

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM₁₀/PM_{2.5} 采样器的研制 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)

1992~2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素 郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)

青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究 陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)

化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析 李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)

烧结过程 NO_x 和 SO₂ 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响 任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)

废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究 宋磊, 张彬, 邓文 (3674)

黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)

海河流域河流生态系统健康评价 郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)

台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)

山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究 包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)

岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例 王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)

岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)

废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险 陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)

海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价 王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)

大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)

辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究 邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)

伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)

地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究 陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)

地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟 白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)

茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能 万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)

紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨 王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)

水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性 彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)

二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究 王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)

碳氮比对聚氨基酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)

城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究 佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)

快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估 韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)

重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试 杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)

应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量 李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)

植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)

硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)

外生菌根真菌对 Al³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应 张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)

长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳纬莹, 苏建强 (3869)

外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究 左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)

污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)

热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响 李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔骁勇, 马栋 (3888)

O₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响 杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)

施氮强度对不同土壤有机碳水平按树林温室气体通量的影响 李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)

¹³C₂O 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响 陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)

表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解 陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)

耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能 信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)

微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定 吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)

电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析 王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)

铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型 王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)

天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)

水生生物基准推导中物种选择方法研究 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)

生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究 李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)

金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能 牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)

CuO(-CeO₂)/Al₂O₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究 查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)

生物毒性检测在水质安全评价中的应用 徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)

某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析 周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)

北京市再生水利用生态环境效益评估 范育鹏, 陈卫平 (4003)

我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建 王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)

环境损害评估: 构建中国制度框架 张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)

《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)

海河流域河流生态系统健康评价

郝利霞, 孙然好, 陈利顶*

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 随着经济发展, 人类活动对河流生态系统的胁迫日益强烈, 生态系统健康状况受到严重威胁. 本研究以海河流域 2010 年 73 个采样点的水质、营养盐和底栖动物指标为例, 采用指标体系法, 从化学完整性和生物完整性两方面评价了流域内河流生态系统健康. 结果表明, 海河流域河流生态系统健康状况整体较差, 有 72.6% 的样点处于“极差”健康状态, 同时表现出明显的地区集聚效应; 河流水质与人类活动强度密切相关; 海河流域水体富营养化趋势明显; 流域内底栖动物多样性低, 清洁物种较少. 氨氮、总氮、总磷等营养盐指标是影响河流生态系统健康的关键因子, 应从控制上述指标入手, 遏制海河流域河流生态系统健康恶化. 对于河流生态系统健康评价, 多因子的综合评价法优于单因子评价法.

关键词: 海河流域; 河流生态系统健康; 水质; 营养盐; 底栖动物

中图分类号: X82 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3692-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.008

Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China

HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: With the development of economy, the health of river ecosystem is severely threatened because of the increasing effects of human activities on river ecosystem. In this paper, the authors assessed the river ecosystem health in aspects of chemical integrity and biological integrity, using the criterion in water quality, nutrient, and benthic macroinvertebrates of 73 samples in Haihe River Basin. The research showed that the health condition of river ecosystem in Haihe River Basin was bad overall since the health situation of 72.6% of the samples was “extremely bad”. At the same time, the health situation in Haihe River Basin exhibited obvious regional gathering effect. We also found that the river water quality was closely related to human activities, and the eutrophication trend of water body was evident in Haihe River Basin. The biodiversity of the benthic animal was low and lack of clean species in the basin. The indicators such as ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus were the key factors that affected the river ecosystem health in Haihe River Basin, so the government should start to curb the deterioration of river ecosystem health by controlling these nutrients indicators. For river ecosystem health assessment, the multi-factors comprehensive evaluation method was superior to single-factor method.

Key words: Haihe River Basin; health of river ecosystem; water quality; nutrient; benthic macroinvertebrates

河流生态系统对人类的发展非常重要, 不仅可提供食物、工/农业、生活及生态用水, 还具商业、交通、休闲娱乐等诸多服务功能. 此外, 河流生态系统还是生物圈物质循环的主要通道之一, 很多营养盐及污染物在河流中得以迁移和降解^[1]. 但是随着人口增长及社会经济的发展, 人类大量消耗水资源, 并排放污染物进入水体, 使河流生态系统自然功能和经济功能降低或丧失, 河流健康受到严重威胁. 然而, 由于对“河流健康”理解的差异性和不确定性以及很难建立一套普适的河流健康评价方法, 导致河流生态系统健康评价成为一项困难而复杂的任务^[2].

按照美国 1972 年的《水污染控制修正法》的规定“法案的目标是恢复与维持水体的化学、物理及生物的完整性”^[3], 一般认为, 健康的河流生态系统应具有结构完整性(即化学、物理、生物三方面的

完整性)^[4]和功能完整性(生态学进程), 具体表现为: 河流生态系统具有稳定性和可持续性, 即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力和抗干扰能力; 以及维持自身发展和进化的能力^[2,5,6].

我国河流生态系统健康评价起步较晚, 最早始于 1992 年杨莲芳^[7]等利用 EPT(Ephemeroptera 蜉蝣目, Trichoptera 毛翅目和 Plecoptera 襁翅目)分类单元数和科级水平生物指数 FBI(family biotic index)评价安徽九华河的水质状况, 后又编著出版了中国首部水生昆虫学专著, 将水质生物评价方法

收稿日期: 2013-02-21; 修订日期: 2014-05-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501002002)

作者简介: 郝利霞(1984~), 女, 博士后, 主要研究方向为生态评价、生态系统可持续性研究及生态系统管理, E-mail: lxhao@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: liding@rcees.ac.cn

