

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析

刘魏魏^{1,2}, 郭子良^{1,2}, 王大安^{1,2}, 张曼胤^{1,2*}, 张余广^{2,3}

(1. 中国林业科学研究院湿地研究所, 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091; 2. 河北衡水湖湿地生态系统定位观测研究站, 衡水 053000; 3. 河北衡水湖国家级自然保护区管理委员会, 衡水 053000)

摘要: 为了评价衡水湖湿地水环境质量时空变化趋势, 并对污染源进行分析. 本文依据衡水湖历史水体监测点数据和2019年布设的17个采样点数据, 利用综合营养状态指数、水质综合状况指数和水环境质量指数评价方法, 研究了2000~2019年衡水湖水体营养状态、水质状况和水环境质量时空变化特征, 分析了可能的污染物来源. 结果表明, 2000~2019年, 衡水湖水体达到Ⅲ类水质的监测点比例不断升高, 高锰酸盐指数、总氮和总磷超标是衡水湖存在的主要水环境问题. 从空间上来看, 衡水湖水体综合营养状态、水质状况和水环境质量3种指数整体上呈现从南部到中西部再到东北部降低的趋势. 衡水湖国家级自然保护区建立后, 一系列水体保护政策和措施的实施, 使2000~2019年3种指数分别降低了20.9%、53.4%和49.2%, 显著改善了衡水湖水环境质量. 但是污水的侧渗与下泄、引水农业面源污染物的汇入, 以及湖内植物枯落腐烂等也给衡水湖水环境质量带来很大的挑战.

关键词: 衡水湖; 水环境质量; 水质状况; 营养水平; 时空变化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1361-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202008048

Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake

LIU Wei-wei^{1,2}, GUO Zi-liang^{1,2}, WANG Da-an^{1,2}, ZHANG Man-yin^{1,2*}, ZHANG Yu-guang^{2,3}

(1. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. National Ecosystem Research Station of Hengshui Lake Wetland, Hengshui 053000, China; 3. Administrative Committee of Hebei Hengshui Lake National Nature Reserve, Hengshui 053000, China)

Abstract: To study the spatial-temporal variation of water environment quality in Hengshui Lake and determine the associated pollution sources, we used historical water monitoring data (from 2000 onwards) and data from 17 sites sampled in 2019 to determine the trophic level index (TLI), comprehensive water quality index (WQI), and water environment quality index (EQI). The results showed that the proportion of monitoring points reaching level III increased from 2000 to 2019. The permanganate index, total nitrogen, and total phosphorus were the main water environmental indicators. Spatially, TLI, WQI, and EQI all generally decreased from the south to the middle and west of the lake, and then further decreased towards the northeast. After the establishment of the Hengshui Lake National Nature Reserve, a series of water body protection policies and measures were implemented. These interventions are reflected in reductions in the TLI, WQI, and EQI between 2000 and 2019 by 20.9%, 53.4%, and 49.2%, respectively. However, side seepage and sewage discharge, agricultural non-point source pollutants transported by water diversion, and the decay of plants in the lake present significant challenges for water quality in Hengshui Lake.

Key words: Hengshui Lake; water environment quality; water quality; trophic level; spatial-temporal variation

地表水环境污染是全球关注的问题^[1]. 水环境质量评价不仅是水资源可持续利用的基础, 也是生态管理与治理决策制定的依据^[2]. 水环境质量常用的评价方法有单因子评价法^[3]、综合污染指数法^[3~6]、模糊数学法^[3,7]和主成分分析法^[6,8]等, 其中以成熟的综合污染指数法应用较为广泛^[9]. 徐好^[3]利用单因子指数、综合指数和模糊评价方法评价了南四湖水环境质量, 研究结论可为南水北调东线南四湖的水环境管理及水质改善提供指导. 李国华等^[6]利用主成分分析和综合指数法评价了黄河托克托段水质状况, 明确了该段的主要污染因子及主要污染源. 因此, 定量评价水环境质量不仅可以明确水体主要污染因子和探析污染物来源, 同时也为水环境改善, 以及保护管理措施的制定提供方

向^[10].

河北衡水湖是我国受人为干扰影响强烈的典型内陆淡水湖泊湿地之一, 也是华北地区唯一由沼泽、水域、滩涂、草甸和耕地等多种生境组成的国家级自然保护区^[11]. 对严重干旱缺水的华北平原来说, 其水环境质量及变化趋势有着极其重要的社会意义和生态意义^[12]. 由于其地处人口高度稠密的华北平原腹地, 历史上人口的增加、工农业和生活用水量增加, 导致地表水过量开采. 加上工业废水、农业和生

收稿日期: 2020-08-06; 修订日期: 2020-09-01
基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项 (CAFYBB2019MA010); 国家自然科学基金项目 (31700409)

作者简介: 刘魏魏(1985~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为湿地生态, E-mail: weiweiliu@163.com
* 通信作者, E-mail: cneco@126.com

活污水的排放,使衡水湖水环境质量不容乐观^[7];2003 年衡水湖国家级自然保护区成立后一系列保护措施的实施则改善了湿地水环境状况.作为衡水市和冀州市的城市饮用水源地,衡水湖湿地理应保持较高的水环境质量.然而近年来衡水湖周边城市的快速扩张和经济的快速发展,给衡水湖湿地水环境质量带来了很大的挑战.因此,评价衡水湖湿地水环境质量及时空变化趋势,可为制定其综合保护和防治措施提供科学支撑,同时将对华北地区乃至全国的湿地水环境保护具有良好的示范作用^[12].然而,以往研究主要关注衡水湖某年^[13,14]、某几年^[7,15],或某几种指标^[7,16,17]的水环境状况,从时空变化角度对衡水湖多种水环境指标进行综合评价分析的研究还较少见.本文对 2000、2010 和 2019 年衡水湖水体 pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷、铜、砷、汞、六价铬、镉、铅、透明度和叶绿素 a 这 14 个指标进行分析,利用综合营养状态指数、水质综合状况指数和水环境质量指数对衡水湖水环境质量进行评价,分析其时空变化趋势,并对污染源进行了解析,以期为衡水湖水环境保护和管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北衡水湖国家级自然保护区(115°28'~115°42'E,37°31'~37°41'N)位于河北省衡水市境

内,由沼泽、水域、林地、草甸和耕地等多种生境组成(图1).保护区总面积 $16.4 \times 10^3 \text{ hm}^2$,蓄水面积 $7.5 \times 10^3 \text{ hm}^2$,包括东湖和西湖两个湖泊.东湖面积 $1.0 \times 10^3 \text{ hm}^2$,湖水的平均深度为 1.5~2.0 m,最大深度为 3.5 m^[18].东湖被人工修建的硬质岸堤隔绝成大湖和小湖两部分^[19];西湖面积 $3.2 \times 10^3 \text{ hm}^2$,目前未蓄水,主要以种植农作物和作为养殖场和乡镇企业用地为主^[13].湖区土壤类型为潮土和盐土.优势植物有芦苇和香蒲.

