

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 ..... 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM<sub>2.5</sub> 影响霾污染的关键尺度谱特征 ..... 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子特征及来源分析 ..... 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 ..... 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 ..... 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 ..... 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 ..... 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 ..... 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 ..... 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 ..... 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 ..... 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 ..... 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 ..... 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 ..... 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义 ..... 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 ..... 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 ..... 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 ..... 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 ..... 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 ..... 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 ..... 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 ..... 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 ..... 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 ..... 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 ..... 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 ..... 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 ..... 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 ..... 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 ..... 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 ..... 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 ..... 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 ..... 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 ..... 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 ..... 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 ..... 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 ..... 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 ..... 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

<sup>13</sup>C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 ..... 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 ..... 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例 ..... 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 ..... 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价 ..... 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 ..... 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 ..... 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 ..... 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 ..... 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 ..... 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 ..... 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 ..... 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 ..... 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 ..... 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 ..... 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 ..... 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

# 北京北运河河流生态系统健康评价

顾晓昀<sup>1,2,3</sup>, 徐宗学<sup>2,3\*</sup>, 刘麟菲<sup>2,3</sup>, 殷旭旺<sup>1</sup>, 王汨<sup>1</sup>

(1. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁省水生生物重点实验室, 大连 116023; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 随着城市化的不断推进, 北京河流生态系统面临着巨大挑战. 以北京市北运河水系为例, 于 2015 年 7 月对 25 个样点进行了野外调查, 采集了浮游植物、底栖动物、水环境因子和栖息地环境质量数据. 选取涵盖水生生物、水文、水质和栖息地的 22 个候选评价指标, 采用主成分分析(principal component analysis, PCA)和相关分析进行筛选, 并用熵权法确定各评价指标权重, 构建了北运河河流生态系统健康评价指标体系, 通过河流生态健康综合指数对其健康状况进行了评价. 结果表明, 北运河河流生态系统健康评价指标体系包含浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、水温、生化需氧量、氨氮、氟化物、锌、石油类和栖息地环境质量评价指标(qualitative habitat evaluation index, QHEI)9 项指标; 全流域 25 个样点中, 有 12% 为 I 级和 II 级, 36% 为 III 级, 超过 50% 为 IV 级和 V 级. 北运河河流生态系统的健康状况总体较差, 其中, 上游地区普遍较好, 中下游地区相对较差, 且呈现出较强的空间异质性. 南沙河、清河中游、通惠河干流的健康状况普遍较差, 相对较好的凉水河上游地区和温榆河支流交错镶嵌其中, 形成了北运河水系复杂的河流生态系统现状.

**关键词:** 北运河水系; 河流生态系统; 水生生物; 熵权法; 健康评价

中图分类号: X171; X821 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2576-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706229

## Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China

GU Xiao-yun<sup>1,2,3</sup>, XU Zong-xue<sup>2,3\*</sup>, LIU Lin-fei<sup>2,3</sup>, YIN Xu-wang<sup>1</sup>, WANG Mi<sup>1</sup>

(1. Liaoning Provincial Key Laboratory for Hydrobiology, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

**Abstract:** With increasing urbanization, the stream ecosystem in Beijing has faced great challenges. Phytoplankton, benthic macroinvertebrates, and water quality were investigated based on 25 sampling sites in the North Canal River basin in July 2015, and the quality of the habitat was assessed in situ. A total of 22 metrics, including aquatic organism, hydrology, water quality, and habitat, were calculated to be the candidate indicators. A principal component analysis (PCA) and correlation analysis were used to select the core metrics from the candidate indicators, and the weight of each core metric was estimated by using the entropy method. The integrated index of stream ecological health was constructed to assess the health condition of the North Canal River basin. The results of the PCA and correlation analysis showed that nine metrics were selected as the core metrics to construct the integrated index of stream ecological health, i. e., the Shannon-Wiener diversity index of phytoplankton and benthic macroinvertebrates, water temperature, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, F<sup>-</sup>, Zn, petroleum, and the qualitative habitat evaluation index (QHEI). According to the results of the health assessment, 12% of the sampling sites in the North Canal River basin were considered to be healthy (I) or sub-healthy (II), and more than half were poor (IV) or bad (V). Therefore, the aquatic ecosystem in the North Canal River basin was generally unhealthy. The upstream was better than the midstream and downstream, where the spatial heterogeneity of the health condition was strong. The health condition in the Nansha River, the midstream of the Qinghe River, and the main stream of the Tonghui River were poor, while the upstream of the Liangshui River and the tributaries of the Wenyu River were good. In general, the condition of the stream ecosystem in the North Canal River basin was relatively complicated.