系统地介绍到中国.王备新等^[8,9]在此基础上,以安徽黄山地区的溪流为对象,首次对底栖生物完整性指数和评价标准进行了筛选,提出了生物完整性评价的指标体系.国内外学者已经对河流健康评价做了很多研究,当前河流生态系统健康评价主要有2种方法:指示物种法^[10-13]和指标体系法^[4,6,14].指示物种法是指采用一些指示种群,利用其多样性和丰富度来监测河流生态系统健康状况,以2000年12月起执行的《欧盟水框架导则》最具有代表性^[15].生物对于河流生态系统健康有一定的代表性,但是也存在许多缺陷,如选择不同的研究对象及监测参数会导致不同的评价结果,无法综合评价河流生态系统状况问题,一个指标只能反映干扰传播过程中造成的某方面影响,在流域范围内对所有干扰都敏感的单一河流健康指标不可能存在;同时,不同生物类群进行评价时的取样尺度与频度难于确定^[16].因此,综合物理、化学、生物,甚至社会经济指标的指标体系法在流域河流生态系统健康评价中随之产生.指标体系法综合了生态系统的多项指标,反映了生态系统的过程,是从生态系统的结构、功能演替过程,生态服务和产品服务的角度来度量生态系统健康^[17],较能代表生态系统的总体情况,在河流生态系统健康评价中应用日趋广泛.

本研究以海河流域为例,应用指标体系法,从化学完整性和生物完整性两方面探讨该流域的河流生态系统健康状况,旨在辨清海河流域河流生态健康现状及发展方向,为流域水生态系统的管理提供依据.

1 研究区概况

海河流域东临渤海,西倚太行,南界黄河,北接蒙古高原,位于东经 $112^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 和北纬 $35^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 之间.流域地跨北京、天津、河北、山西、山东、河南、内蒙古和辽宁等8个省(自治区/直辖市),总面积 $3.18 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全国总面积的3.3%(见图1).全流域总的地势是西北高东南低,大致分高原、山地及平原3种地貌类型.西部为山西高原和太行山区,北部为蒙古高原和燕山山区,面积 $18.94 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占流域总面积的60%;东部和东南部为平原,面积 $12.84 \times 10^5 \text{ km}^2$,占40%.海河流域属于温带东亚季风气候区,年平均气温在 $1.5 \sim 14^{\circ}\text{C}$,年平均相对湿度50%~70%;年平均降水量539 mm,属半湿润半干旱地带;年平均陆面蒸发量470 mm,水面蒸发量1100 mm.海河流域包括海河、滦河和徒

骇马颊河3大水系、7大河系、10条骨干河流.流域内人口密集,大中城市众多,在我国政治经济中的地位极为重要,2010年全流域人口数接近 1.46×10^8 人,平均人口密度 $458 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$;同年全流域GDP达到 54693×10^8 元,而同年水资源量只有 $306.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[18].海河流域以不足全国1.3%的水资源量,承担着全国10%的人口、11%的耕地、13%的GDP和12%的粮食生产总量,水资源供需矛盾突出^[19].

海河流域上游山地和下游平原的地貌形态决定了流域的总体水系特征,季风性气候和人类活动又加剧了水系的季节性断流.作为我国经济发展的重要支撑地区之一,海河流域受到了人类活动的空前影响,工、农业生产导致的水资源消耗、水环境污染、河流生境破坏等,造成了水生生物的栖息环境受损、水生生物多样性减少、河流生态系统功能丧失等问题,河流生态系统健康受到严重威胁,如何解决经济发展与流域河流生态系统健康之间的矛盾迫在眉睫.

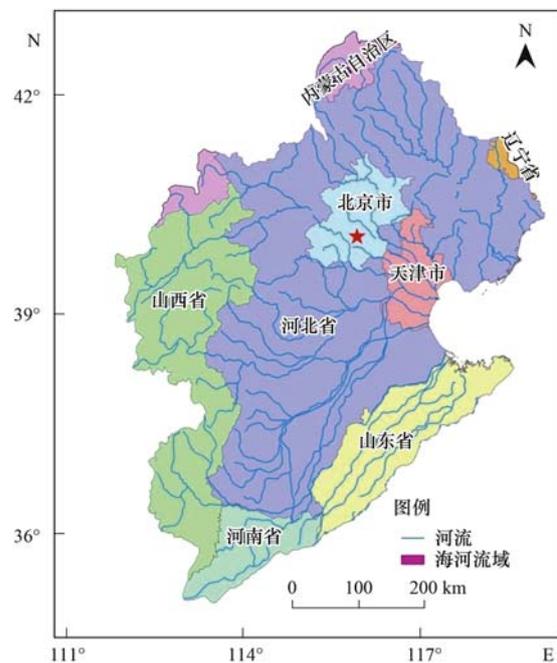


图1 海河流域地理位置及其包括的行政区

Fig. 1 Location and administrative area of the Haihe River Basin

2 材料与方法

2.1 建立评价指标体系

虽然我国关于河流生态系统健康评价的研究已有不少,但是目前仍没有统一的指标体系,本文在结合前人研究^[7-17,20]以及海河流域实际情况,兼顾数

据采集难度的基础上,选取电导率 $EC(\mu S \cdot cm^{-1})$ 、溶解氧 $DO(mg \cdot L^{-1})$ 、化学需氧量 $COD(mg \cdot L^{-1})$ 这 3 个水质指标和氨氮 $NH_4^+ - N(mg \cdot L^{-1})$ 、总氮 $TN(mg \cdot L^{-1})$ 、总磷 $TP(mg \cdot L^{-1})$ 这 3 个营养盐指标以及底栖动物的分类单元数 (S)、EPT 科级分类单元

比 (EPT_r)、BMWP (biological monitoring working party) 指数 (BMWP) 和 Berger-Parker 优势度指数 (D) 共 10 个指标评价河流生态系统健康,其中水质和营养盐指标代表河流生态系统的化学完整性,底栖动物指标代表生物完整性,详见表 1.

