

GANSUSHENG WEIHE HELIU JIANKANG PINGGU

甘肃省渭河河流 健康评估


刘进琪 陈颂平 孙亚玲 著



GANSUSHENG WEIHE HELIU JIANKANG PINGGU

甘肃省渭河河流健康评估

刘进琪 陈颂平 孙亚玲 著

 甘肃科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

甘肃省渭河河流健康评估 / 刘进琦, 陈颂平, 孙亚玲著. -- 兰州 : 甘肃科学技术出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5424-2471-6

I. ①甘… II. ①刘… ②陈… ③孙… III. ①渭河环境生态学评价 IV. ①X522

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第280600号

甘肃省渭河河流健康评估
刘进琦 陈颂平 孙亚玲 著

出版人 王永生
责任编辑 杨丽丽(0931-8773230)
封面设计 陈妮娜

出版 甘肃科学技术出版社
社址 兰州市读者大道568号 730030
网址 www.gskejipress.com
电话 0931-8773274 (编辑部) 0931-8773237 (发行部)
京东官方旗舰店 [https://mall. jd. com/index-655807.html](https://mall.jd.com/index-655807.html)

发行 甘肃科学技术出版社 印刷 甘肃兴业印务有限公司
开本 710mm×1020mm 1/16 印张 13.25 字数 230千
插页 1
版次 2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷
印数 1~1 000
书号 ISBN 978-7-5424-2471-6
定价 45.00元

图书若有破损、缺页可随时与本社联系:0931-8773237
本书所有内容经作者同意授权,并许可使用
未经同意,不得以任何形式复制转载

前 言

河流是水的主要载体,是生态系统的血脉,河流的健康状况直接影响生态环境系统。开展河流健康评估,是维护水域水量、水质、水生态的功能与资源属性,防止水源枯竭、水污染和水生态系统恶化所采取技术、经济、法律、行政等措施的重要基础和技术前提。甘肃地处黄河、长江上游源头区及河西内陆区,是我国生态屏障建设的重要组成部分,生态环境的好坏不仅关乎甘肃自身的发展,也直接关系到我国西北乃至全国生态安全和经济发展。因此,以渭河流域为典型区域,开展河流健康评估,对于今后开展河流健康管理工作具有非常重要的探索和指导意义。

《甘肃省渭河河流健康评估》针对渭河河流健康问题,通过文献资料的查阅、实地调查和监测,得到影响河流健康的基础资料,并将其分为河流形态特征、水文特征、水环境状况、水生生物状况、陆生生物状况五类评价参数,每类参数选取重要指标,按照相关评价标准或方法分别进行评价。其中河流形态特征以河流自然状态的接近程度为标准,在定量分析与定性描述的基础上,评价河道改变、河道弯曲程度、河岸稳定性等指标,得出渭河干流河流形态为健康状态。水文特征从多年气温和降水趋势性特征分析入手,着眼于径流年际年内变化特征,最后选取径流变差系列倾向率作为评价指标,水文特征为不健康状态。水环境状况从流域水功能区水质状况、入河排污口状况、河流纳污能力三方面做了分析,按河流水质类别划分健康等级,水环境为不健康状态。水生生物状况通过渭河历史资料记载和现场调查对生物种类、生物量等指标的



对比,并结合河流水生生物变动规律划分其健康等级,渭河干流水生生物为亚健康状态。陆生生物状况运用归一化植被指数获得不同年份植被覆盖度空间分布图,对不同覆盖等级对应的河长进行加法合成,最后得出渭河陆生生物为亚健康状态。在此基础上,梳理各类参数结果,运用物元可拓原理,将多指标评价转变为单目标决策问题,结合专家打分方式确定各指标权重系数,进而通过综合关联度的定量分析,得出渭河干流(甘肃境内)河流健康总体状况为亚健康的结论。本研究构建了一套适用于我国西北干旱区的河流生态系统健康评价体系,为甘肃省乃至西北干旱区开展水生态补偿机制建设提供技术支撑,也为广泛开展的河流管理工作和河长制的建立提供了基础数据和决策依据。