1.2 数据来源及处理

选取 2000、2010 和 2019 年衡水湖湿地顺民庄、魏屯闸/王口闸、南关闸、小湖湖心、大赵闸、南关新闻、芦苇区、香蒲区和大湖开阔区这 9 个长期监测点的水质数据.2019 年除上述长期监测点外,又增设 17 个临时监测点(图1和表1).于当年的 6 月,利用采水器于各样点采集 10~20 cm 处水样 3 L,并置于干净的聚乙烯瓶中,冷冻保存,带回实验室.用于测定 pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷、铜、砷、汞、六价铬、镉、铅、透明度和叶绿素 a,共计 14 个指标.采用玻璃电极法测定水体 pH 值;采用碘量法测定溶解氧;采用滴定法测定高锰酸盐指数;采用水杨酸分光光度法测定氨氮;采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮;采用钼酸铵分光光度法测定总磷;采用原子吸收分光光度法测定铜、镉和铅;采用原子荧光法测定砷和汞;采用二苯碳酰二肼分光光度法测定铬;采用铅字法测定

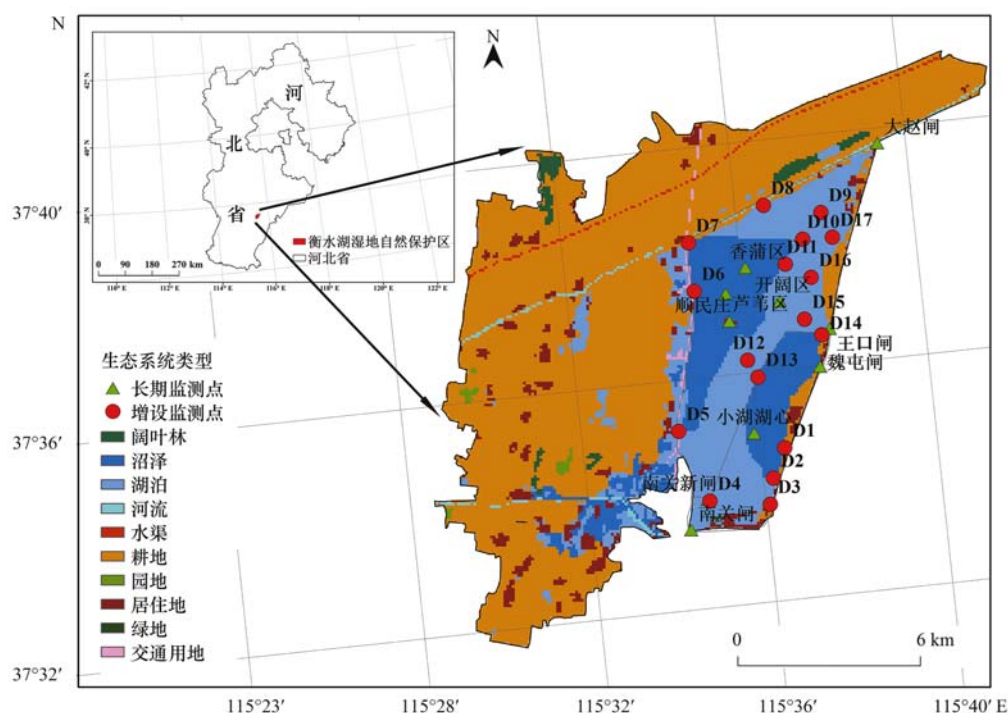


图1 衡水湖湿地自然保护区位置、生态系统类型及监测点示意

Fig. 1 Location of Hengshui Lake wetland nature reserve, land-use types, and monitoring sites

透明度；采用乙醇萃取分光光度法测定叶绿素 a。2000、2010 和 2019 年的长期监测点数据来自河北省衡水市水文水资源勘测局、河北省水环境监测中心衡水分中心 and 文献[12,20~22]，对各监测点的数据进行均质化处理，用以表示相应年份的水环境状况。利用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 对数据进行分析，利用 Sigma Plot 12.5 和 ArcGIS 10.2 进行绘图。

表 1 2019 年衡水湖增设采样点分布位置

Table 1 Location of additional sampling sites in Hengshui Lake			
编号	位置	编号	位置
D1	小湖东岸-1	D10	大湖新岛
D2	小湖东岸-2	D11	大湖芦苇区
D3	小湖东岸码头	D12	大湖湖心
D4	小湖隔堤-1	D13	小湖隔堤-2
D5	大湖西岸-1	D14	小湖隔堤-3
D6	大湖西岸-2	D15	大湖鸟岛
D7	大湖西岸-3	D16	大湖东岸-1
D8	大湖北岸	D17	大湖东岸-2
D9	大湖桃花岛		

1.3 评价方法

1.3.1 水环境质量指数

水环境质量指数(EQI)反映了研究区内水体的水质综合状况和综合营养状态^[23]，其计算方法见公式(1)：

$$EQI = WQI \times 0.9 + TLI \times 0.1 \tag{1}$$

式中，WQI 为水质综合状况指数；TLI 为水体综合营养状态指数。

根据 EQI 对衡水湖水环境质量状况进行分级(表 2)。EQI 值越高，其水环境质量状况越差。

表 2 水环境质量分级

Table 2 Classification of the water environment quality index	
水环境质量指数	水环境质量分级
EQI≤20	优
20 < EQI≤40	良好
40 < EQI≤60	轻度污染
60 < EQI≤80	中度污染
EQI > 80	重度污染

1.3.2 水质综合状况指数

水质综合状况指数法是以单因子指数法为基础，与水体功能要求相对应，通过统计各指标的相对指数，确定水体的污染程度^[24]。参照文献[9]，其计算方法见公式(2)：

$$WQI = \sum_{i=1}^n WQI_i / n \times 100 \tag{2}$$

式中，WQI 为水质综合状况指数；n 为评价因子项目数；WQI_i 为第 i 项因子的指数，除溶解氧和 pH 之外，其它评价因子的指数计算公式为：

$$WQI_i = c_{ij} / c_{si} \tag{3}$$

式中，c_{ij} 为评价因子 i 在监测点 j 的实测值(mg·L⁻¹)；c_{si} 为评价因子 i 的水质评价标准限值(mg·L⁻¹)。

溶解氧的评价指数计算公式为：

$$WQI_{DO,j} = DO_s / DO_j \quad (DO_j \leq DO_f) \tag{4}$$

$$WQI_{DO,j} = \frac{|DO_f - DO_j|}{DO_f - DO_s} \quad (DO_j > DO_f) \tag{5}$$

$$DO_f = 468 / (31.6 + t) \tag{6}$$

式中，WQI_{DO,j} 为溶解氧的评价指数；DO_j 为溶解氧在监测点 j 质量浓度的实测值(mg·L⁻¹)；DO_s 为溶解氧的水质评价标准限值(mg·L⁻¹)；DO_f 为饱和溶解氧质量浓度(mg·L⁻¹)；t 为水温(℃)。

pH 值的评价指数计算公式为：

$$WQI_{pH,j} = \frac{7.0 - pH_j}{7.0 - pH_{sd}} \quad (pH_j \leq 7.0) \tag{7}$$

$$WQI_{pH,j} = \frac{pH_j - 7.0}{pH_{su} - 7.0} \quad (pH_j > 7.0) \tag{8}$$

式中，WQI_{pH,j} 为 pH 的评价指数；pH_j 为 pH 在监测点 j 的实测值；pH_{sd} 为评价标准中 pH 的下限值；pH_{su} 为评价标准中 pH 的上限值。