表 1 海河流域河流生态系统健康评估指标体系

Table 1 Assessment indicators of river ecosystem health in Haihe River Basin

评价项目	指标	单位	意义	指标方向
水质	DO	$mg \cdot L^{-1}$	空气中的分子态氧溶解在水中称为溶解氧,是衡量水体自净能力的一个指标	正向
	EC	$\mu S \cdot cm^{-1}$	电导率是以数字表示溶液传导电流能力,可一定程度上反应水质污染程度	负向
	COD	$mg \cdot L^{-1}$	五日化学需氧量,是表示水质污染度的重要指标	负向
营养盐	$NH_4^+ - N$	$mg \cdot L^{-1}$	氨氮是指水中以游离氨 (NH_3) 和铵离子 (NH_4^+) 形式存在的氮,是衡量水体污染的重要指标	负向
	TN	$mg \cdot L^{-1}$	水中的总氮含量是衡量水质的重要指标之一,有助于评价水体被污染和自净状况	负向
	TP	$mg \cdot L^{-1}$	总磷是水样经消解后将各种形态的磷转变成正磷酸盐后测定的结果,可评价水体被污染和自净状况	负向
底栖动物	S	—	样点所有底栖动物物种数	正向
	EPT_r	—	EPT_r 指数主要反映蜉蝣目、襉翅目和毛翅目 3 类不耐污的物种的科数占样点总科数的比例	正向
	BMWP	—	样点科级分类单元对污染物的敏感值之和	正向
	D	—	Berger-Parker 优势度指数,优势种个体数占样点全部个体数的比例	负向

2.2 采样方法及指标值的测定计算

按照均匀分布原则,研究区内共布设 73 个采样点(见图 2),每个样点采集 3 个平行样,以减小采样误差,水样采样点为河流中间点表层以下约 0.5 m. 采样时间为 2010 年 8 月.

化学指标:电导率 (EC) 和溶解氧 (DO) 采用美国 YSI 公司生产的便携式多参数水质测量仪(型号 YSI-Pro Plus)在采样时现场测定;同时现场采集 2 L 水样,进行冰冻保存,并在 24 h 之内采用德国 WTW 公司生产的滤色光度计(型号 Photolab S12)测定氨氮 ($NH_4^+ - N$)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和化学需氧量 (COD) 指标. 水样采集、保存和室内测定均参照文献[21].

生物指标:利用 D 形网在野外采集底栖动物样品,在 D 形网达不到的区域利用采集器进行采集,然后混合为合并样品,用 95% 酒精溶液进行固定保存,并放入 500 mL 样本瓶中. 回到实验室内,对样品进行挑拣,利用 75% 的酒精保存已经挑拣完的所有个体,然后对标本进行分类和鉴定. 大多数物种鉴定到种,部分物种鉴定到属或目.

底栖动物物种级别分类单元数 (S) 即各样点鉴定种类之和, EPT_r 科级分类单元比 ($EPT_r - F$)、

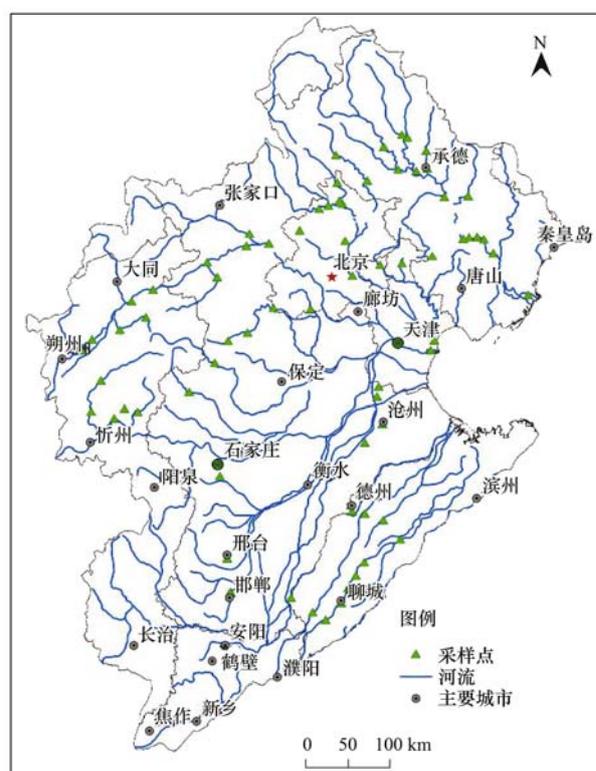


图 2 2010 年海河流域采样点分布情况

Fig. 2 Distribution of sampling sites in Haihe River Basin in 2010

BMWP 指数 (BMWP) 及 Berger-Parker 优势度指数 (D) 分别采用如下公式计算:

$$EPTr-F = \frac{E + P + T}{Total} \quad (1)$$

式中, E (Ephemeroptera) 为样点蜉蝣目的科级分类单元数, P (Plecoptera) 为该样点襁翅目的科级分类单元数, T (Trichoptera) 为毛翅目的科级分类单元数, $Total$ 为该样点所有的科级分类单元数.

$$BMWP = \sum t_i \quad (2)$$

式中, t 为样点科级分类单元的对污染物的敏感值, i 为样点科级分类单元数.

$$D = \frac{N_{max}}{N} \quad (3)$$

式中, N_{max} 为最优势种的个体数, N 为样点全部物种的个体数.

2.3 确定指标临界值和参考值

由于测量和计算得到的各指标量纲不一致, 为了便于比较, 需对各指标进行标准化处理. 此时, 需确定每个指标的参考值和临界值, 即每个指标的最优状态和最差状态, 以此参考值和临界值对数据进行标准化处理. 水质和营养盐等化学指标的参考值和临界值是以中国国家地表水水质标准^[22] [地表水环境质量标准 (GB 3838-2002)] 作为基本的参照标准, 其中参照值为地表水 I 类水标准, 临界值为地表水 IV 类水标准. 底栖动物指标的标准化的常用方法有 3 分法、4 分法、比值法, 其中, 比值法是国外生态学者最经常使用的方法, 经我国学者的研究验证^[9,13,20], 比值法较适合于我国北方地区的河流生态系统健康评价. 因此, 本研究采用比值法对生物指标进行标准化处理, 具体方法详见参考文献 [23~28], 各指标的参考值及临界值见表 2.