本书在编写过程中,中国科学院西北生态环境资源研究院沈永平,南京水利科学院谢自银,甘肃省水环境监测中心赵治文、郑自宽等专家提供了重要的资料和技术帮助,并参考了许多学者的著作、论文和文献,在此谨向他们表示诚挚的感谢。本书的编写过程是一个研究和摸索的过程,加之作者受学识水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见。

作者

2017年11月

目 录

第一章 概 述	001
第一节 渭河流域概况	002
第二节 河流健康研究进展	005
第三节 研究目的及方法	015
第二章 河流形态特征调查分析	019
第一节 河流形态健康评价模型	019
第二节 渭河形态健康评价	022
第三节 小结	032
第三章 水文特征调查分析	033
第一节 气候变化特征分析	033
第二节 径流特征变化	036
第三节 小结	043
第四章 水环境状况调查分析	045
第一节 渭河流域水功能区区划	045
第二节 水功能区水质状况	048
第三节 入河排污口调查	053
第四节 河流纳污能力分析	056
第五节 小结	058



第五章 水生生物状况调查分析	060
第一节 渭河流域水生生物概况	060
第二节 评估技术路线及方法	062
第三节 水生生物资源概况	066
第四节 水生生物健康评估	130
第五节 小结	133
第六章 陆生生物状况调查分析	136
第一节 渭河流域动物状况	136
第二节 森林植被类型及分布	140
第三节 历史时期植被的演化变化	142
第四节 动植物多样性概况	155
第五节 陆生生物现状评价	161
第六节 小结	169
第七章 渭河流域河流健康综合评估	178
第一节 评估原理	178
第二节 模型分析	181
第八章 结论与建议	190
第一节 结论与分析	190
第二节 存在问题及建议	192
主要参考文献	194

第一章 概 述

美丽中国,是党的十八大赋予人民生活的美好期盼。天蓝、地绿、水清,是可见的美丽中国。建设生态文明,致力水美中国,是水利行业的职责,也是广大水利工作者对中华民族永续发展做出的郑重承诺。水是基础性自然资源和战略性经济资源,是生态环境的控制性要素。我国基本水情特殊、水资源供需矛盾突出、水生态环境容量有限。长期积累的水资源水环境突出问题,已成为制约经济社会发展的一个“心头之患”。水利工作落实好创新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念,当前最为紧迫、最为关键的就是要坚持绿色发展理念,全面贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期水利工作方针,大力推进水生态文明建设,节约利用水资源,改善城乡水环境,维护健康水生态,保障国家水安全,加快推动形成节约资源和保护环境的空间格局、经济结构、生产方式、生活模式,以水资源可持续利用保障经济社会可持续发展。

水作为生态环境的主要控制性因素,水清是生态文明建设的重要组成和保障。河流是水的主要载体,是生态系统的血脉,河流的健康状况直接影响生态环境系统。开展河流健康评估,是维护水域水量、水质、水生态的功能与资源属性,防止水源枯竭、水污染和水生态系统恶化所采取技术、经济、法律、行政等措施的重要基础和技术前提。研究河流在人类生产生活影响下的变化,分析河流健康存在的主要问题,对于有效保护水资源和水生态,指导流域水资源持续开发利用都具有重要意义。

甘肃地处黄河、长江上游源头区及河西内陆区,是我国生态屏障建设的重要组成部分,生态环境的好坏不仅关乎甘肃自身的发展,也直接关系到我国西北乃至全国生态安全和经济发展。因此,以渭河流域为典型区域,开展河流健康调查评估,提出西北干旱地区河流健康评估的指标体系,探索西北干旱地区河流健康评估方法,初步建立渭河河流健康评估模型,对于今后开展河流健康管理具有非常重要探索和指导意义。