**Key words:** North Canal River basin; stream ecosystem; aquatic organisms; entropy method; health assessment

河流是重要的自然生态系统之一, 也是陆地生态系统和水生态系统间物质循环、能量流动和信息传递的主要通道, 发挥着重要的生态功能<sup>[1,2]</sup>. 随着城市化规模的不断扩大, 河流生态系统遭受到前所未有的威胁与破坏. 如何监测和评估河流生态系统健康状况, 修复和保护受损河流生态系统, 已成为当今河流管理的重要内容<sup>[3]</sup>.

河流生态系统健康评价作为河流管理的重要工具, 在世界范围内得到了广泛应用. 河流生态系统健康评价方法总体上可以划分为指示物种法和指标

收稿日期: 2017-06-23; 修订日期: 2017-11-23

基金项目: 北京市水生态监测调查与研究项目

作者简介: 顾晓昀(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为河湖健康评价, E-mail: guxiaoyun92@163.com

\* 通信作者, E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

体系法，如欧盟水框架导则 (water framework directive, WFD)<sup>[4]</sup>和溪流状态指数 (index of stream condition, ISC)<sup>[5]</sup>等。指示物种法主要根据水体中指示物种的结构功能和数量变化来表征河流生态系统健康状况，该法简单易操作，但也存在一些问题，如仅依靠某几类指示物种很难全面展现河流生态系统复杂的变化、难以明确指示物种对河流生态系统健康指示作用的强弱等<sup>[6]</sup>。因此，综合物理、化学、生物、水文、栖息地，甚至社会经济的指标体系法应运而生。指标体系法以其综合性、全面性和易量化的特点，成为当前河流生态系统健康评价的常用方法，尤其是在受人类活动影响较大的城市河流评估方面发挥了巨大作用<sup>[6, 7]</sup>。

我国的河流生态系统健康研究起步较晚，唐涛等<sup>[8]</sup>于 2002 年率先对河流生态系统健康进行了探索。近年来，随着社会经济的发展和城市化水平的提高，我国对城市河流的保护和整治力度逐步加强，众多学者开始关注我国城市河流生态系统健康，并在太湖流域、海河流域、珠江流域等地区取得了丰富的研究成果。于志慧等<sup>[9]</sup>选取 5 大要素 9 个指标构建了河流健康评价指标体系，并运用熵权物元模型对太湖流域湖州市区不同城市化水平下的河流健康状况进行了定量评价和动态分析；郝利霞等<sup>[7]</sup>选取了水质、营养盐和底栖动物 3 类 10 个指标构建河流生态系统健康评估指标体系，并从化学完整性和生物完整性两方面评价了海河流域河流生态系统健康；邓晓军等<sup>[10]</sup>构建了包含自然生态、社会经济和景观环境等 3 个方面 24 个指标的城市河

流健康评价指标体系，并以漓江市区段为例，采用基于层次分析法的模糊综合评价模型进行了健康评价。这些研究大多应用指标体系法，并取得了较好的评价效果。指标体系法成为城市河流生态系统健康评价的重要发展方向，具有不可替代的优越性<sup>[11]</sup>。

北运河水系覆盖北京市九个区，北京七成以上人口在此流域内工作生活，是北京市人口最多、城市化水平最高的流域。随着城市化的推进，北运河水系开始出现水质污染、生境破坏、生态失衡等问题，严重制约了流域内社会经济的可持续发展<sup>[12, 13]</sup>。基于此，本文采用主成分分析和相关分析筛选河流生态系统健康评价指标，并用熵权法确定各指标权重，构建北运河河流生态系统健康评价指标体系，并通过河流生态健康综合指数进行健康评价，以期为北运河河流生态系统的管理和保护提供科学依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点设置

北运河水系是北京市的五大水系之一，也是唯一发源于北京市境内的水系。北运河为海河支流，地形以平原为主，水系内有温榆河、清河、坝河、通惠河、凉水河等<sup>[14]</sup>。作为北京市的主要排洪通道，北运河每年承纳北京市区约 90% 的排洪量<sup>[15]</sup>。本研究于 2015 年 7 月对北运河水系进行采样调查，共设置 25 个采样点，如图 1 所示。为使采样点尽可能准确地反映河流生态系统的实际健康状况，布点

