系统状况,是河流水生态系统健康评估的重

要手段之一。国际上已开展了广泛的水生生物调查与监测工作,并通过基础数据分析建立了基于水生生物特征的生态健康评价体系和标准,在这些体系和标准中浮游藻类指标都是重要的组成部分。例如,美国国家环境保护局(USEPA)于1977年发布了基于生物完整性的生物调查规范与评价基准,并在后续修订中加入了基于藻类完整性的评估体系;澳大利亚于1992年启动国家河流健康计划(National River Health Program, NRHP),致力于通过对重点流域水生生物的监测,预测和评价河流水生态状况,并且形成了全国性的藻类监测和评价网络(CEPA, 1994);欧洲联盟(简称欧盟)于2000年颁布了《水框架指令》,确定了各类水体(河流、湖泊、河口、水库等)的生态状态等级标准,并将“良好”的生态状态或生态潜力作为最终管理目标,为实现指令要求,各成员国开展了广泛的水生态和生物监测体系研究,并颁布了藻类监测与评价的技术规范和标准(European Commission, 2000)。

1.1.1 浮游藻类群落与藻类功能群

浮游藻类指水体中营浮游生活的小型藻类植物,是河湖水生态系统中主要的初级生产者,对河湖水生态系统中的其他生物产生重要影响,在河流与湖泊等水生态系统中发挥着重要生态功能。浮游藻类群落是指同一时间、区域出现的藻类集合(Reynolds, 1980),浮游藻类群落组成和数量对水生态系统的理化指标敏感,其种类组成和功能群特征会随着水质理化成分而改变,因此常被用作水环境监测和评价的重要指标,是河湖水生态系统健康与否的重要生物指示指标之一(Airolidi, 2001; Rott et al., 2006; 吴波, 2006)。

有藻类学者(Reynolds et al., 2002)提出了浮游藻类功能群分类(phytoplankton functional classification)的概念。由于藻类细胞营养物质摄取和能量利用等行为与自身生理生态特征存在一定关系,其自身形态特点和生理特性等决定了藻类对特定生境条件的喜好与否,因此,生境条件的改变必然导致藻类群落结构的变化。基于以上认识,以营养物质浓度、水体扰动程度、水体下层光照强度、水体温度、二氧化碳浓度、浮游动物觅食特征等特征为参数,划分生境类型,将对特定生境类型具有相似适应性或响应机制的分类类群归为一个具有相同或相似生态属性的功能群(functional group),功能群以英文字母命名。自藻类功能群划分提出以来,得到了众多学者的重视,Kruk等(2002)着重从功能群有效性验证方面进行了研究,Borics等(2007)、Ngearmpat和Peerapornpisal(2007)则分别对菱形藻属(*Nitzschia*)和鼓藻属(*Cosmarium*)等特定藻类进行了细化分析,完善了功能群的分类体系,Reynolds等(2002)起初确定了31个功能群,后经过补充和完善,现已确定39个不同属性的功能类群(Padisak et al., 2006; 2009)。目前,功能受到了很多学者的肯定并群已经在一些领域获得应用。Salmaso(2002)应用浮游藻类功能群对意大利Garda湖浮游藻类群落演替与空间分异规律进行了研究,Abonyi等学者应用功能类群分析了欧洲大型河流的生态现状,发现了藻类功能群组成与人类活动影响密切相关(Abonyi et al., 2012; Devercelli., 2010; Stankovi et al., 2012)。

1.1.2 影响浮游藻群落特征的主要因子

河湖水生态中的环境因子,如光照、水温、电导率、营养盐浓度和水体动力条件等都

能影响浮游藻类群落组成和种群的动态变化 (Negro et al., 2000)。通常认为浮游藻类的种类组成和数量特征与水体中营养盐含量关系密切, 就湖泊水体而言这一结论已被广泛认可 (Pasztaleniec and Poniewozik, 2010; Lynam et al., 2010), 对于河流水体而言, 近年来也发现了类似现象。Thomas (2000) 对美国 Yakima river 盆地的 25 条河流进行调查, 利用浮游藻类等指标就农业用地对水质的影响进行研究, 结果表明浮游藻类群落结构与水质特征之间存在有显著的相关关系; Harry 等 (2002) 在对加利福尼亚州 San Joaquin 河水体进行调查之后发现, 浮游藻类的分布和群落结构与水环境中的理化因子相关; 在加拿大安大略省东南部河流和魁北克西部河流的研究中, 有学者证实了水体中磷与叶绿素 a 的正相关关系 (Hudon et al., 1996; Basu and Pick, 1996; Nieuwenhuysen and Jones, 1996; Phillips et al., 2008)。