第一节 渭河流域概况

1.1.1 渭河流域概况

渭河是黄河的最大支流,位于我国西北黄土高原的东南地区,发源于甘肃省渭源县,东至陕西省渭南市潼关县汇入黄河。南有东西走向的秦岭横亘,北有六盘山屏障。渭河流域可分黄土丘陵沟壑区和关中平原区。全长 818 km,集水面积 134766km²。上游以及北岸泾河、洛河等支流,流经黄土高原,夹带大量泥沙。中、下游渠道纵横。渭河流经甘肃、宁夏、陕西三省区 13 个地市 86 个县市,其中流域面积甘肃占 44%,宁夏占 6%,陕西占 50%。甘肃省境内集水面积 56890km²,河长 364.9 km。

渭河流域地貌复杂,包括有山地、川地、平原、丘陵、沟壑等多种类型。山地主要有横贯陕甘的秦岭山脉,六盘山、陇山、子午岭、黄龙山,最高峰是太白山。断陷盆地包括关中冲积平原及黄土台原,黄土高原包括陇东、宁南、陕北的高原沟壑及丘陵沟壑区。地形特点为西高东低,西部最高处高程 3495 m,自西向东,地势逐渐变缓,河谷变宽,入黄口高程与最高处高程相差 3000 m 以上。渭河流域大部分为深厚的黄土覆盖,质地疏松,且多孔隙,垂直节理发育,富含碳酸钙,易被水蚀。北部为黄土高原,南部为秦岭山区,地貌主要有黄土丘陵区、黄土塬区、土石山区、黄土阶地区、河谷冲积平原区等。

地质构造上的原因,渭河流域属不对称水系。北岸支流多发源于黄土丘陵和黄土高原,相对源远流长,主要流经黄土高原,比降较小,洪枯流量相差悬殊,泥沙含量大,以悬移质为主,是渭河的主要来沙支流。南岸支流均发源于秦岭山区,源短流急,谷狭坡陡,径流较丰,主要流经土石山区,比降较大,水流湍急,泥沙以推移质为主,含沙量小,水力资源较为丰富。渭河支流众多,南岸的数量较多,但较大支流集中在北岸,水系呈扇状分布。集水面积 500km² 以上的支流有 19 条,北岸汇入的有秦祁河、咸河、散渡河、葫芦河、牛头河、通关河、千河、漆水河、泾河、石川河、北洛河;南岸汇入的有榜沙河、大南河、石头河、黑河、藉河、泮河、灞河。其中泾河、北洛河虽然是黄河的二级支流,但习惯上都将这两条河作为黄河的重要支流,视为一级支流,常与渭河并称为泾、洛、渭河。

1.1.2 渭河干流上游甘肃段概况

渭河上游甘肃段是指渭河的源头至甘肃和陕西交界之间的渭河干流区域。流域面积 $2.76 \times 10^5 \text{ km}^2$, 河长 364.9 km 。如图 1-1, 干流两岸支流众多, 属不对称水系, 水系呈扇状分布。北岸有秦祁河、咸河、散渡河、葫芦河、牛头河等支流汇入, 流经黄土高原, 洪枯水流量相差悬殊, 泥沙含量大, 是渭河的主要来沙区域。南岸有榜沙河、大南河、藉河等支流汇入, 主要流经土石山区, 河流比降大, 水流湍急, 流域植被覆盖率高, 是主要的产流区。本次研究主要选取渭河上游甘肃段, 以下凡称渭河流域均指渭河流域甘肃段。



图 1-1 渭河流域水系图

流域内辖天水、定西、平凉三市, 有清水、秦安、甘谷、武山、陇西、漳县、渭源、通渭、会宁、静宁、庄浪、张家川回族自治县等 12 个县和秦州、麦积 2 个区。流域内现有人口 533.29 万人, 国内生产总值 299.54 亿元, 耕地 1447.04 万亩, 粮食产量 179.39 万吨。是甘肃省兰州市以外、人口密度最大、经济最发达的区域。