根据 WQI 对衡水湖水水质状况进行分级(表 3)^[25]。WQI 值越高，其污染程度越严重。

表 3 水质综合状况指数的分级评价体系

Table 3 Classification of the water quality index		
水质综合指数	水质状况分级	分级依据
WQI≤20	好	多数项目未检出，个别项目检出值在标准内
20 < WQI≤40	较好	检出值在标准内，个别项目接近或超标
40 < WQI≤70	轻度污染	个别项目检出超标
70 < WQI≤100	中度污染	有两项检出值超标
WQI > 100	重度污染	相当部分检出值超标

1.3.3 水体综合营养状态指数

依据文献[4,15,26]，采用综合营养状态指数法对衡水湖的营养状况进行评价，计算公式：

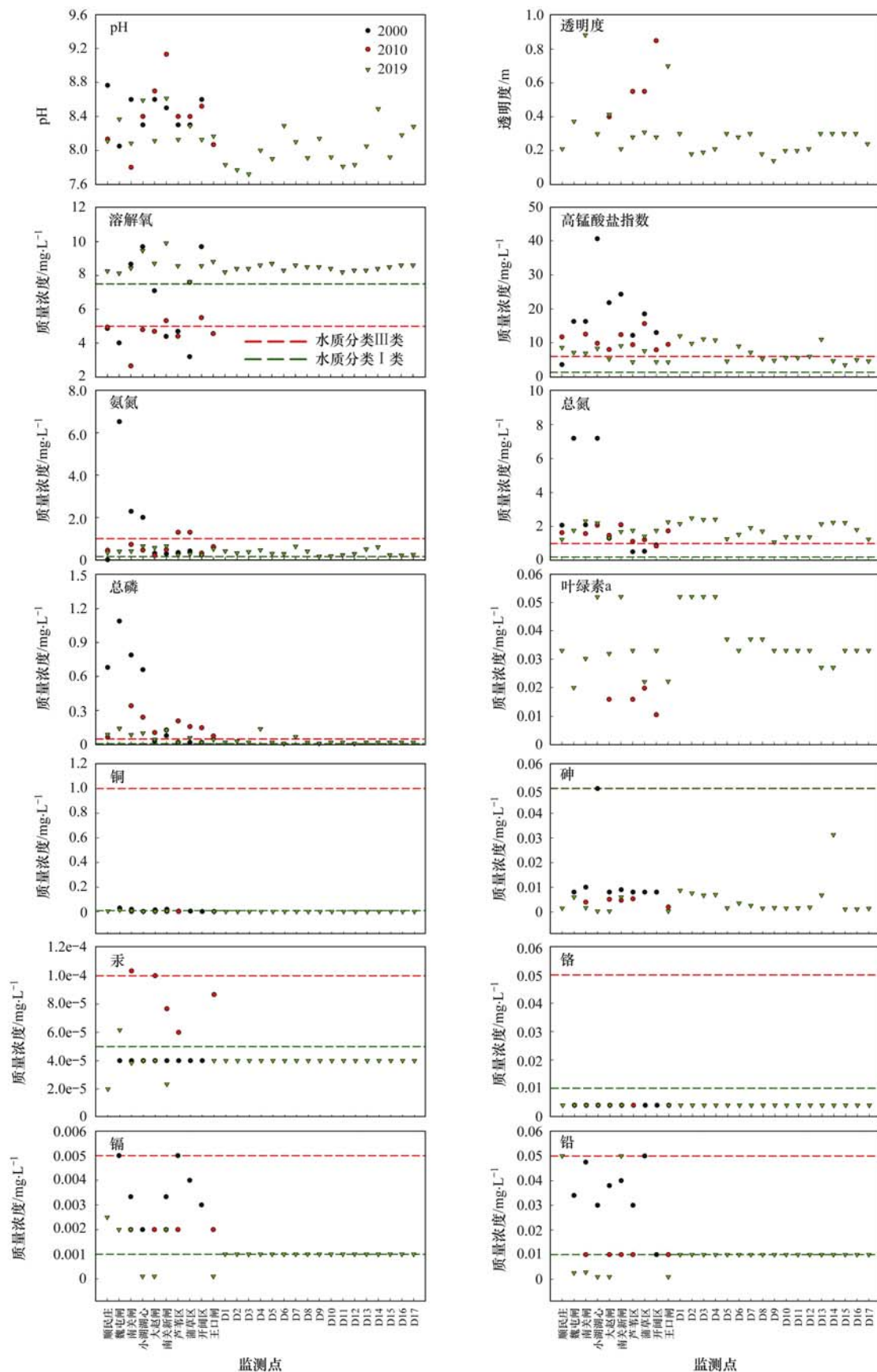
$$TLI = \sum W_j \times TLI(j) \tag{9}$$

式中，W_j 为第 j 项评价因子(包括叶绿素 a、总磷、总氮、透明度和高锰酸盐指数)的营养状态指数的相对权重(分别为 0.267、0.188、0.179、0.183 和 0.183)；TLI(j) 为第 j 项因子的营养状态指数，计算方法见公式(10)~(14)。

$$TLI(Chla) = 10 \times (2.5 + 1.0861 \times \ln Chla) \tag{10}$$

$$TLI(TP) = 10 \times (9.436 + 1.624 \times \ln TP) \tag{11}$$

$$TLI(TN) = 10 \times (5.453 + 1.694 \times \ln TN) \tag{12}$$



2019 年 D1 ~ D17 监测点的铜、汞、铬、镉和铅质量浓度均在检测限以下,此处按照最低检测限质量浓度计

图 2 衡水湖湿地水体不同指标情况

Fig. 2 Conditions of different water indicators in Hengshui Lake

$$TLI(SD) = 10 \times (5.118 - 1.94 \times \ln SD)$$

(13)

$$TLI(\text{高锰酸盐指数}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \times \ln \text{高锰酸盐指数})$$

(14)

式中,Chla 为叶绿素 a 质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); TP 和 TN 分别为总磷和总氮质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); SD 为透明度(m); 高锰酸盐指数单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

根据 TLI 对衡水湖营养状况进行分级(表 4)^[4,15,26]. TLI 值越高,其水体富营养化程度越严重.

表 4 湖泊(水库)营养状态分级标准

Table 4 Classification standard of lake (reservoir) trophic levels	
综合营养指数	营养状态分级
$TLI(\sum) < 30$	贫营养
$30 \leq TLI(\sum) \leq 50$	中营养
$TLI(\sum) > 50$	富营养
$50 < TLI(\sum) \leq 60$	轻度富营养
$60 < TLI(\sum) \leq 70$	中度富营养
$TLI(\sum) > 70$	重度富营养

2 结果与分析

2.1 衡水湖湿地水体监测指标变化特征

2000~2019 年,衡水湖湿地水体 pH、透明度、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、叶绿素 a、总氮、总磷、铜、砷、汞、六价铬、镉和铅情况变化特征和统计分析见图 2 和表 5. 2000~2019 年,衡水湖湿地水体 pH、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、镉和铅的平均值随着时间变化呈现降低的趋势;而溶解氧、总氮、铜和砷的平均值则呈现随时间变化先降低再略微升高的趋势;汞的平均值则先升高再降低. 由于未能收集到 2000 年的水体透明度和叶绿素 a 数据,2010~2019 年,透明度平均值降低,而叶绿素 a 则略微上升. 变异系数可以衡量数据的离散程度^[5]. 由表 5 可以看出,2000 年氨氮和总磷、2019 年砷和铜的变异系数分别达到 1.53、1.13、1.47 和 1.41,表明衡水湖湿地氨氮、总磷、砷和铜质量浓度在空间上的变化较大.