此外, 也有较多的研究结果表明, 浮游藻类的数量和组成对河流中营养物质的敏感性, 还取决于河流形态、河流深度、水体透明度、河岸带植被遮蔽状况、流域面积、人类活动影响等因素 (Phillips et al., 2008), 如 Lweis (1988) 对 Orinoco 河的研究表明, 级别较低的溪流小河藻类群落复杂多变, 而下游大河区域则相对稳定, 受水质影响较大, 对水体透明度与河岸带植被遮蔽的响应主要反映了藻类在光和营养物需求特征方面的差异, Köhler 等 (2002) 曾发现当水体透明度较低时, 无论水体营养元素和水动力条件如何变化, 水体中藻类生物量均偏低, 人类活动的影响主要体现在水电站与闸坝建设、农业灌溉、内河航运、防洪抗旱等活动的干扰, 这些干扰活动导致了河流联通以及水动力条件的改变, 通过水温、流速、流量的改变而影响群落特征的变化, 同时这些干扰活动还加强了河流上游对于中下游河段的影响, 即上下游关系对于藻类群落特征起到了重要作用 (Lange and Rada, 1993)。江源等 (2013) 提出河流是一个复杂的生态系统, 不同的河流生境特征均对于浮游藻类特征变化产生一定影响, 所以建议应开展不同河流生境的浮游藻类特征调查研究, 通过不同生境浮游藻类特征分析, 揭示其与水环境内在关系, 从而为评估河流水生态健康提供科学依据。

1.1.3 基于浮游藻类的水质生物学评价

1.1.3.1 浮游藻类水质生物学监测与评价

研究浮游藻类特征是开展河流水生态系统监测和健康评估的重要手段, 藻类水质生物学监测与评价的发展历程, 大致可归纳为由指示物种评价到指示群落评价、由与单纯的水质因子关联分析到与水生态系统特征综合分析的过程。在水生生物监测的最初阶段, Kolwiz 和 Marsson (1909) 根据指示物种提出了“生物指示污水”系统, 并将水生生物物种分成能够适应多污带、 α -中污带、 β -中污带、寡污带等水域的类群, 这个方法一经提出便得到了广泛的运用。Palmer (1969) 对前人研究进行总结归纳, 总结了 100 多名作者发表的近 300 篇的相关报道, 其中提到的藻类就有 240 属 725 种, 另有 125 种变种和变型, Pantle 和 Buck (1955) 在前人研究基础加入了定量化的描述, 并根据不同区带藻类物种指示值和出现频率分别给予分值, 构建了污生指数, 从此污生指数评价开始被广泛运用于基于藻类特征的水质评价。

20 世纪 60 年代以来, 许多学者提出了应用藻类群落结构特征监测水质污染的可能性,

认为这比单用指示生物或物种更为全面。为此,群落多样性指数评价,如 Shannon-Wiener 指数、Simposon 指数、Margalef 指数等逐渐获得应用。群落多样性指数评价方法主要根据藻类细胞密度和群落结构的变化来评价水体的污染程度,它一方面较系统地显示生物群落的结构组成,另一方面又反映了生物群落与水污染的关系,被认为是监测和评价水体污染的较好方法。随着指示群落评价法的兴起,研究人员开始关注藻类群落中的特定类群,并予以赋值法进行定量化评估。目前认为,藻类群落中的硅藻能够很好地反映它们所在水体的水环境特征,如小环藻属 (*Cyclotella*) 和针杆藻属 (*Synedra*) 多出现在贫营养水体中,曲壳藻属 (*Achnanthes*)、等片藻属 (*Diatoma*) 出现在受到一定污染的河流生境中,而直链藻属 (*Aulacoseira*) 和冠盘藻属 (*Stephanodiscus*) 则是营养物质极丰富水体中的典型代表。硅藻的定量研究始于湖泊酸化沉降的研究,其目的是了解湖泊酸化的动态过程以及酸化引起的水体环境的变化,揭示水生态系统对人类活动的响应 (Frindlay and Shearer, 1992),目前硅藻生物监测研究在欧洲不同水体中应用广泛。其中法国以溶解氧、营养元素含量、水体腐殖化程度等对硅藻的生态类群进行划分,持续 30 多年研究形成了一套江河水质硅藻监测与评价体系 (Eppley, 1977; Vittousek, 1997)。随着对硅藻研究工作的深入,研究者利用野外实测数据将硅藻群落特征与环境因子的关系,建立了一系列辨别硅藻群落特征的函数和数学模型,并以此为基础构建硅藻指数,进而在水质监测评价中获得广泛应用 (Cemagref, 1982; Descy and Coste, 1991; Wu and Kow, 2002; Coste et al., 2009)。