流域多年平均降水量 515.1 mm, 最大年降水量为 711 mm, 出现在 1967 年,



最小年降水量 339 mm, 出现在 1997 年。以流域控制站北道水文站实测资料计算多年平均径流量 11.35 亿立方米, 最大径流量 30.34 亿立方米, 与最大降水同时出现在 1967 年, 最小径流量只有 1.29 亿立方米, 同样是降水最小的 1997 年。流域多年平均气温 8.7℃, 最高气温 10.1℃, 出现在 2006 年, 最低气温 7.6℃, 出现在 1976 年, 气温分布由南向北、由西向东递增。

流域土地利用类型可以分为天然林草类、人工林草类、农村及城镇居民用地类和包括梯田在内的其他类四种分别计算。天然林草类面积约 1.45 万平方千米, 主要分布在流域南部以东缘。水浇地及人工林类面积约 0.845 万平方千米, 主要分布在河谷及川地。农村及城镇居民类面积约 0.057 万平方千米, 其他类面积约 0.405 万平方千米, 主要分布在中部及北部区域。其中覆盖面积最大的是水浇地约 0.838 万平方千米, 占总面积的 30.4%, 其次是中覆盖草地约 0.599km², 占总面积的 21.7%, 最小的是湖泊, 不到总面积的 0.012%。

地质构造上属陇中盆地东南西北四环高中间低, 形成标准的巨型向斜盆地构造, 局部地方有断层。其地层结构由老到新依次为第三纪红色及紫色沙砾岩, 红色、青灰色黏土和第四纪马兰黄土。此外, 在沟谷中有近代沉积层和坡积物。沟壑为底部切沟, 溯源侵蚀严重, 在土壤侵蚀类型上可作为黄土丘陵沟壑区第三副区的典型代表。流域内有多种土壤分布, 以梁坡的黄土质灰褐土分布最广(俗称鸡粪土, 中壤), 厚度在 50cm 以上, 其余土种分布较少。主要农作物有小麦、玉米、土豆等, 无原生林木。人工林多系幼林, 郁闭度低。野生草本植物主要有白草(*Pennisetumflaccidum*)、鹅冠草(*Roegneriaakanoji*)、硷草(*Elymusdahuricus*)、蒿类(*Pedicularis*)等, 因过度放牧生长不良。

流域内水利工程包括水库、水电站、水闸、泵站、堤防等。流域水库总数 34 座, 其中 III 级水库 2 座, IV 级水库 21 座, V 级水库 11 座。渝河东峡水库、散渡河锦屏水库为 III 级水库, 分别位于平凉市静宁县和定西市通渭县, 且均为年调节土质挡水坝。渭河干流有定西市渭源县峡口水库和天水市武山县侯堡水库, 分别为 IV 级和 V 级水库。水电站共 8 座, 一座在建, 其余均为 V 级水电站, 所有水电站均位于渭河支流。水闸共 30 处, II 级一处, III 级一处, IV 级 2 处, V 级 10 处, 其中渭河干流上水闸有 6 处, 均位 V 级水闸。泵站共 136 座, III 级 2 座, IV 级 69 座, V 级 65 座。堤防共 61 处, 其中 1 处在建。2 级堤防 8 处, 4、5 级堤防 53 处。

第二节 河流健康研究进展

1.2.1 概述

健康河流是指在一定时期特定河流的社会功能与自然功能和谐并能够均衡发挥的河流。其标志是具有良好的水质、水沙流畅的河床与可维系的河流生态系统。河流健康的指示性因子应是能够基本反映河流自然功能的因子,包括河床形态、水质、河流生态和河川基流,但因子的种类和数量因河而异,其量化标准的确定则要充分考虑河流自然功能和社会功能均衡发挥的需要和流水情背景条件的变化。河流健康的核心是有相应足够而洁净的河川径流,因此保障河流一定的环境流量对维护河流健康十分重要。人类过多抽取河川径流和开发水电、不当地调控洪水和泥沙、过多地向河流排污和过多改变关键物种栖息地水流环境的活动,均会对河流健康造成严重伤害。