表 2 评价指标参考值、临界值及标准化公式¹⁾

Table 2 Reference value, critical value and formula for standardization of assessment indicators

评价项目	指标	参考值 (min)	临界值 (max)	标准化公式
水质	DO/mg·L ⁻¹	7.5 (max)	3 (min)	标准化值 = $\frac{M-\min}{\max-\min}$
	EC/μS·cm ⁻¹	400	1 500	
	COD/mg·L ⁻¹	15	30	
营养盐	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.15	1.5	标准化值 = $\frac{\max-M}{\max-\min}$
	TN/mg·L ⁻¹	0.2	1.5	
	TP/mg·L ⁻¹	0.02	0.3	
底栖动物	S(—)	S 的 5% 四分位数	S 的 95% 四分位数	$S = \frac{\text{measured} - 5\% \text{ quantile}}{95\% \text{ quantile} - 5\% \text{ quantile}}$ ^[23] EPTr-F > 0.36, EPTr = 1.0
	EPTr(—)	0	1	EPTr-F < 0.36, EPTr = 0.036 4e ^{9.138 2} ($\frac{EPTr}{total}$) ^[24-26]
	BMWP(—)	0	81	$BWMP = \frac{M - \min}{\max - \min}$ ^[27,28]
	D(—)	0.05	0.95	$D = \frac{0.95 - M}{0.95 - 0.05}$ ^[23]

1) M 代表实测值或初始计算值, \max 代表指标临界值, \min 代表指标参考值, 分别代表国家地表水水质标准 (GB 3838-2002) 第一类水和第四类水的标准值

海河流域面积相对较大, 本研究采用统一的评价标准, 主要是为了便于从流域层面实施管理^[22] 和上下游之间的对比分析, 从实际监测数据来看, 海河流域整体水质、营养盐和底栖动物状况已经处于很差状态; 而评价标准中临界值和参考值本身亦处于极差和极好的极端状态, 因此, 统一的标准不会对最终的评价结果产生较大影响.

2.4 河流生态系统健康综合评价

如上所述, 河流生态系统健康主要表现为物理、化学和生物三者的完整性, 鉴于物理完整性指标较

难量化, 本研究从化学完整性和生物完整性两方面探讨河流生态系统健康状况, 针对水质指标、营养盐指标分别计算其各自得分值, 并按等权平均计算河流生态系统的化学完整性指数; 底栖动物指标也按照等权平均计算, 得到生物完整性指数, 最后进行综合评价, 计算样点总的健康得分. 计算公式如下:

$$I_{wq} = \frac{EC + COD + DO}{3} \quad (4)$$

$$I_{fs} = \frac{NH_4^+-N + TN + TP}{3} \quad (5)$$

$$I_{\text{bio}} = \frac{S + \text{EPT}r + \text{BMWP} + D}{4} \quad (6)$$

式中, I_{wq} 是水质指标综合得分; I_{fs} 是营养盐指标综合得分; I_{bio} 是底栖动物指标综合得分(在计算水质得分时,如溶解氧 $\text{DO} = 0$, 则无论其他两项指标如何,水质得分 $I_{\text{wq}} = 0$; 计算营养盐得分时,如氨氮 $\text{NH}_4^+ - \text{N} = 0$, 则营养盐得分 $I_{\text{fs}} = 0$; 未采集到底栖动物的样点,底栖动物得分 $I_{\text{bio}} = 0$).

此处,由于未采集藻类、鱼类等水生生物,因此底栖动物综合得分,即代表生物完整性指数.

综合以上结果,即可计算流域河流生态系统健康综合指数,模型如下:

$$\text{HI} = I_{\text{ch}} \times W_{\text{ch}} + I_{\text{bio}} \times W_{\text{bio}} \quad (7)$$

式中, HI 为综合健康指数; I_{ch} 为化学完整性指数,由水质指标综合得分和营养盐指标综合得分等权平均计算得到,即 $I_{\text{ch}} = (I_{\text{wq}} + I_{\text{fs}})/2$; I_{bio} 为生物完整性指数; W_{ch} 为化学完整性指数的权重; W_{bio} 为生物完整性指数的权重.

经与本领域专家讨论,认为化学完整性和生物完整性二者互相影响,对于河流生态系统健康有同

等的重要性,因此此处做等权重处理,即 $W_{\text{ch}} = W_{\text{bio}} = 0.5$.

由于各级指标均经过标准化处理,因此计算得到的各级综合得分(水质得分、营养盐得分、底栖动物得分/生物完整性指数、化学完整性指数以及样点综合健康指数)均介于 0 ~ 1,本研究把各指数等间距划分成健康、亚健康、一般、较差、极差 5 个等级,其中 0.8 ~ 1 为健康、0.6 ~ 0.8 亚健康、0.4 ~ 0.6 一般、0.2 ~ 0.4 较差、0 ~ 0.2 极差.

3 结果与讨论

3.1 海河流域河流生态系统健康综合分析

经计算,海河流域 73 个采样点,有 53 个样点的健康指数小于 0.2,即 72.6% 的河流生态系统处于“极差”健康状态;处在“健康”状态的样点只有 2 个,仅占总样本数的 2.7%;有 3 个样点处于“亚健康”状态;在“一般”健康状态以下的样点一共有 68 个,占总体的 93.15% (见表 3),说明海河流域河流生态系统健康整体极差,急需采取有效措施遏制河流生态系统继续恶化.

表 3 各健康等级的样点数¹⁾

Table 3 Number of the samples in every grade of health

得分范围	健康等级	水质得分	营养盐得分	底栖动物得分	生物完整性指数	化学完整性指数	综合健康等级
0.8 ~ 1	健康	24	1	0	0	9	2
0.6 ~ 0.8	亚健康	4	0	2	2	4	3
0.4 ~ 0.6	一般	6	3	7	7	3	7
0.2 ~ 0.4	较差	8	6	10	10	13	8
0 ~ 0.2	极差	23	49	54	54	39	53
样点总数/个	—	65	59	73	73	68	73

1) 部分项目样点总数小于 73,是因为该项目下某些指标值异常,异常值样点被剔除所致

从各健康等级的样点空间分布图来看(见图 3),海河流域大部分区域处于河流生态系统极不健康状态,只有北部山区部分河段和西部山地向平原过渡区的河段河流生态系统健康状况较好.