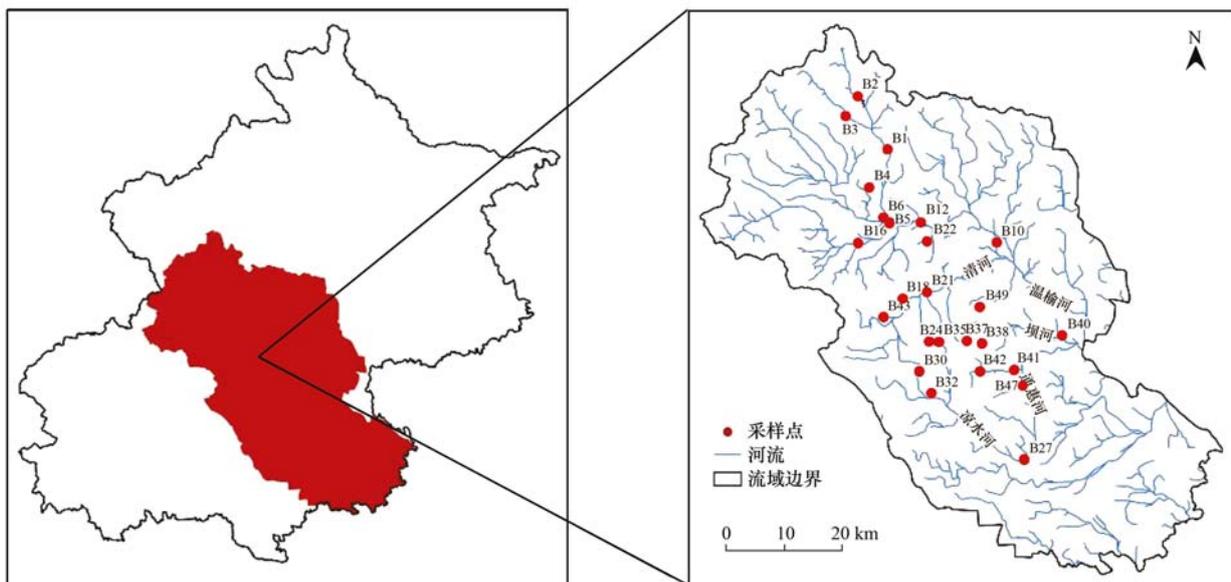


图 1 北运河水系采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the North Canal River basin

原则主要依据水系内的人类活动干扰强度,即人类活动干扰越强,采样点越密集.此外,采样点要能够代表点位附近河段尺度的水体自然特征.由于北运河水系内海淀区、朝阳区和中心城区的人口密度较大,人类活动干扰较强,因此采样点大多集中在这几个区内.用 MAGELLAN 全球定位系统 (eXplorist-200) 记录采样点的经纬度.

## 1.2 水生生物样品采集与鉴定

### 1.2.1 浮游植物

针对所选采样点,用有机玻璃采水器在水深 0.5 m 处采集水样 2 L,现场加入 10 mL 鲁哥试液固定,带回实验室后静置 24 h,浓缩并定容至 100 mL.取 0.1 mL 样品置于浮游植物计数框内,在 400 倍显微镜下依据文献[16~18]进行物种鉴定和细胞计数,样品尽量鉴定到属或种.

### 1.2.2 底栖动物

在以所选采样点为中心、50 m 为半径的圆形区域内,使用 1/16 m<sup>2</sup> 的彼得森采泥器采集一个泥样,将采集到的泥样用 60 目的网筛筛洗,并转入白磁盘中.在采样现场用人工挑拣的方法,将肉眼可见的底栖动物样品转入 200 mL 的广口塑料瓶中,并加入 95% 的酒精溶液保存待检.转入实验室后,依据相关的文献资料<sup>[19~21]</sup>,在显微镜或解剖镜下进行分类和计数,样品尽量鉴定到属或种.

## 1.3 环境因子测定

### 1.3.1 水环境因子

本研究共监测水环境因子 19 个,其中水文因子 1 个,即水温 (Wtemp);水质因子 18 个,包括 pH 值、电导率 (Cond)、溶解氧 (DO)、生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>)、高锰酸盐指数、氨氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、氟化物 (F<sup>-</sup>)、氯化物 (Cl<sup>-</sup>)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、铅 (Pb)、镉 (Cd)、砷 (As)、汞 (Hg)、石油类和挥发酚.采样时利用便携式 pH 计和便携式水质监测仪 (YSI85) 现场测定 pH 值、水温 (Wtemp)、电导率 (Cond) 和溶解氧 (DO);同时在各采样点现场采集两个平行水样 (各 2L),置于低温保温箱中,并于 48h 内带回实验室测定生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>)、高锰酸盐指数、氨氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、氟化物 (F<sup>-</sup>)、氯化物 (Cl<sup>-</sup>)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、铅 (Pb)、镉 (Cd)、砷 (As)、汞 (Hg)、石油类和挥发酚.水样的采集、保存和室内测定均参照 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》和《水和废水监测分析方法》<sup>[22]</sup>.

### 1.3.2 栖息地环境质量

采用栖息地环境质量评价指标 (qualitative habitat evaluation index, QHEI) 于各采样点现场打分,对美国 EPA 快速生物评价手册中的评价方法作适当修改,最终确定 10 个指标,包括底质、栖息地复杂性、流速与水深结合特征、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度和河岸土地利用类型,每项 20 分,总分 200 分,划分为健康、较好、一般和较差这 4 个等级,分数越高代表栖息地环境质量越好<sup>[23,24]</sup>.