人们提出“河流健康”理念已有十多年,并开展了许多恢复河流健康的实践,但对河流健康的标志及其评价指标的选择和确定原则等并未达成共识,因此不同学者提出的河流健康指标方法与种类不尽相同。国外研究者一般将河流健康等同于河流生态系统健康,所提出的河流健康指标多为表征水生生物种类和数量、河流水体质量和水生生物栖息地质量的因子。国内研究者提出的河流健康指标不仅包括生态方面的因子,而且还有反映河床淤积程度、河道形态及其通畅程度、河流水体质量、河流的社会服务能力等方面的因子。总体上讲,由于人们对河流健康的内涵认识不同,目前所提出的指标多为定性成果;有些指标互为因果,如水生生物生存状态指标和生态需水、水资源开发利用率和环境流量、河床形态指标和排洪输沙能力等;有些甚至将公众意识和对河流工程的管理水平等也作为河流健康指标。此外,河流健康本底特征还与河流所处自然地带有关系。由此可见,河流健康研究尚处于探索阶段而方兴未艾。

生物与环境之间的作用和反作用,使生物的许多特性打上了环境的烙印。所谓指示生物又叫作生物指示物(bio-indicator),是指那些在一定地区范围内,能通过生物的生物学特性、种群或群落等的变化来反映环境或某一环境因子特征的生物^[1],包括指示植物、指示动物、指示微生物等。指示生物广泛应用于



大气、土壤、水质监测及其评价,常用的水体污染指示生物有浮游生物、鱼类、底栖动物、两栖动物、水生敏感植物、软体动物等。

关于对健康的河流生态系统的认识,大多数学者所认可的观点是健康的河流生态系统不仅能够保持其自身结构和功能的完整性,而且能够维持河流对人类可持续的服务功能^[2]。世界各地学者关于评价河流健康开展了很多研究,多指标评价法(multi-variable assessment method)是目前应用最为广泛的河流健康评价方法,多指标评价法采用能够分别代表河流生态系统不同组分的多个指标来反映生态系统所处的状态,最初采用鱼类作为指示生物,后来也采用藻类、大型无脊椎动物等其他生物类群^[3]。国内外已经建立的河流健康评价方法复杂多样,基于不同指示生物建立的河流健康评价多指标体系,按其评价内容可以分为4大类:①基于鱼类的多指标评价体系;②基于硅藻的多指标评价体系;③基于大型无脊椎动物的多指标评价体系;④同时基于多种生物的多指标评价体系。大型无脊椎动物作为指示生物的评价方法是目前河流健康评价的主流,应用多种指示生物的多指标评价体系近年来也受到了许多学者的关注。相对于单一生物指数而言,多指标评价体系能够更为全面地反映河流健康状况,但现阶段建立的指标体系仍然存在着诸多不足,因此如何准确客观地评价人为干扰对水生生态系统的影响一直是水生生态学家研究的热点之一。

1.2.2 河流健康指示生物

1.2.2.1 鱼类

鱼类一般个体较大,捕获相对容易,种类丰富,活动能力强;鱼类与人类关系密切,对人为干扰的变化表现敏感,对不同时空尺度下自然条件的变化表现的不敏感^[4];鱼类群落可以由几个占据不同营养级及其不同摄食功能团的物种组成;鱼类处在食物链的较高位置,能够反映生态系统的整体状况,因此鱼类一直是水生生物研究的焦点。

Karr^[5]在北美基于鱼类设计的生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)是多指标评价法的典型代表。IBI应用物种丰富度、生境、营养团结构、生物个体健康状况、丰度等描述鱼类群落特征的12个指标来反映河流生态状况。此后基于鱼类的河流健康评价主流仍然是应用和发展生物完整性指数。国外, Oberdorff和Hughes^[6]在塞纳河(位于法国北部)中基于鱼类的科级分类水平计算IBI值,比较了基于鱼类的IBI评价结果和单独的水质指标结果二者的差异