究其原因,北部山区的河流如潮河、白河、汤河等都是北京饮用水源地密云水库的入库河流,为保证首都的饮用水达标,政府投入大量资金保护上述河流水质免受污染,该区域水质指标基本上都能达到 I 类和 II 类水标准,营养盐指标也基本能达到 II 类和 III 类水标准^[22]. 相应地,这些区域的底栖动物多样性也较高,清洁物种所占比例相对较大,所以该区域河流生态系统健康状况整体较好.

流域西部山地向平原过渡区的健康状况较好的样点均采集于拒马河断面. 拒马河是北京市五大水系之一,发源于河北省涞源县西北太行山麓,属于大

清河支流. 采样点位于拒马河源头的太行山脚下,故整体水质较好. 加之拒马河的支流大石河和小清河等都有地下水源补给,附近设立了众多旅游景点,也有利于保护其河流生态系统健康.

海河流域大部分地区河流生态系统健康差,表现出地区集聚效应,如京津唐工业区、山西大同周边以矿业为主的工业区以及山东、河南的国家粮食产区,可见经济发展为地区繁荣注入了活力的同时,也带来了河流生态系统健康的极大损害,如何平衡经济发展及河流生态系统健康的关系是亟待解决的难题.

3.2 化学完整性及生物完整性评价

3.2.1 化学完整性

如前所述,化学完整性由水质和营养盐指标两部分决定,如表 3 所示,河流生态系统化学完整性整

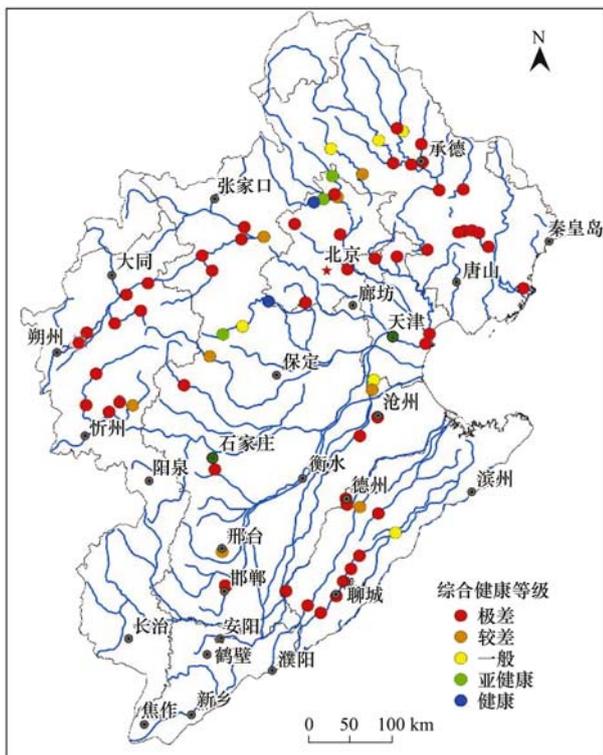


图3 海河流域河流生态系统健康等级分布

Fig. 3 Distribution of all health grades of river ecosystem in Haihe River Basin

体较差,有 76.5% 的样点化学完整性指数小于 0.4,只有 13.2% 的样点处于化学完整性“健康”状态.单独看水质得分的健康等级,可发现半数以上的样点水质健康等级在“一般”以上,处于“较差”和“极差”状态的样点数分别为 8 个和 23 个,占水质采样点数的 47.7%,相对而言,海河流域整体水质尚可.但是,就营养盐得分来看,90% 以上的样点处于“较差”和“极差”状态,只有 1 个样点“健康”,海河流域水体富营养化趋势明显,同时,也导致了河流生态系统化学完整性的整体下降.

从二者的空间分布[见图 4(a)和图 4(d)]来看,流域的北部和西北部高原山地区水质较好,化学完整性指数相对较高,主要由于这些地区大部分为河流源头,受人类干扰较少,因而水质较好;同时,这些区域海拔较高,地形起伏大,不适宜人类活动,仅有少数牧业、传统农业和矿业为主,工业化程度低,工农业排放污水较少,也是造就这些水质健康程度和化学完整性均较高的原因.而在东部和南部平原区水质、化学完整性指数等级均较低,大部分处于“极差”状态,这些区域是海河流域经济最发达的地区,北京、天津、唐山、石家庄等城市是环渤海经济圈的重要组成部分,东南部平原区也是我国重要

的粮棉基地.发达的工农业生产和强烈的人类活动给河流生态系统造成了巨大的胁迫,这也说明人类活动胁迫与河流生态系统健康有着密切的关系.

海河流域大部分区域营养盐健康状况均较差[见图 4(b)],尤其在城市周边的河流更为严重.研究表明,现阶段河流中的氮主要来自城乡生活污水、农村人畜排泄物及某些工厂废水^[29],同时,过量的氮磷还会随着地表径流和地下径流在流域内迁移^[30].由此推断,海河流域的营养盐健康状况差,其原因需要分区域对待:在北部和西北部山区和高原区可能是由于大量饲养牲畜所致;而西部则是由于大量的矿业企业排放所致;东南部主要是农田面源污染和人类生活污水导致水体中氮磷含量增大;东部京津唐工业区则主要是人类生活污水和工业企业排放的废水所致.