21 世纪以来,许多研究者开始重点关注浮游藻类与生境的关系,并尝试通过浮游藻类与生境的响应关系对藻类群落进行重新分类和组合,浮游藻类功能群的研究开始兴起 (Padisak and Reynolds, 1998; Reynolds, 2006),在此基础上,根据浮游藻类群落与生境的关系的长期研究积累,以功能类群赋值法为基础的评价指数也开始运用于河湖水质评价 (Padisak et al., 2006),Luciane 等 (2008) 和 Becker 等 (2009) 分别对温带水库浮游藻类功能群进行了研究,通过功能类群评价指数 (Q)^① 与富营养化指数 (TSI) 及叶绿素 a 的关系研究,验证了基于温带湖泊类型指示值的 Q 值评价适用于该地区水库水体,而 Piirsoo 等 (2010) 对 Narva 河连续监测研究发现 Q 值对河流水质评价也具有较好的适用性。

1.1.3.2 基于多指标体系的生物完整性 (IBI) 评价

生物完整性是生物群落具有保持群落结构完整性、维持自身物质能量平衡和适应环境条件变化的综合能力,生物完整性包括一个生物群落在区域生物栖息地中所有物种组成、群落多样性和功能结构特征,是个体、种群和群落生态特征的综合体现,也是对生物所处生境质量的一种响应 (Karr, 1981)。生物完整性指数 (index biotic integrity, IBI) 是对所研究生态系统的完整性进行表征,由生物群落组成、物种丰富度、多样性指数等多个生物指标构成,通过比较各指标参数值与系统参考体系的标准值,衡量被评价水生态系统的健康程度。生物完整性指数可定量描述人类活动干扰下,环境变化与受胁迫下生物群落变化之间的关系,客观反映了水生态系统受到的影响程度 (Karr et al., 1986)。

生物完整性评价研究源于 Karr (1981) 在 20 世纪 80 年代对美国中西部河流进行健康

^① Q 值: phytoplankton assemblage index Q, 藻类集群指数,来源于 WFD 水生态评价体系。

评估的实践,该方法以鱼类为研究对象,主要通过对鱼类群落的组成与分布、种属多度、营养类型及土著物种、外来物种、敏感物种等12项指标数据变化的分析,预测评估了水生生态系统的健康状态并取得较好的效果。后来该方法逐渐推广到对其他生物类群的研究,并广泛应用于鱼类、底栖动物、大型水生维管植物、着生藻类和浮游生物等水生生物类群(Oberdorff and Hughes, 1992; Weisberg et al., 1997; Diaz et al., 2003; Silveira et al., 2005; Schmitter-Soto et al., 2011)。与鱼类、大型底栖无脊椎动物相比,藻类生物完整性指数(P-IBI)的应用还存在许多需要探索的问题,其主要原因是藻类群落的物种数量巨大,并且对指标的分析 and 鉴定专业技能要求较高。Stevenson (1998)以着生硅藻作为研究对象,应用群落结构、多样性等5个指标研究了溪流和湿地水生态健康状况,评价结果为河流风险管理规划的提供了支持和参考;Hill等(2000)根据中部阿巴拉契亚流域支流不同年份200多个样点的藻类数据,构建了由10个指标组成的P-IBI指数体系,通过研究发现流域地形地貌特征是影响P-IBI的主要因素,同时P-IBI与总磷、电导率等化学指标也具有一定的相关性。浮游藻类生物完整性评价起初运用于湖泊和河口水体的研究,Lacouture等(2006)运用物种丰富度、多样性指数等12个指标对Chesapeake湾水质状况进行了评价,并对比了季节差异,之后Williams等(2009)研究发现P-IBI指数与Chesapeake湾河口盐度和营养盐浓度密切相关;Kane等(2009)在前人研究的基础上加入了浮游动物指标,并分别应用在美国Erie湖和伊朗南部湿地的研究,研究结果表明浮游藻类的P-IBI指数评价结果具有一定的参考意义,在河流水体方面,Wu(2012)构建了适用于德国平原河流的浮游生物完整性评价体系,评价应用的结果表明人类活动是影响该区域水生态健康状况的主要因素。