与国家地表水水质分类标准相比,2000 年衡水湖水体溶解氧有 50% 的样点达到Ⅲ类水质标准,2010 年仅有开阔区、顺民庄和南关新闸这 3 个样点达到Ⅲ类标准,2019 年则所有样点均达到Ⅲ类标准,其中有 96.3% 的样点达到Ⅰ类水质标准;对高锰酸盐指数来说,2000 年仅有顺民庄 1 个样点达到Ⅲ类水质标准;2010 年则均未达到Ⅲ类水质标准;2019 年仅有 44.4% 的样点达到Ⅲ类水质标准;对氨氮来说,2000 年有 66.7% 的样点达到Ⅲ类水质标准,2010 年有 77.8% 的样点达到Ⅲ类水质标准,

2019 年则所有样点均达到Ⅲ类水质标准;对总氮来说,2000 年和 2010 年仅有 33.3% 和 11.1% 的样点达到Ⅲ类水质标准,2019 年则均未达到Ⅲ类标准;对总磷来说,2000 年有 44.4% 的样点达到Ⅲ类水质标准,2010 年所有样点均未达到Ⅲ类水质标准,2019 年则有 63.0% 的样点达到Ⅲ类水质标准;铜

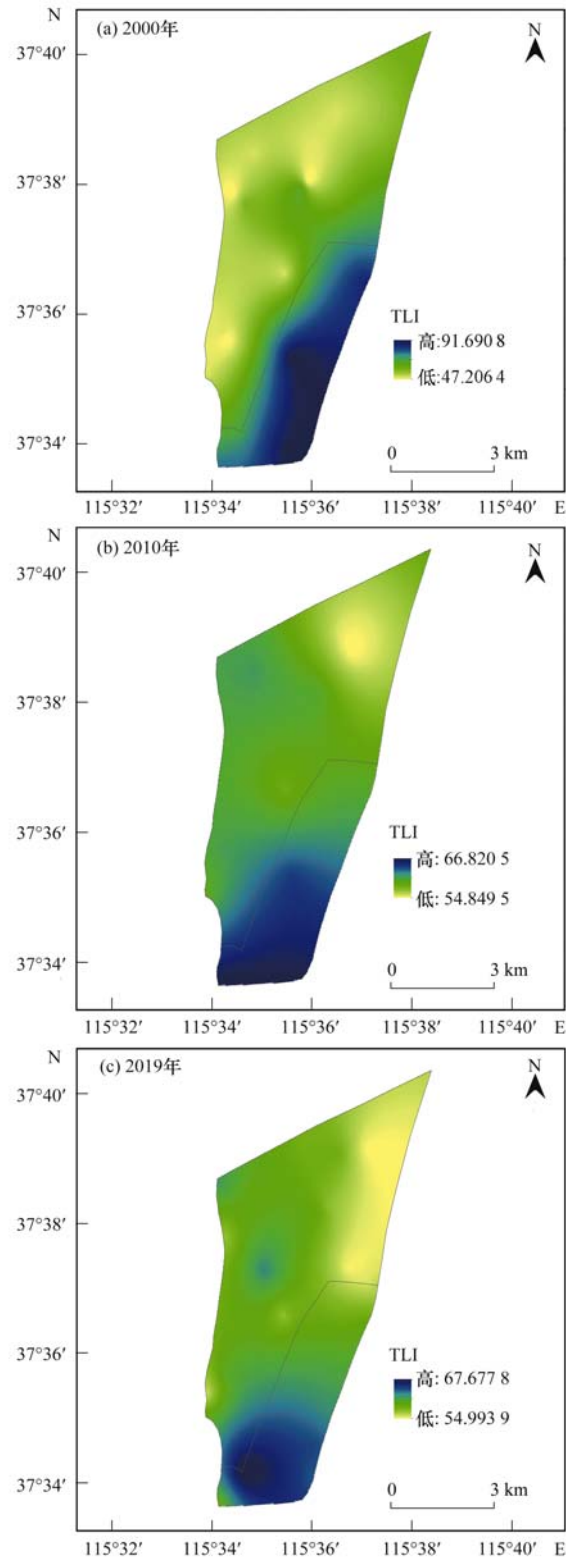


图 3 衡水湖水体综合营养指数时空变化

Fig. 3 Spatio-temporal variations in the TLI in Hengshui Lake

质量浓度均达到Ⅲ类水质标准,其中2000年和2019年分别有44.4%和96.3%的样点达到Ⅰ类水质标准;对砷来说,2000年仅有小湖湖心1个样点未达到Ⅰ类水质标准,2000年和2019年所有样点均达到Ⅰ类标准;对汞来说,2000年所有样点达到Ⅰ类水质标准,2010年有88.9%的样点达到Ⅲ类水质标准,2019年则有96.3%的样点达到Ⅰ类标准;所有样点六价铬质量浓度均达到Ⅰ类水质标准;镉和铅质量浓度均达到Ⅲ类水质标准(图2).表明高锰酸盐指数、总氮和总磷超标是衡水湖存在的主要水环境问题.

2.2 衡水湖湿地水体综合营养状态指数时空变化

衡水湖水体综合营养状态指数时空变化情况如

图3所示.从时间变化趋势来看,2000~2019年衡水湖水体综合营养状态指数呈现降低的趋势,平均指数由2000年的76.2降低到2010年的61.0,再降低到2019年的60.3(表6).从空间分布来看,2000年各样点顺序为:小湖湖心>魏屯闸>南关闸>南关新闻>顺民庄>大赵闸>蒲草区>开阔区>芦苇区;2010年各样点顺序为:南关闸>小湖湖心>南关新闻>蒲草区>芦苇区>顺民庄>大赵闸>王口闸>开阔区;2019年整体上顺序为:南关新闻>小湖>顺民庄>蒲草区>魏屯闸>芦苇区>南关闸>大赵闸>王口闸>开阔区;衡水湖水体综合营养状态指数整体上呈现从南部到中西部再到东北部降低的趋势.

表5 衡水湖湿地水环境指标描述性统计

Table 5 Descriptive statistics of water indicators in the Hengshui Lake								
年份	项目	pH	溶解氧 /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	氨氮 /mg·L ⁻¹	总氮 /mg·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹	铜 /mg·L ⁻¹
2000	最大值	8.77	9.70	40.60	6.52	7.19	1.09	3.00×10 ⁻²
	最小值	8.05	3.20	3.60	0.00	0.51	0.02	2.00×10 ⁻³
	平均值	8.45	6.26	18.51	1.37	2.66	0.38	1.25×10 ⁻²
	标准差	0.22	2.56	10.21	2.10	2.64	0.42	0.01
	变异系数	0.03	0.41	0.55	1.53	1.00	1.13	0.82
2010	最大值	9.13	7.60	15.65	1.30	2.10	0.34	2.00×10 ⁻³
	最小值	7.80	2.66	7.95	0.20	0.85	0.07	2.00×10 ⁻³
	平均值	8.39	4.95	10.80	0.64	1.53	0.16	2.00×10 ⁻³
	标准差	0.38	1.29	2.50	0.40	0.42	0.09	0.00
	变异系数	0.05	0.26	0.23	0.62	0.27	0.53	0.00
2019	最大值	8.61	9.91	12.00	0.65	2.49	0.14	1.40×10 ⁻²
	最小值	7.72	5.53	3.50	0.15	1.08	0.01	1.00×10 ⁻³
	平均值	8.14	8.30	7.24	0.35	1.71	0.05	2.32×10 ⁻³
	标准差	0.25	0.79	2.17	0.14	0.43	0.00	0.01
	变异系数	0.03	0.10	0.30	0.41	0.25	1.41	1.47
2000~2019	变化率/%	-3.6	32.5	-60.9	-74.2	-35.7	-86.5	-81.4