3.2.2 生物完整性

河流中的底栖动物多数具有分布广泛、生活周期长、迁徙能力弱、个体大、易于采集和识别等特点,是水质生物评价中应用最为广泛的一类生物^[31],基于其群落结构特征而构建的底栖动物完整性指数是应用最广泛的河流生态系统健康评价指标之一^[32~36].海河流域底栖动物指标综合得分(生物完整性)均较低,健康程度总体差别不大.如表 3 所示,底栖动物健康指数没有达到“健康”程度的样点,仅有 2 个样点达到“亚健康”状态,其余样点均为“一般”以下,其中 38 个样点未采集到底栖动物标本,说明海河流域底栖动物多样性很低.从空间分布来看[见图 4(c)],无论是山区河流还是平原区河流,底栖动物健康程度均较差,蜉蝣目、襁翅目和毛翅目等清洁种类很少,多样性较低.这也充分说明了海河流域河流健康程度整体较差,无法满足底栖动物的生境条件;同时,底栖动物又反作用于化学完整性,清洁种类较少,水体自净作用就得不到有效发挥,河流生态系统健康状态持续恶化.

3.2.3 化学完整性和生物完整性的空间差异性分析

从空间分布来看,海河流域生物完整性与化学完整性有着明显的差异.主要表现为:①在海河流域整体范围内,生物完整性指数的健康等级较为均一,整体较差,大部分样点处于“极差”状态,没有“健康”的样点;而化学完整性则相对较高,有较多的“健康”、“亚健康”样点,同时表现出明显的区域聚集性;②就各级别样点分布范围来看,山区河流健康状况相对较好,平原河流健康状态较差:处于燕山-太行山山脉一线的样点化学完整性和生物完整