性。Roth^[7]设计了美国马里兰州第一个基于鱼类的生物完整性指数IBI,随后又对其进行了优化。为简化评价指标体系,Casatti等通过验证表明只需选择土著物种数、优势种、自游种、忍受低氧的鱼类个体数量、鱼类忍受度共5个鱼类指标就可以反映巴拉那河(位于南美洲)河流健康状况。鱼类是墨西哥过去十几年应用最为广泛的生物检测工具,墨西哥应用的基于鱼类的IBIs包含了可以反映群落特征的39项指标^[8]。国外基于鱼类建立的IBIs,采用的指标多种多样,表1-1给出了IBIs常用的26个生物学指标。

表1-1 基于鱼类生物完整性指数常用指标

分类	物种组成 其丰富度	营养结构	繁殖	耐受性	健康状况 及其丰度
指标	总物种数;优势种;外来种;土著物种数;底栖鱼类个体数%;敏感种;亲缘物种数;区域代表性鱼类数;鱼类种类数	底栖种类数;肉食性个体数量%;杂食性个体数量%;植食性个体数量%;昆虫食性个体数量%;鱼食性鱼类%	产卵鱼类;特殊产卵鱼类;砾石区产卵鱼类种类个体%;筑巢护卵行为鱼类	耐受性鱼类%;敏感性鱼类%	单位捕捞量;土著种类个体数及其生物量;单位捕捞努力量;畸形、病态鱼类%;寄生物数量

国内,郑海涛^[9]选择怒江贡山、福贡、六库和保山4个江段,应用基于鱼类的IBI进行了分析研究。裴雪皎等^[10]从23个候选中通过指标值分布范围、判别能力分析和相关性分析筛选了9个指标分别采用1、3、5赋值法和比值法计算采样点的IBI分值,评价了辽河流域健康状况。总体上,国内应用鱼类评价河流健康状况的研究比较少见,且大多数参照国外的IBIs体系评价河流健康状况,尚未建立符合我国地域环境特征的评价指标体系。

除了完善和发展IBIs外,一些学者通过鱼类受人为干扰后生态效应的研究,尝试建立能够满足特殊要求的新的评价指标体系。Helms和Feminella^[11]认为,鱼类可以反映河流在受人为干扰后景观层次上结构和功能的变化。Kanno等^[12]考虑到美国新英格兰南部河流流域热梯度对鱼类集群类型的影响,设计了基于鱼类的双MMI评价体系,不仅考虑了河流流域面积的影响,而且能够反映景观层次上的人为干扰。

地中海河流鱼类群落物种数少、特有种多、鱼类种群时空变化大,应用传统的基于鱼类的多指标指数很难评价河流健康状况,群落完整性指数(index of community integrity, ICI)根据鱼类种群中某些物种的消失和出现来评价河流的健康状态,避免了由于季节变化和物种多度估算误差对IBIs评价造成的潜在影响^[13]。



河口地区处于水路交界地带,受到复杂的外界干扰,生态环境敏感,鱼类资源丰富,为评价这一特殊区域的生态环境质量,建立了一系列基于鱼类的河口健康评价方法。这类常见的河口健康评价方法有:河口健康指数(estuarine health index, EHI)^[14]、河口生物完整指数(estuarine biotic integrity index, EBI)^[15]、河口鱼类群落指数(estuarine fish community index, EFCI)^[16]、栖息地鱼类指数(habitat fish index, HFI)^[17]、特殊地带基于鱼类的河口生物指数(zone-specific fish-based estuarine biotic index, ZEBI)^[18]等。