众多研究表明,不同生物类群指标所构建的生物完整性评价体系在不同地区和不同类型的河流评价中均具有一定的可行性(Simon, 1995)。与单一的水质生物学指标相比,生物完整性指标考虑的要素更全面、更综合,因此在河流生态健康研究与管理中的应用十分广泛(Karr and Chu, 1999)。但Karr(1999)也指出,没有任何一个评价体系是完全适用于所有地区或者不同类型水体的,如美国各州都提出了适用于本地区的完整性评价体系(Ohio EPA, 1988; Barbour et al., 1996)。然而,要发展适用于某一个地区的评价体系,就需要对本地区河流中的水生生物进行全面的了解和详细的数据分析。此外,流域尺度上建立的评价指标体系也仍然需要随着数据的不断丰富和对流域水系认识的不断深入而逐步改进(Karr and Chu, 2000; 周上博, 2013)。例如,Southerland等(2007)在美国马里兰州生物溪流调查计划中(Maryland biological stream survey, MBSS)研究了基于鱼类和大型无脊椎动物的IBI体系,针对不同地理条件(如平原、山地、高原等)改进并完善了河流生态健康评估的生物完整性指标体系。

1.1.4 我国河流浮游藻类群落生态学研究及其在生态评价中的应用

1.1.4.1 河流浮游藻类特征早期研究

有关河流浮游藻类与水环境关系的早期报道,来自于对不同地区河段藻类的考察结果。例如,有关东北黑龙江河段和图们江河段的研究(章宗涉和沈国华 1959; 章宗涉等,

1983),集中讨论了浮游藻类与径流的关系,以及其在水污染监测中的作用;又如,来自西藏的考察报告,揭示了西藏南部地区和珠穆朗玛峰地区的藻类特征(饶钦止,1964;饶钦止等,1973)。1991年,章宗涉和黄祥飞出版了《淡水浮游生物研究方法》一书,之后有关河流浮游藻类研究的报道逐渐增多,对于河流浮游藻类的基本特征进行了较为广泛的分析与总结。例如,肖慧等(1992)对流经宜昌境内的黄柏河口水域浮游藻类及其初级生产力进行了调查研究,田家怡(1995)、陈桷等(1996)分别报道了有关山东小清河、贵州濠阳河浮游藻类的调查结果。

进入21世纪以来,由于我国水环境污染和水生态问题日益加重,有关河流浮游藻类的研究进展加快,对河流浮游藻类规律与特征方面的研究开始涉及不同地区的多条大河。例如,在我国西北内陆黑河流域,有学者研究了黑河流经地区水体中浮游藻类的组成及其地理分布特征(李鹏等,2001),指出黑河流域浮游藻类的地理分布具有与河水水文分带相对应的垂直地理分异,但同时也受到水环境特征的影响。又如,洪松和陈静生(2002)通过对黑龙江、松花江、海河、黄河、长江、汉江、赣江、湘江和珠江等地已有研究结果的对比分析,表明几乎在所有河流中,硅藻的密度都是最高的,只有个别河流以绿藻密度最高。从东北到华北,河流中各类水生生物密度均趋于降低,至黄河达最低值,再向南又趋于升高,到华南浮游藻类密度重新上升到与东北河流属同一数量级。河流从上游到下游,其浮游藻类表现出种类减少的趋势,上游多为喜净水、急流的种类,中下游平原区多为喜缓流的种类,在河口则常见一些咸淡水种类。