年份	项目	砷 /mg·L ⁻¹	汞 /mg·L ⁻¹	六价铬 /mg·L ⁻¹	镉 /mg·L ⁻¹	铅 /mg·L ⁻¹	透明度 /m	叶绿素 a /mg·L ⁻¹
2000	最大值	5.00×10 ⁻²	4.00×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻³	5.00×10 ⁻³	0.05	—	—
	最小值	8.00×10 ⁻³	4.00×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻³	2.00×10 ⁻³	0.01	—	—
	平均值	1.36×10 ⁻²	4.00×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻³	3.46×10 ⁻³	0.03	—	—
	标准差	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	—	—
	变异系数	1.08	0.00	0.00	0.34	0.36	—	—
2010	最大值	5.3×10 ⁻³	1.03×10 ⁻⁴	4.00×10 ⁻³	2.00×10 ⁻³	0.01	0.85	0.02
	最小值	1.97×10 ⁻³	6.00×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻³	2.00×10 ⁻³	0.01	0.40	0.01
	平均值	4.20×10 ⁻³	8.53×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻³	2.00×10 ⁻³	0.01	0.59	0.02
	标准差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
	变异系数	0.32	0.21	0.00	0.00	0.00	0.32	0.24
2019	最大值	3.13×10 ⁻²	6.17×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻³	2.50×10 ⁻³	0.05	0.89	0.05
	最小值	3.00×10 ⁻⁴	2.00×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻³	1.00×10 ⁻⁴	0.00	0.14	0.02
	平均值	4.32×10 ⁻³	3.93×10 ⁻⁵	4.00×10 ⁻³	1.08×10 ⁻³	0.01	0.30	0.03
	标准差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.14	0.01
	变异系数	0.18	0.00	0.53	1.41	1.06	0.47	0.33
2000~2019	变化率%	-68.3	-1.7	0.0	-68.9	-66.8	-48.4	111.0

1) “—”表示该指标没有测定数据

2.3 衡水湖湿地水质综合指数时空变化

衡水湖水体综合指数时空变化情况如图4所

示.从时间变化趋势来看,2000~2019年衡水湖水体综合指数呈现降低的趋势,平均指数由2000年的

57.9 降低到 2010 年的 35.7,再降低到 2019 年的 27.0(表 6).从空间分布来看,2000 年各样点顺序为:魏屯闸>小湖湖心>南关闸>顺民庄>南关新闻>蒲草区>大赵闸>芦苇区>开阔区;2010 年各样点顺序为:南关闸>小湖湖心>南关新闻>芦苇区>蒲草区>王口闸>大赵闸>顺民庄>开阔区;2019 年整体上顺序为:南关新闻>小湖>魏屯闸>顺民庄>南关闸>芦苇区>王口闸>蒲草区>开阔区>大赵闸;衡水湖水质综合指数整体上也呈现从南部到中西部到东北部降低的趋势.

2.4 衡水湖湿地水环境质量指数时空变化

衡水湖水环境质量指数时空变化特征如图 5 所

示.从时间变化趋势来看,2000~2019 年衡水湖水环境质量呈现降低的趋势,平均指数由 2000 年的 59.8 降低到 2010 年的 38.2,再降低到 2019 年的 30.3(表 6).从空间分布来看,2000 年各样点顺序为:魏屯闸>小湖湖心>南关闸>顺民庄>南关新闻>蒲草区>大赵闸>芦苇区>开阔区;2010 年各样点顺序为:南关闸>小湖湖心>南关新闻>芦苇区>蒲草区>王口闸>大赵闸>顺民庄>开阔区;2019 年整体上顺序为:南关新闻>小湖>魏屯闸>顺民庄>南关闸>王口闸>芦苇区>蒲草区>大赵闸>开阔区;衡水湖水环境质量指数整体上也呈现从南部到中西部到东北部降低的趋势.