1.2.2.2 硅藻

硅藻是河流生态系统中的初级生产者,对生态系统其他组分的影响显著,硅藻分布范围广,世代周期短,物种丰富,采样简单,对环境变化敏感,且不同水体中组分不同,因此硅藻是常用的河流健康评价指示生物之一。极小异极藻(*Gomphonema parvulum*)和小舟形藻(*Navicula minuscula*)可以指示热带河流富营养状态,窄异极藻(*Gomphonema angustum*)、念珠等片藻(*Diatom moniliformis*)可以指示贫营养状态^[19]。硅藻物种相对丰度和群落整体结构可以反映污水排放强度对水质的影响等^[20]。根据硅藻对资源利用特点及其对外界物理干扰的适应策略,可将硅藻划分成低位团、高位团、运动型。在营养物含量低的情况下,低位团成为优势种;营养物含量高时,高位团成为优势种;运动型对各种环境因子最为敏感,利用硅藻生态功能团的这种生态响应可以评价河流生态状况^[21]。基于硅藻的生态响应,建立了一系列的生物评价指数如南美大草原硅藻指数(Pampean diatom index, IDP)^[22]、澳大利亚河流硅藻种类指数(diatom-species index for Australian rivers, DSIAR)^[23]、硅藻集群属指数(generic index of diatom assemblage, GDI)^[24]、硅藻模型关联(diatom model affinity, DMA)^[25]等。应用硅藻评价河流健康状况的一个重要特点是应用范围广泛。一方面,硅藻不仅可以像鱼类、大型无脊椎动物一样广泛适用于评价小型河流的健康状况,也适用于大型河流的健康评价^[26]。Susanne等^[27]通过比较分析大型植物、硅藻及其其他底栖藻类的物种组成及其丰度,认为硅藻对环境变化的反应最快、底栖藻类次之,大型植物最慢。大型植物指数和其他底栖藻类指数受地区条件限制,硅藻指数则适用于更大范围。另一方面,硅藻生物指数适用于某些特殊环境条件下的河流健康评价。法国评价水域生态质量状况的生物硅藻指数(biological diatom index, BDI)的改进版BDI-2006能够反映酸性及其含盐量高的河流健康状况。Tudesque等认为,硅藻可以用来检测由于小规模的金矿活动造成的环境压力^[28]。Delgado等^[29]设计的硅藻多指标指数DIATMIB是敏感类群指数多

度、忍受类群多度、叶绿素 a 值这 3 个硅藻指标的组合,DIATMIB 能有效评价地中海地区间歇性河流的生态状况。

国内应用硅藻评价河流生态状况主要是应用国外已有的方法,缺乏与国内实际情况相符合的评价方法的研究和探索。齐雨藻等^[30]用硅藻群集指数(diatom assemblage index, DAI)和河流污染指数(river pollution index, RPI)评价了珠江广州河段的水质状况。赵湘桂等^[31]比较了特定污染敏感指数(specific pollution sensitivity index, SPI)和硅藻生物指数(diatom bioassessment index, DBI)与我国现有河流理化监测的差异性,结果表明 3 种方法的检测结果不完全一致。殷旭旺等^[32]应用硅藻生物指数(DBI)和着生藻类生物完整性指数(PIBI)评价了太子河健康状况。沈强等^[33]应用 PIBI 评价了浙江省 4 座大中型水库水源地的生态健康状况。

1.2.2.3 大型无脊椎动物

通过大型无脊椎动物对人为干扰生态效应的研究,如襁翅目幼虫在清洁河流中大量出现,福寿螺在中度污染的水体中较多,污染严重河流中颤蚓类、摇蚊幼虫数量增加等,河流中大型无脊椎动物经常作为指示生物来反映河流污染状况^[34]。基于大型无脊椎动物的河流健康评价方法可分为单一生物指数、多样性指数和多指标指数这 3 种方法。单一生物指数是河流健康评价应用最早的评价方法,常见的单一生物指数有 Goodnight-Whitley 生物指数、Trent 生物指数、IB 指数、Chutter 生物指数等^[35]。单一生物指数方法众多,操作简单,但常常只能反映河流污染状况。随着 Shannon 指数、Simpson 指数等多样性指数的建立,一些学者开始应用多样性指数评价河流健康状况。刘保元等^[36]应用 Trent 生物学指数、Shannon 多样性指数等生物学方法评价了图江门的污染状况。杞桑等^[37]比较分析了大型底栖动物多样性指数对水体的评价结果和理化水质检测结果。Ravera^[38]认为,不论 Trent 生物指数还是多样性指数均能有效区分清洁和严重污染的区域,但多样性指数(如 Simpson 指数)突出了物种之间的关联性,对河流健康状况的反映相对较为全面。