1.1.4.2 不同河流浮游藻类特征的初步对比分析

近几年来,国家加大了对水环境保护和水生态改善研究的支持力度,涌现出一批有关河流浮游藻类与生境关系的研究成果,特别是针对浮游藻类时空变化特征的研究大大增加,研究的系统性和完整性亦显著提高。新近发表的赣江流域浮游藻类群落结构与功能类群划分(刘足根等,2012),通过赣江流域60个采样点的数据,基于生境、耐受性和敏感性分析,尝试了对大型河流中的浮游藻类进行功能群划分。同时期,来自于东江流域47个样点数据的研究结果,揭示了东江干流夏季浮游藻类与生境的关系,研究表明,东江干流出现频率最高的藻类植物依次是隐藻门、蓝藻门、硅藻门和绿藻门物种,细胞密度最大的是绿藻门和硅藻门植物,溶解氧、电导率、 COD_{Mn} 和总磷等是影响浮游藻类生存与分布的主要因子(江源等,2011)。白明和张萍(2010)通过对9个点位浮游藻类群落的反复调查和分析,揭示了浮游藻类丰度和生物量在5~9月的变化特征,同时指出了绿藻和蓝藻的优势地位。刘明典等(2007)通过对沅水9个河流生境不同季节的调查数据,揭示了浮游藻类的季节变化特征,秋季和春季分别是物种丰度最高和最低的季节,除一个采样点外,硅藻是物种数量最多的类群,且浮游藻类种类丰度从上游至下游大体呈递增趋势。此外,黑龙江黑河段浮游藻类群落的年季动态研究(孙春梅和范亚文,2009)、澜沧江囊谦段夏秋浮游藻类群落结构初步研究(陈燕琴等2012)、淮河支流沂河等河段中不同季节浮游藻类组成的变化(高远等,2009)、新疆霍尔果斯河浮游藻类的调查分析(蔡林钢等,2008)等,均为我国浮游藻类特征及其与生境关系的研究提供了丰富的基础数据和科学研究案例。

通过对来自不同河流的浮游藻类调查数据的对比分析,可以看出(表1-1),我国河流中

续表

河流名称	生境	河段经纬度	海拔 (m)	调查 时间 (年)	浮游藻类特征				引用文献
					种类最多的 前三个门类	生物量最多的 前三个门类	前三个优势属种	平均密度 (10^4 cells/L)	
西藏南部	高原 河流	28°N, 87°E	5000	1966	硅藻门、绿藻门、蓝藻门	—	—	—	邱绍扬等(2005); 黄报远等(2009); 陈栢等(1996); 沈琪军等(2004); 吴乃成等(2007); 孙春梅和范亚文(2009); 陈燕琴等(2012); 饶钦止(1964); 饶钦止等(1973); 李鹏等(2001); 蔡林钢等(2008); 周永兴和李伟(2009); 陈锦萍(1992); 田家怡(1995); 禹娜等(2010); 宋金伟等(2007); 白晓慧等(2008); 付贵萍(2008); 冯佳(2011); 张才学等(2010); 高远等(2009); 刘明典等(2007); 刘足根等(2012); 白明和张萍(2010); 计勇(2012); 邓星明和吴生桂(1988); 张桂华(2011); 章宗涉和沈国华(1959); 洪松和陈静生(2002);
珠穆朗玛地 区	高原 河流	30°N以南, 86°~91°E	5000	1961	硅藻门、绿藻门、蓝藻门	—	—	—	
黑河	内陆 河流	38°~40°N, 99°~102°E	1200~ 4000	1997	绿藻门(33%)、硅藻门 (31%)、蓝藻门(15%)	绿藻门、硅藻门、蓝藻 门	—	—	
霍尔果斯河	西北 内陆	43°30'N, 80°15'E	1200	2007	硅藻门(55%)、绿藻门 (24%)、蓝藻门(13%)	硅藻门、蓝藻门、蓝藻 门	颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)、普通等片 藻(<i>Diatoma vulgare</i>)、脆杆藻属 (<i>Fragilaria</i>)	—	
滇池宝象河	城市 河段	24°57'N, 122°45'E	1850~ 2000	2004	—	—	—	398.35	
福州城区内 河	城市 河段	26°04'N, 119°18'E	<20	1989	绿藻门(44.6%)、硅藻门 (23.6%)、裸藻门 (12.4%)	绿藻门(50.2%)、蓝 藻门(26.6%)、硅藻 门(16.0%)	栅藻属(<i>Scenedesmus</i>)、舟型藻 属(<i>Nanictula</i>)、十字藻属(<i>Croci- genia</i>)	6.30~99.70	
山东小清河	城市 河段	36°39'N, 119°01'E	<20	1990	绿藻门(46.0%)、硅藻门 (32.0%)、裸藻门(9.0%)	—	—	—	
上海城区河 道	城市 河段	31°05'N, 121°21'E	<10	2007	绿藻门(41.0%)、裸藻门 (19.0%)、硅藻门 (19.0%)	—	棒条藻属(<i>Rhabdoderma</i> sp.)、 扭曲小环藻(<i>Cyclotella comta</i>)、 小球藻属(<i>Chlorellanulgaris</i> sp.)	—	