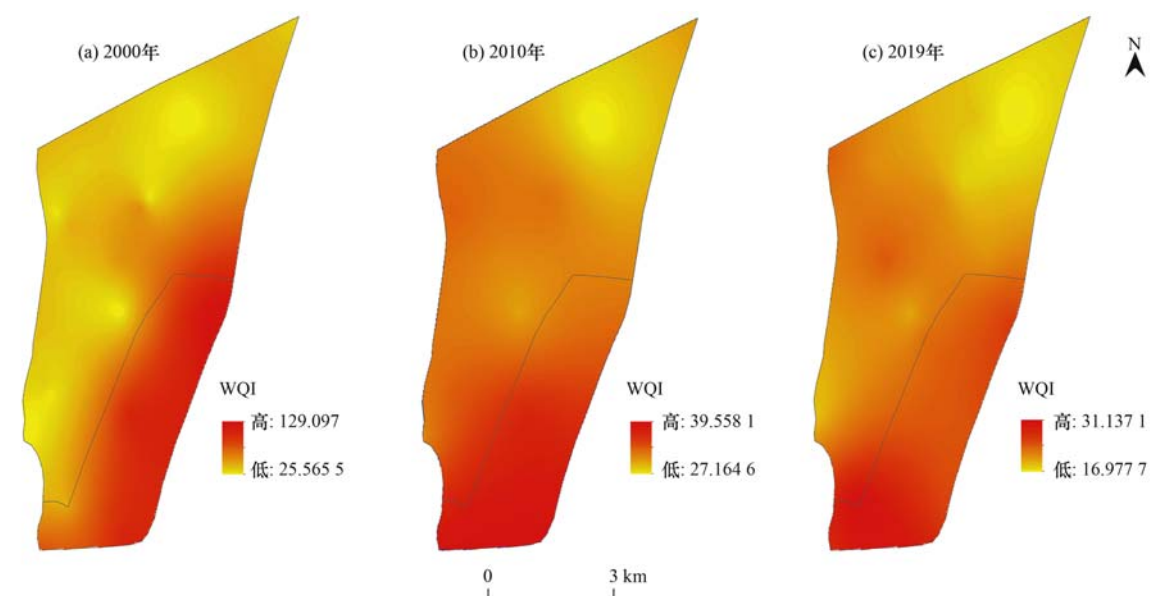


图 4 衡水湖水质综合指数时空变化

Fig. 4 Spatio-temporal variations in the WQI in Hengshui Lake

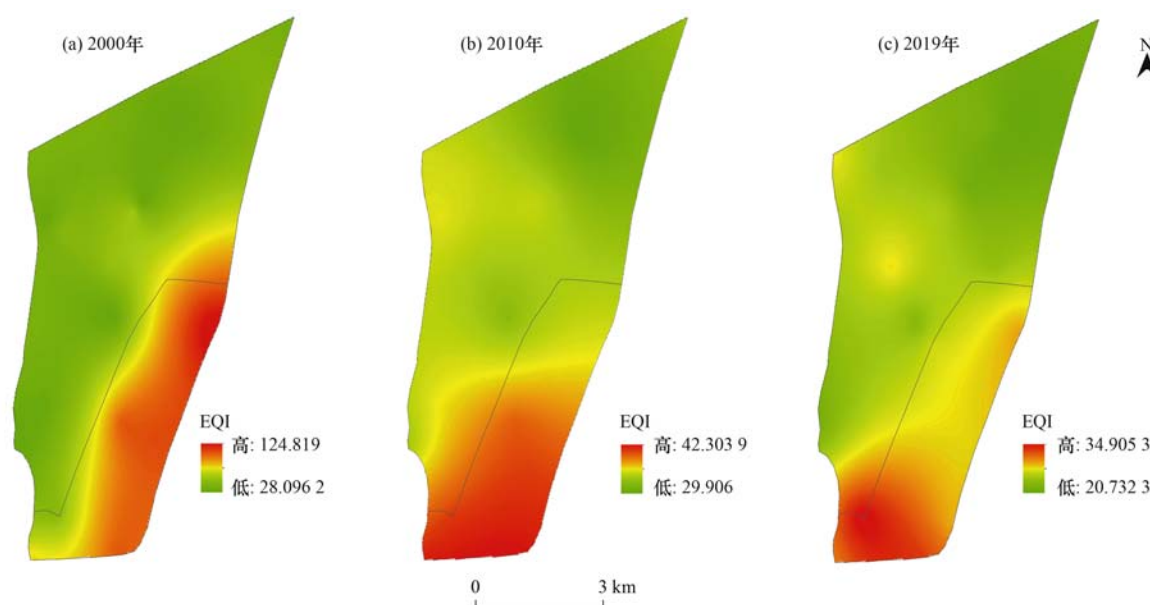


图 5 衡水湖水环境质量指数时空变化

Fig. 5 Spatio-temporal variations in the EQI in Hengshui Lake

表 6 衡水湖湿地水环境质量分级

Table 6 Water environment quality classification for Hengshui Lake

年份	监测点	TLI	营养状态分级	WQI	水质状况分级	EQI	水环境质量分级
2000	顺民庄	63.6	中度富营养	50.8	轻度污染	52.1	轻度污染
	魏屯闸	86.4	重度富营养	129.5	重度污染	125.2	重度污染
	南关闸	77.8	重度富营养	75.1	中度污染	75.4	中度污染
	小湖湖心	91.7	重度富营养	100.7	重度污染	99.8	重度污染
	大赵闸	59.7	轻度富营养	33.8	较好	36.4	良好
	南关新闸	68.7	中度富营养	45.0	轻度污染	47.4	轻度污染
	芦苇区	47.1	中营养	28.6	较好	30.5	良好
	蒲草区	51.1	轻度富营养	35.4	较好	37.0	良好
	开阔区	50.9	轻度富营养	25.5	较好	28.1	良好
	平均值	76.2	重度富营养	57.9	轻度污染	59.8	轻度污染
2010	顺民庄	59.9	轻度富营养	30.6	较好	33.5	良好
	王口闸	59.1	轻度富营养	31.3	较好	34.1	良好
	南关闸	69.3	中度富营养	41.5	轻度污染	44.3	轻度污染
	小湖湖心	66.8	中度富营养	40.2	轻度污染	42.9	轻度污染
	大赵闸	59.5	轻度富营养	31.1	较好	34.0	良好
	南关新闸	65.4	中度富营养	39.1	较好	41.7	轻度污染
	芦苇区	60.4	中度富营养	35.0	较好	37.5	良好
	蒲草区	62.9	中度富营养	32.5	较好	35.5	良好
	开阔区	55.0	轻度富营养	25.4	较好	28.4	良好
	平均值	61.0	中度富营养	35.7	较好	38.2	良好
2019	顺民庄	63.2	中度富营养	26.6	较好	30.2	良好
	魏屯闸	59.4	轻度富营养	27.5	较好	30.7	良好
	王口闸	56.0	轻度富营养	22.4	较好	25.8	良好
	南关闸	58.6	轻度富营养	26.3	较好	29.6	良好
	小湖湖心	65.2	中度富营养	29.9	较好	33.5	良好
	大赵闸	56.4	轻度富营养	18.9	好	22.7	良好
	南关新闸	66.8	中度富营养	35.6	较好	38.7	良好
	芦苇区	59.4	轻度富营养	19.9	好	23.9	良好
	蒲草区	59.2	轻度富营养	21.8	较好	25.5	良好
	开阔区	59.2	轻度富营养	19.9	好	23.9	良好
	D1	62.0	中度富营养	24.1	较好	27.8	良好
	D2	64.5	中度富营养	24.2	较好	28.3	良好
	D3	63.5	中度富营养	24.2	较好	28.1	良好
	D4	69.0	中度富营养	30.9	较好	34.7	良好
	D5	54.7	轻度富营养	16.7	好	20.5	良好
	D6	56.3	轻度富营养	20.9	较好	24.4	良好
	D7	62.0	中度富营养	25.1	较好	28.8	良好
	D8	58.1	轻度富营养	19.2	好	23.1	良好
	D9	54.7	轻度富营养	15.8	好	19.6	优
	D10	57.0	轻度富营养	16.9	好	20.9	良好
	D11	57.0	轻度富营养	16.3	好	20.4	良好
	D12	55.1	轻度富营养	16.6	好	20.5	良好
	D13	59.6	轻度富营养	24.8	较好	28.3	良好
	D14	55.6	轻度富营养	24.1	较好	27.3	良好
	D15	54.7	轻度富营养	19.6	好	23.1	良好
	D16	55.8	轻度富营养	19.9	好	23.5	良好
	D17	55.1	轻度富营养	17.9	好	21.6	良好
	平均值	60.3	中度富营养	27.0	较好	30.3	良好
2000 ~ 2019	变化率/%	-20.9		-53.4		-49.2	

3 讨论

3.1 衡水湖湿地水体监测指标相关性

Pearson 相关性是分析不同指标之间同源性的常用方法,相关性高的指标之间具有相似的污染源

或迁移特征^[5]. 相关性分析表明(表 7):高锰酸盐指数、氨氮、总氮和总磷这 4 个指标之间均存在极显著正相关关系($P < 0.01$),说明高锰酸盐指数、氨氮、总氮和总磷可能具有相同的污染源. 高锰酸盐指数、总磷与铜、砷和镉之间、氨氮与铜和镉之间、总氮与

铜和砷之间、铜与镉之间、铅与高锰酸盐指数和镉之间均存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$)；铅与总磷和铜之间存在显著正相关关系 ($P < 0.05$)，可以推测这些指标可能具有同样的污染源或者存在迁移转化之间的相互作用。监测的各指标间均不存在显著负相关，说明这些指标之间不存在明显的竞争作用。

表 7 衡水湖湿地水体监测指标相关性分析矩阵¹⁾

Table 7 Correlation matrix of different water indicators in Hengshui Lake										
	高锰酸盐指数	氨氮	总氮	总磷	铜	砷	汞	六价铬	镉	铅
高锰酸盐指数	1.000									
氨氮	0.383 **	1.000								
总氮	0.536 **	0.746 **	1.000							
总磷	0.420 **	0.805 **	0.706 **	1.000						
铜	0.421 **	0.695 **	0.405 **	0.694 **	1.000					
砷	0.709 **	0.267	0.594 **	0.402 **	0.100	1.000				
汞	-0.017	-0.057	-0.039	0.017	-0.106	-0.071	1.000			
六价铬	0.048	0.006	-0.024	0.015	0.087	0.112	0.053	1.000		
镉	0.488 **	0.489 **	0.181	0.505 **	0.679 **	0.192	0.064	0.228	1.000	
铅	0.552 **	0.316	0.110	0.403 *	0.582 *	0.259	-0.316	0.174	0.683 **	1.000