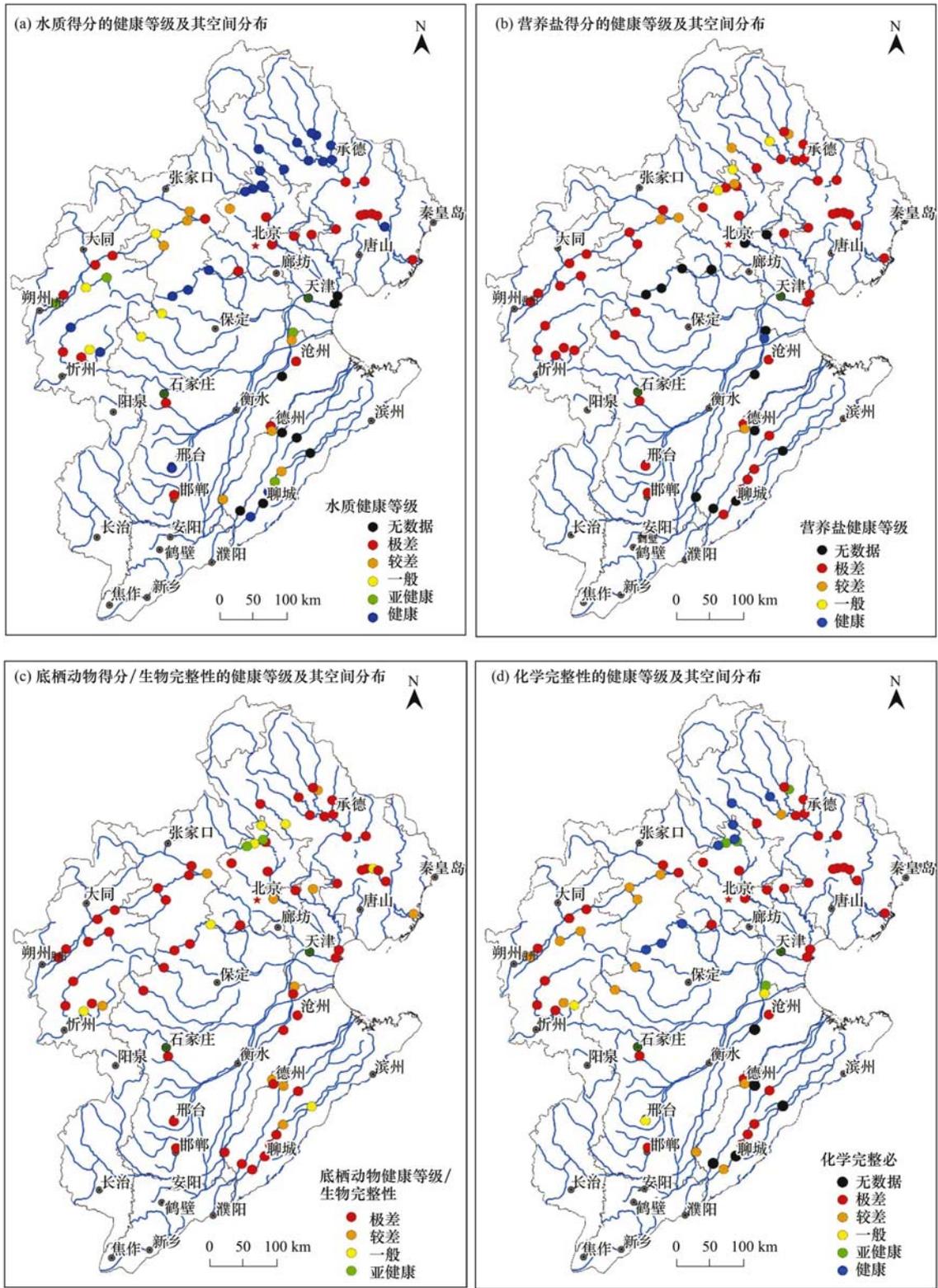


图 4 各评价指数的健康等级及空间分布

Fig. 4 Health grade and spatial distribution of every assessment index

性均较高,“健康”、“亚健康”和“一般”的样点较多,但是化学完整性健康等级明显高于生物完整性;而在东部和南部平原区,无论是化学完整性还是生

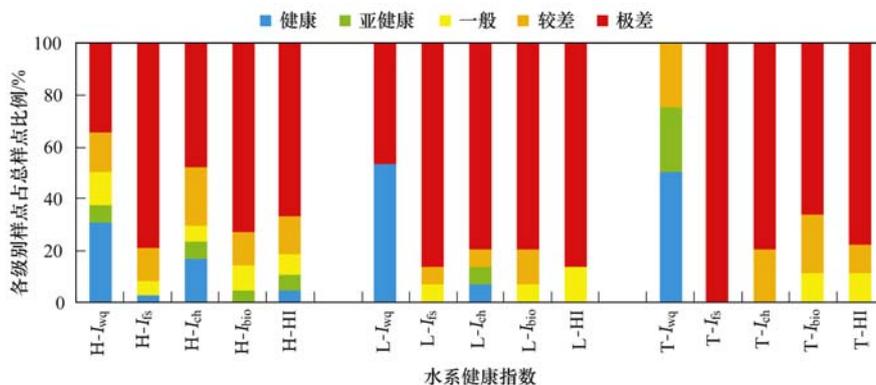
物完整性,均多为“极差”和“较差”的样点;尤其是城市和大工业区周边样点,基本全部为“极差”状态.

3.3 海河流域三大水系河流生态系统健康评价

海河流域由海河水系、滦河水系和徒骇马颊河水系 3 大水系构成。其中,海河水系是主要水系,位于流域中部,包括蓟运河、潮白河、北运河、永定河、大清河、子牙河、漳卫南运河、海河干流和黑龙港运东地区诸河;滦河水系位于海河流域的东北部,包括滦河及冀东沿海诸河;徒骇马颊河水系位于流域最南部,为单独入海的平原河道,属平原排涝河流。考虑到各水系的面积大小,样点数分别为 15、49、9。

如图 5 所示,海河流域三大水系的河流生态系统健康状况均较差,海河水系在河流源头尚有部分“健康”和“亚健康”的河流生态系统,滦河水系和徒骇马颊河水系全部样点均为“一般”以下的健康状态(见图 5 的 HI 指数等级),而且“极差”的样点均

达到很高比例,最高者为滦河水系,达到近 90%,可见海河流域河流生态系统健康已经很差,急需进行恢复治理。究其原因,从图 5 可以看出,3 大水系水质得分均有较多的“健康”样点,其中滦河水系和徒骇马颊河水系“健康”样点数达到了 50% 以上;但 3 大水系的营养盐得分均较低,80% 以上的样点处于“极差”状态,这就导致由二者决定的河流生态系统化学完整性的整体下降,从而进一步影响到底栖动物的生境条件,使得其生存环境难以维持底栖动物正常生长,清洁物种减少,生物多样性降低等,生物完整性指数随之减小,河流健康下降。因此,营养盐是影响海河流域河流生态系统健康的关键因子,遏制河流健康继续恶化,需从控制氨氮、总氮、总磷等营养盐指标入手。



I_{wq} 、 I_{fs} 、 I_{ch} 、 I_{bio} 、HI 分别表示水质指标综合得分、营养盐指标综合得分、化学完整性指数、底栖动物指标综合得分/生物完整性指数以及河流综合健康指数; H、L、T 分别表示海河水系、滦河水系和徒骇马颊河水系,如 H- I_{wq} 表示海河水系的水质指标综合得分

图 5 海河流域三大水系河流生态系统健康等级对比

Fig. 5 Health grade of three water systems in Haihe River Basin

海河水系跨越流域高原山地区和平原区两大地貌类型,河流生态系统健康程度较好的点均位于高原山地区,这也充分说明了高原山地区由于地势起伏较大,极大阻碍了人类活动,因此人类活动对河流生态系统干扰较小,河流生态系统健康程度较高;而处于平原区的样点则大部分健康状态较差,这一区域是海河流域人类活动最强烈的区域^[19]。该区域大中城市众多,有北京、天津、石家庄等 25 座城市,人口密度大于 $500 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$,部分地区甚至超过 $1000 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$,并且已经形成了京津城市群、环渤海城市群和山前平原城市群等经济聚集区,工农业生产发达,人类活动强烈,污水废水排放量巨大,河流生态系统健康程度较差。

滦河水系是海河流域第二大水系,水系绝大部分位于蒙古高原上,平原区面积较小,是天津市的主要水源。一般认为,滦河流域内基本是非灌溉型的

山区农业,因此滦河水量还比较充沛,水质比较清洁^[37]。本研究对滦河水系健康评价的整体结果虽然都是处于“一般”以下,但是从图 4 可以看出,滦河水系上中游水质得分较高,基本都达到“健康”水平,但是营养盐和底栖动物评价结果较差,导致最后河流生态系统整体健康状况差,说明采用单一因子法评价河流生态系统健康较难全面展示系统的综合健康状态,较综合评价法略显不确定性。

徒骇马颊河水系跨越河南、山东两省,该区域地势平坦,是我国重要的粮棉产地,农业生产活动较为发达,人口密度大。健康评价中,水质得分较好,而营养盐和底栖动物得分都很低,导致河流生态系统健康整体较差,80% 的采样点处于“极差”状态。作者认为,这与该地区农业面源污染有关,农业污染导致河流氮磷元素含量增加,营养盐得分降低,进而影响到化学完整性和生物完整性,导致总体健康状

况较差.

4 结论

(1)海河流域河流生态系统健康状况整体较差,同时,表现出明显的地区集聚效应,在人口密集的工业城市群河流生态系统健康程度均为“极差”,如京津唐工业区、山西大同周边以矿业为主的工业区以及山东、河南的国家粮食产地区;在一些人类活动较弱的山地区,河流生态系统健康程度相对较好,可见河流生态系统健康与工农业发达程度密不可分.

(2)海河流域水质健康程度大体表现为:北部和西北部高原山地区水质较好,中部、南部、东部平原区水质较差,由于自然条件限制,人类活动强度也有类似的空间特征,说明人类活动强度与海河流域水质健康关系密切. 营养盐健康程度,整个海河流域都比较差,水体富营养化趋势明显,今后需大力遏制营养盐的排放;海河流域的营养盐健康状况无明显的空间差异性,表明影响营养盐的因素较多(自然环境、农业、工矿业、采掘业等),治理时需要分区对待. 海河流域底栖动物健康状态整体较差,半数以上样点未采集到底栖动物,且清洁物种少,耐污种类较多,底栖动物与水环境相互作用、相互影响.