续表

河流名称	生境	河段经纬度	海拔 (m)	调查 时间 (年)	浮游藻类特征				引用文献
					种类最多的 前三个门类	生物量最多的 前三个门类	前三个优势属种	平均密度 (10 ⁴ cells/L)	
内江	城市 河段	32°17'N, 119°30'E	<10	—	绿藻门(33.3%)、硅藻门 (29.8%)、蓝藻门 (20.2%)	蓝藻门(85.6%)、绿 藻门(6.1%)、硅藻门 (3.4%)	颤藻属(<i>Oscillatoria</i>)、隐藻属 (<i>Cryptomonas</i>)、星球藻属(<i>As- terocapsa</i>)	0.06~1.17	邱绍扬等(2005); 黄报远等(2009); 陈核等(1996); 况琪军等(2004); 吴乃成等(2007); 孙春梅和范亚文(2009); 陈燕琴等(2012); 饶钦止(1964); 饶钦止等(1973); 李鹏等(2001); 蔡林钢等(2008); 周永兴和李伟(2009); 陈锦萍(1992); 田家怡(1995); 禹娜等(2010); 宋金伟等(2007); 白晓慧等(2008); 付贵萍(2008); 冯佳(2011); 张才学等(2010); 高远等(2009); 刘明典等(2007); 刘足根等(2012); 白明和张萍(2010); 计勇(2012); 邓星明和吴生桂(1988); 张桂华(2011); 章宗涉和沈国华(1959); 洪松和陈静生(2002);
上海交通大学大 学大闵行校区 河道	城市 河段	31°05'N, 121°21'E	<10	2006	蓝藻门(38%)、绿藻门 (27%)、硅藻门(23%)	—	—	—	
深圳观澜河	城市 河段	22°41'N, 114°2'E	50	2006	蓝藻门(33.3%)、绿藻门 (29.1%)、硅藻门 (29.1%)	蓝藻门、硅藻门、绿藻 门	泽丝藻(<i>Limnothrix redekei</i>)、假 鱼腥藻(<i>Pseudanabaena limneti- ca</i>)、银灰平裂藻(<i>Merismopedia glauca</i>)	—	
汾河太原段	城市 河段	37°52'N, 112°31'E	800	2009	蓝藻门(46%)、绿藻门 (34%)、硅藻门(16%)	蓝藻门(92%)、绿藻 门、硅藻门	小席藻(<i>Phormidium tenue</i>)、银 灰平裂藻(<i>Merismopedia glau- ca</i>)、尖针杆藻	875~59 653	
小东江茂名 段	平原 河道	21°36'N, 110°50'E	<20	2007	绿藻门(42.6%)、蓝藻门 (27.9%)、硅藻门(21.3)	蓝藻门(49.3%)、绿 藻门(38.6%)、硅藻 门(10.2%)	颤藻属(<i>Oscillatoria</i>)、栅藻属 (<i>Scenedesmus</i>)、菱形藻属 (<i>Nitzschia</i>)	11.40~19.50	
沂河	平原 河道	35°N, 118°E	<20	2006~ 2007	绿藻门(36.0%)、硅藻门 (35.9%)、蓝藻门 (16.4%)	蓝藻门(39.9%)、硅 藻门(26.0%)、绿藻 门(24.0%)	—	1 909~6 273	
沅水	大河 干流	27°~29°N, 109°~112°E	100	2005	硅藻门(43.5%)、绿藻门 (36.7%)、蓝藻门 (15.0%)	蓝藻门(60.2%)、硅 藻门(29.4%)、绿藻 门(5.0%)	巴豆叶脆杆藻(<i>Fragilaria cro- tonensis</i>)、颗粒直链硅藻(<i>Melo- sira granulata</i>)、鞘绿微囊藻 (<i>Microcystis aeruginosa</i>)	22.10	