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关；* * 表示在 0.01 水平上显著相关

3.2 衡水湖湿地水环境变化特征与污染源分析

从 2000 ~ 2019 年，衡水湖水体溶解氧质量浓度升高了 32.5%，而总磷、铜、氨氮、镉、砷、铅、高锰酸盐指数、总氮和汞质量浓度则分别降低了 86.5%、81.4%、74.2%、68.9%、68.3%、66.8%、60.9%、35.7% 和 1.7% (表 5)。同时，综合营养状态指数、水质综合指数和水环境质量指数分别降低了 20.9%、53.4% 和 49.2% (表 6)。自 2000 年河北衡水湖自然保护区成立，并于 2003 年晋升为国家级自然保护区以来，当地政府出台了一系列保护政策^[12,27]，同时实施了封堵所有入湖排污口、搬迁湖边污染企业、拆除违规超限建筑、取缔所有燃油机动船只、取消非法网拦网养殖以及季节性收割芦苇和蒲草等措施^[27]。2011 年衡水滨湖新区管理委员会成立后，在行政管理上切实加强了这一系列政策和措施的落实，从而有效地控制了水体污染，使衡水湖水体综合营养状态、水质状况和水环境质量分别由 2000 年的重度富营养、轻度污染和轻度污染水平降低到 2010 年和 2019 年的中度富营养、较好和良好水平 (表 6)。

2000 年衡水湖污染严重的区域主要集中在冀州小湖及其周边的魏屯闸、南关闸和南关新闻 (图 3 ~ 5)。冀州小湖是一个独立的库区，2000 年其水环境质量达到重度污染水平 (表 6)，主要以总氮 (7.2 倍) 和高锰酸盐指数 (6.7 倍) 超标为主 (图 2)。这是由于 2000 年衡水湖省级自然保护区建立后，为改善衡水湖东湖水质状况，把原向大湖排放的所有排污口堵死，改向冀马渠或冀州小湖排放^[12]，致使小湖水体污染严重。2010 年小湖水环境质量仍然为轻度污染水平；2019 年虽然达到良好水平，但仍高于绝大多数监测点 (表 6)，其中高锰酸盐指数超标 1.6 倍 (图 2)。这是由于虽然近些年衡水湖的严禁一切

形式的排污，但在小湖上游的冀码渠仍有 11 处化肥厂和化工厂等排污口。平日进水闸关闭，污水不能进入湖区，一旦上游来水，所有积存在河道内的污水会汇入小湖，严重影响小湖水环境质量^[13]。魏屯闸位于冀州小湖的东北角，2000 年其水环境质量达到重度污染水平，其中总磷和高锰酸盐指数分别超标 21.8 倍和 7.2 倍 (图 2)。这可能是由于随着小湖不断接受冀州市的排污，致使魏屯闸水质不断恶化引起的；同时魏屯镇医疗器械和橡胶等民营企业发达，也是导致该监测点污染严重的重要原因。随着保护区成立后，严禁企业废水入湖措施的实施，魏屯闸水环境质量达到了良好水平，但是总磷仍然超标 2.8 倍 (图 2)。南关闸和南关新闻位于衡水湖南部冀州市，2000 年南关闸和南关新闻的水环境质量分别为中度污染和轻度污染，其中南关闸总磷超标 15.8 倍，南关新闻高锰酸盐指数超标 4.1 倍 (图 2)。这是因为 2003 年以前冀州市的生活和工业废水主要通过此处排入衡水湖^[12]，导致这两处闸口污染严重。2003 年衡水湖国家级自然保护区成立后，该排污口已关闭。相应地 2010 年和 2019 年南关闸和南关新闻的水环境质量也均逐渐改善到轻度污染和良好水平。但与其他样点相比，2019 年南关新闻的水环境质量指数还相对较高，主要以高锰酸盐指数 (1.5 倍) 和总磷 (2.6 倍) 超标为主 (图 2)，这可能是由于闸上工业和生活污水的侧渗导致的^[28]。

顺民庄作为衡水湖唯一一个湖心渔庄，2000 年其水环境质量为轻度污染水平，其中总磷和总氮分别超标 13.6 倍和 2.1 倍 (图 2)。这主要是由于当地居民将生活污水和垃圾直接排入湖内，以及村庄周边拦网养鱼、投放饲料导致的。随着网箱养鱼和拦网捕鱼的取缔，以及生活污水和垃圾的有效管理，2010

年和2019年顺民庄水环境质量已达到良好水平,总磷和总氮超标程度分别降低到1.8倍和1.2倍(图2).2019年底,为响应衡水湖生态搬迁项目,顺民庄已整体搬迁完毕,其原址将进行绿色生态恢复工作,未来该监测点水环境质量将会持续改善.

王口闸是衡水湖引黄入湖的进水口,水环境质量均达到良好水平.但2019年总氮超标2.3倍.这可能是由于引水途经枣强“皮毛之乡”的大营镇和枣强县城,以及广大农村地区,引水沿途工业、生活污水和农业非点源污染物等随引水汇入衡水湖导致的^[7,12].与其他监测点相比,芦苇区、蒲草区和开阔区3个时间段的水环境质量相对较好,均达到良好水平(表6),但2019年高锰酸盐指数和总氮仍超过地表水Ⅲ类标准1.3~1.5倍(图2).这可能是由于湖内植物枯落腐烂和引水污染物的汇入引起的.

尽管衡水湖水环境状况有显著地改善趋势,但2019年仍有55.6%、100.0%和37.0%的监测点水体高锰酸盐指数、总氮和总磷超标,特别是小湖及其周边闸口超标尤为明显,这是可能由于衡水湖水体缺乏流动、湖内植物枯落腐烂、工业和生活污水的侧渗与下泄等^[7,12,13],为水体富营养化创造了条件.因此,小湖周边污染防控和水体治理是未来衡水湖水环境管理的重点.同时引水农业面源污染物的汇入,以及旅游业开发带来的人类活动日趋频繁等^[7,12,13,28],也给衡水湖水环境质量带来了挑战.

4 结论

(1)2000~2019年,衡水湖湿地水体pH、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、镉和铅平均值随着时间变化呈现降低的趋势;而溶解氧、总氮、铜和砷则随时间变化先降低再略微升高.随着时间的变化,达到Ⅲ类水质的监测点比例升高.衡水湖水体高锰酸盐指数、总氮和总磷超标是存在的主要水环境问题.

(2)应用综合营养状态指数法、水质综合状况指数法和水环境质量指数法评价衡水湖水体营养状态、水质状况和水环境质量.从时间上来看,2000~2019年3种指数均呈现降低的趋势;从空间上来看,3种指数整体上呈现从南部到中西部到东北部降低的趋势.

(3)衡水湖国家级自然保护区建立后,一系列水体保护政策和措施的实施,使衡水湖水体综合营养状态、水质状况和水环境质量分别降低了20.9%、53.4%和49.2%,显著改善了衡水湖水环境质量.但是污水的侧渗与下泄、引水农业面源污染物的汇入,以及湖内植物枯落腐烂等也给衡水湖水环境质量带来很大的挑战.