(3)海河流域三大水系河流生态系统健康程度均较差. 影响海河流域河流生态系统健康的关键因子为氨氮、总氮、总磷等营养盐指标,需从上述指标入手治理海河流域河流污染,恢复其健康状态.

(4)滦河水系本身水质得分较高,但是综合营养盐和底栖动物之后,整体健康程度较差. 因此,采用单一因子法评价河流生态系统健康较难全面展示河流整体健康状态,应采用综合因子法评价河流生态系统的健康程度.

参考文献:

- [1] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **422-423**: 1-14.
- [2] Pinto U, Maheshwari B. A framework for assessing river health in peri-urban landscapes [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2014, **14**(2): 121-131.
- [3] Simpson J, Norris R, Barmuta L, *et al.* AusRivAS- National River Health Program: User Manual Website version [R]. 1999. 5-20.
- [4] Butcher J T, Stewart P M, Simon T P. A benthic community index for streams in the northern lakes and forests ecoregion [J]. *Ecological Indicators*, 2003, **3**(3): 181-193.
- [5] 廖静秋, 黄艺. 应用生物完整性指数评价水生态系统健康的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(1): 295-302.
- [6] Meng W, Zhang N, Zhang Y, *et al.* Integrated assessment of river health based on water quality, aquatic life and physical habitat [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(8): 1017-1027.
- [7] 杨莲芳, 李佑文, 戚道光, 等. 九华河水生昆虫群落结构和水质生物评价[J]. *生态学报*, 1992, **12**(1): 8-15.
- [8] 王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003. 128.
- [9] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 等. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康[J]. *生态学报*, 2005, **25**(6): 1481-1490.
- [10] Jia Y T, Chen Y F. River health assessment in a large river: Bioindicators of fish population [J]. *Ecological Indicators*, 2013, **26**: 24-32.
- [11] Grouns I, Rourke M, Gilligan D. Toward river health assessment using species distributional modeling [J]. *Ecological Indicators*, 2013, **29**: 138-144.
- [12] Marzin A, Delaigue O, Logez M, *et al.* Uncertainty associated with river health assessment in a varying environment: The case of a predictive fish-based index in France [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **43**: 195-204.
- [13] 张楠, 孟伟, 张远, 等. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(2): 162-170.
- [14] 惠秀娟, 杨涛, 李法云, 等. 辽宁省辽河水生态系统健康评价[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(1): 181-188.
- [15] Kallis G, Butler D. The EU water framework directive: measures and implications [J]. *Water Policy*, 2001, **3**(2): 125-142.
- [16] 赵彦伟, 杨志峰. 河流健康: 概念、评价方法与方向[J]. *地理科学*, 2005, **25**(1): 119-124.
- [17] 张光生, 谢锋, 梁小虎. 水生生态系统健康的评价指标和评价方法[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(24): 334-337.
- [18] 水利部海河水利委员会. 2010 年海河流域水资源公报[R]. 天津: 水利部海河水利委员会, 2010. 1-30.
- [19] 陈利顶, 孙然好, 汲玉河, 等. 海河流域水生态功能分区研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 26-57.
- [20] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数[J]. *生态学报*, 2012, **32**(15): 4661-4672.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 1-5.
- [22] GB 3838-2002, 中华人民共和国地表水环境质量标准——地表水环境质量标准[S]. 2002.
- [23] 段梦, 朱琳, 冯剑丰, 等. 基于浮游生物群落变化的生态学基准值计算方法初探[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(2): 125-132.
- [24] Lenat D R. Water quality assessment of streams using a qualitative collection method for benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1988, **7**(3): 222-233.
- [25] Plafkin J L, Barbour M T, Porter K D, *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: benthic macroinvertebrates and fish [M]. Office of Water Regulations

- and Standards, US Environmental protection Agency, Washington, DC. 1989. 127-160, 182-198.
- [26] Barbour M T, Graves C G, Plafkin J L, *et al.* Evaluation of EPA's rapid bioassessment benthic metrics: Metric redundancy and variability among reference stream sites [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1992, **11**(4): 437-449.
- [27] Armitage P D, Moss D, Wright J F, *et al.* The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites [J]. *Water Research*, 1983, **17**(3): 333-347.
- [28] Hellawell J M. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management (Pollution monitoring series) [M]. London: Elsevier Applied Science, 1986. 435-446, 450-451.
- [29] 邢光熹, 曹亚澄, 施书莲, 等. 太湖地区水体氮的污染源和反硝化[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2001, **31**(2): 130-137.
- [30] 王吉苹. 源头流域氮的来源迁移与转化[D]. 厦门: 厦门大学, 2007. 15-21.
- [31] 刘录三, 李中宇, 孟伟, 等. 松花江下游底栖动物群落结构与水质生物学评价[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(3): 81-86.
- [32] Karr J R, Rossano E M. Applying public health lessons to protect river health [J]. *Ecology and Civil Engineering*, 2001, **4**(1): 3-18.
- [33] Parr L B, Mason C F. Long-term trends in water quality and their impact on macroinvertebrate assemblages in eutrophic lowland rivers [J]. *Water Research*, 2003, **37**(12): 2969-2979.
- [34] Niemi G J, McDonald M E. Application of ecological indicators [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, **35**: 89-111.
- [35] Birk S, Hering D. A new procedure for comparing class boundaries of biological assessment methods: a case study from the Danube Basin [J]. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(3): 528-539.
- [36] 周晓蔚, 王丽萍, 郑丙辉, 等. 基于底栖动物完整性指数的河口健康评价[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 242-247.
- [37] 解莹, 李叙勇, 王慧亮, 等. 滦河流域上游地区主要河流水污染特征及评价[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 645-653.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytic Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrozoobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行