应用基于大型无脊椎动物的多指标指数进行河流健康评价是目前评价的主流。Kerans 和 Karr^[39]选用表述大型无脊椎动物特性的 13 个指标构成底栖大型无脊椎动物生物完整性指数(benthic macro invertebrate index of biological integrity, BIBI)。欧盟基于大型无脊椎动物建立了针对欧洲 28 种河流类型的 AQEM 评价系统来评价欧洲河流生态系统^[40]。随着河流中大型无脊椎动物的物种鉴定向种的水平发展及其生物种的特性研究,Haase 和 Nolte^[41]建立了基于



种级水平的无脊椎动物物种指数(invertebrate species index, ISI)来评价河流健康状况。Gabriels等^[42]基于大型无脊椎动物设计了可以针对不同流域面积河流的大型无脊椎动物多指标指数MMIF(multimetric macroinvertebrate index flanders)。Oliveira等^[43]从反映大型无脊椎动物特征的指标中根据其独立性及其区分干扰的能力选择了9项指标构成Guapiacu-Macau多指标指数(Guapiacu-Macau multimetric index, GMMI),这种多指标指数能够明显的区分不同强度的人为干扰,且评价结果受季节的影响不明显。法国Mondy等^[44]开发了以无脊椎动物为基础的I2M2复合指数,不仅符合欧盟水框架指令的要求,而且与法国标准的生物指数法相比,I2M2有一定的优势。

国内也逐渐应用大型无脊椎动物生物完整性指数进行河流健康评价。杨莲芳等^[45]应用EPT(浮游目(E)、襁翅目(P)、毛翅目(T)昆虫,EPT)分类单元数及科级生物指数(family biotic index, FBI)评价水质状况。王备新等^[46]应用B-IBI评价安徽黄山地区溪流河流健康状况。渠晓东等^[47]通过参数分布范围检验、敏感性分析和相关性检验筛选参数指标,应用BIBI指数评价了浑太河河流健康状况,通过与专家经验法构建的大型底栖动物生物完整性指数进行了对比,结果表明,两种方法的评价结果具有较好的一致性。

1.2.2.4 多种指示生物

人类活动在不同时空尺度上通过不同的方式影响河流生物类群,不同生物类群对同一压力的响应也存在差异。Schaumburg^[48]等认为,大型植物生活时间长,能够综合反映长时间的环境状况;硅藻生活史短,能够迅速地反映环境变化;底栖植物种类繁多,植物生活史有长有短,对环境反映兼有上述两者特性。Marzina等^[49]通过比较大型植物、鱼类、硅藻、大型无脊椎动物这4种河流生态质量要素(biological quality elements, BQEs)对人为压力响应的敏感性,发现4个BQEs指标对特定压力的响应敏感性有差别。综合应用多种生物评价河流健康或许能更好地反映人类对水生生态系统的影响^[50],同时欧盟水框架指令也建议欧盟成员国采用多种生物综合评价河流健康状况。

1.2.2.4.1 鱼类与大型无脊椎动物

鱼类和大型无脊椎动物都能对环境变化迅速做出反应^[51]。但单独基于鱼类或大型无脊椎动物的生物指数有时并不能完全反映河流生态状况,如北美地区受城市化干扰的河流中鲑鱼产量反而提高了^[52]。水质理化检测结果和鱼类生物量及其密度都不能很好地反映人为干扰。

鱼类和大型无脊椎动物会对环境压力表现出不同的响应,底栖大型无脊