参考文献:

- [1] Posthuma L, Munthe J, Van Gils J, *et al.* A holistic approach is key to protect water quality and monitor, assess and manage chemical pollution of European surface waters[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2019, **31**, doi: 10.1186/s12302-019-0243-8.
- [2] Ighalo J O, Adeniyi A G. A comprehensive review of water quality monitoring and assessment in Nigeria[J]. *Chemosphere*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127569.
- [3] 徐好. 南四湖水质时空分布及评价研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
Xu H. Temporal spatial distribution and evaluation of water quality in Nansi Lake[D]. Ji'nan: University of Ji'nan, 2019.
- [4] 杨梅玲, 胡忠军, 刘其根, 等. 利用综合营养状态指数和修正的营养状态指数评价千岛湖水质变化(2007年-2011年)[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, **22**(2): 240-245.
Yang M L, Hu Z J, Liu Q G, *et al.* Evaluation of water quality by two trophic state indices in Lake Qiandaohu during 2007-2011[J]. *Journal of Shanghai University*, 2013, **22**(2): 240-245.
- [5] 王磊, 汪文东, 刘懂, 等. 象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3194-3203.
Wang L, Wang W D, Liu D, *et al.* Risk assessment and source analysis of heavy metals in the river of a typical bay watershed[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3194-3203.
- [6] 李国华, 李畅游, 史小红, 等. 基于主成分分析及水质标识指数法的黄河托克托段水质评价[J]. *水土保持通报*, 2018, **38**(6): 310-314, 321.
Li G H, Li C Y, Shi X H, *et al.* Evaluation of water quality of Tokto section in Yellow River based on principal component analysis and water quality identification index[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(6): 310-314, 321.
- [7] 温晓君, 陈辉, 白军红. 基于模糊矩阵的衡水湖水环境质量评价及分析[J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(2): 292-296.
Wen X J, Chen H, Bai J H. Evaluation and analysis on water environmental quality of Hengshui Lake based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(2): 292-296.
- [8] Ganiyu S A, Badmus B S, Olurin O T, *et al.* Evaluation of seasonal variation of water quality using multivariate statistical analysis and irrigation parameter indices in Ajakanga area, Ibadan, Nigeria[J]. *Applied Water Science*, 2018, **8**, doi: 10.1007/s13201-018-0677-y.
- [9] 安国安, 林兰钰, 邹世英. 基于综合指数法的城市河流水环境质量排名探讨[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(6): 50-57.
An G A, Lin L Y, Zou S Y. Discussion on quality ranking of urban river water environment based on comprehensive pollution index[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(6): 50-57.
- [10] Mercado-Garcia D, Beeckman E, Van Butsel J, *et al.* Assessing the freshwater quality of a large-scale mining watershed: the need for integrated approaches[J]. *Water*, 2019, **11**(9), doi: 10.3390/w11091797.
- [11] Zhang M Y, Cui L J, Sheng L X, *et al.* Distribution and enrichment of heavy metals among sediments, water body and plants in Hengshuihu Wetland of Northern China[J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(4): 563-569.
- [12] 刘振杰. 河北衡水湖湿地水环境分析及综合防治对策[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
Liu Z J. The analysis and integrated protection countermeasure of water environment of Hengshui Lake wetland[D]. Beijing:

- China Agricultural University, 2004.
- [13] 丁二峰. 衡水湖水环境特征分析及改善对策[J]. 地下水, 2015, **37**(4): 84-86.
- [14] 江春波, 张明武, 杨晓蕾. 华北衡水湖湿地的水质评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, **50**(6): 848-851.
- Jiang C B, Zhang M W, Yang X L. Water quality evaluation for the Hengshui Lake wetland in northern China[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, **50**(6): 848-851.
- [15] 汪明宇, 刘汝海, 王艳, 等. 子牙河流域湿地污染时空分布及湿地富营养化[J]. 中国海洋大学学报, 2019, **49**(5): 93-100.
- Wang M Y, Liu R H, Wang Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of main contaminations and eutrophication assessment in wetlands of Ziya River Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, **49**(5): 93-100.
- [16] 周振昉. 衡水湖水体氮磷变化规律及富营养化现状分析[J]. 水科学与工程技术, 2014, (5): 16-19.
- Zhou Z F. The Hengshui Lake water body nitrogen, phosphorus change rule and eutrophication present situation analysis[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2014, (5): 16-19.
- [17] 丁二峰. 衡水湖叶绿素 a 含量变化及其与氮、磷浓度关系的初步研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, **9**(6): 87-89.
- Ding E F. Preliminary study on change of chlorophyll-a concentration and its relationships with TN and TP in Hengshui Lake[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, **9**(6): 87-89.
- [18] 王贺年, 张曼胤, 郭子良, 等. 衡水湖底泥中 7 种重金属元素含量的分布及其潜在生态风险评价[J]. 湿地科学, 2020, **18**(2): 191-199.
- Wang H N, Zhang M Y, Guo Z L, *et al.* Distribution of contents of 7 kinds of heavy metal elements in the sediments of Hengshui Lake and their ecological risk assessment[J]. Wetland Science, 2020, **18**(2): 191-199.
- [19] 王乃姗, 张曼胤, 崔丽娟, 等. 河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1754-1762.
- Wang N S, Zhang M Y, Cui L J, *et al.* Contamination and ecological risk assessment of mercury in Hengshuihu wetland, Hebei province[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1754-1762.
- [20] 张彦增, 尹俊岭, 崔希东, 等. 衡水湖湿地恢复与生态功能[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [21] 解莉. 衡水湖湿地生态系统健康评价及恢复研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- Xie L. The study on evaluation and renewal of ecosystem health of Hengshui Lake wetland[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [22] 范玉贞. 衡水湖水体质量的研究[J]. 江苏农业科学, 2010, (4): 412-413.
- Fan Y Z. Study on water quality in Hengshui Lake[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2010, (4): 412-413.
- [23] 陈雨艳, 杨坪. 区域水环境质量综合评价方法的研究[J]. 环境保护科学, 2015, **41**(5): 99-102.
- Chen Y Y, Yang P. Investigation for the comprehensive assessment system of regional water environmental quality[J]. Environmental Protection Science, 2015, **41**(5): 99-102.
- [24] 郑灿, 杨子超, 邱小琮, 等. 宁夏引黄灌区排水沟水环境质量及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(6): 74-79, 87.
- Zheng C, Yang Z C, Qiu X C, *et al.* Water environmental quality of drainage ditches and their controls in Ningxia irrigation area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(6): 74-79, 87.
- [25] 周春何. 水环境质量单因子与算术平均值评价方法对比研究[J]. 环境与可持续发展, 2018, **43**(1): 67-69.
- Zhou C H. Comparative study of single factor and arithmetic mean evaluation method in water environmental quality[J]. Environment and Sustainable Development, 2018, **43**(1): 67-69.
- [26] 中国环境监测总站. 湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定[Z]. 国家环境保护总局, 2001.
- [27] 衡水湖管委会综合办公室. 衡水湖管委会关于衡水湖污染防治情况及下步工作设想的报告[R]. 衡水市人民政府, 2010.
- [28] 崔希东, 尹新明, 尹俊岭. 衡水湖湿地水环境现状及治理措施研究[J]. 海河水利, 2011, (1): 18-20.
- Cui X D, Yin X M, Yin J L. Study on current water environment conditions and corresponding treatment measures in Hengshui Lake wetlands[J]. Haihe Water Resources, 2011, (1): 18-20.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)