## 1.4 数据分析

### 1.4.1 评价指标的选择与筛选

选取能反映北运河河流生态系统健康状况的 4 类 22 个指标作为候选评价指标,其中水生生物指标有 2 个,包括浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数和底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数;水文指标有 1 个,即 Wtemp;水质指标有 18 个,包括 pH、Cond、DO、BOD<sub>5</sub>、高锰酸盐指数、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Cu、Zn、Pb、Cd、As、Hg、石油类和挥发酚;栖息地指标 1 个,即 QHEI.采用 BioDiversity Professional 2.0 计算 Shannon-Wiener 多样性指数.

对 22 个评价指标进行筛选,筛选的原则包括:①评价指标对河流生态系统变化具有明显的响应;②评价指标间相互独立、不存在重复信息;③能全面反映河流生态系统健康的不同属性.筛选的步骤主要包括判别能力分析、特征贡献率分析和独立性分析.判别能力分析是指分析评价指标与河流生态系统的响应关系,剔除对河流生态系统变化不敏感的指标;特征贡献率分析是指通过主成分分析 (principal component analysis, PCA) 剔除对河流生态系统特征贡献率较低的指标,主要采用最大方差旋转法 (Varimax),按照 70% 的累积方差贡献率提取出主成分,选择载荷值大于 0.6 的指标进行独立性分析;独立性分析是指对余下的指标进行 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验,采用 Pearson 或 Spearman 相关分析筛选出独立性较好的指标,以降低指标间的信息重叠程度.采用 SPSS17.0 进行 PCA 和相关分析.

### 1.4.2 评价指标权重的计算

熵最初来源于物理学中的热力学概念,主要用来反映系统的混乱程度.信息论中的熵值理论反映了信息的无序化程度,可用来评定信息量的大小,当某项指标携带的信息越多时,其对决策的作用也

就越大<sup>[25]</sup>。采用熵权法计算评价指标的权重,可以有效避免人为因素的干扰,使评价结果更符合实际。使用熵权法计算权重主要包含 3 个步骤<sup>[26]</sup>。

### (1) 原始数据矩阵的标准化

设  $m$  个评价指标,  $n$  个评价对象得到的原始数据矩阵  $X$  为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对该矩阵标准化得到矩阵  $R$  为:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (2)$$

式中,  $x_{ij}$  为第  $j$  个评价对象在第  $i$  个评价指标上的实际值;  $r_{ij}$  为第  $j$  个评价对象在第  $i$  个评价指标上的标准值,  $r_{ij} \in [0, 1]$ 。

### (2) 定义熵

第  $i$  个评价指标的熵  $H_i$  定义为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (3)$$

式中,  $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$ , 当  $f_{ij} = 0$  时, 令  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ ;  $f_{ij}$  为第  $j$  个评价对象在第  $i$  个评价指标上的标准值占该评价指标标准值总和的比重;  $n$  为评价对象的个数。

### (3) 定义熵权

第  $i$  个评价指标的熵权  $w_i$  定义为:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (4)$$

式中,  $0 \leq w_i \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ ;  $H_i$  为第  $i$  个评价指标的熵;  $m$  为评价指标的个数。

### 1.4.3 评价方法与评价标准

根据构建的北运河河流生态系统健康评价指标体系, 计算河流生态健康综合指数<sup>[27]</sup>:

$$H = \sum_{i=1}^n (W_i \times I_i) \quad (5)$$

式中,  $H$  为河流生态健康综合指数,  $W_i$  为评价指标权重,  $I_i$  为评价指标的标准化值。

应用所有采样点位的河流生态健康综合指数值, 建立北运河河流生态系统健康评价标准。具体方法是通过频数分析, 以 95% 分位数对应的值作为标准, 大于该值表示河流生态系统健康等级为 I 级(健康), 将小于该值至最小值的分布范围四等分,

分值从大到小依次分别代表河流生态系统健康等级为 II 级(亚健康)、III 级(一般)、IV 级(较差)和 V 级(极差), 据此将北运河河流生态系统健康状况划分为 5 个等级。

## 2 结果与讨论

### 2.1 评价指标的筛选

对候选评价指标的监测结果进行初步统计, 如表 1 所示。由于 Cu、Pb、Cd、As、Hg 和挥发酚在所有采样点位中的变化较小(标准差  $SD < 0.01$ ), 对河流生态系统变化的响应不够敏感, 因此认为其判别能力较弱, 剔除这 6 个指标。

对余下 16 个指标进行标准化, 用标准化值进行 PCA 分析, 其 Kaiser-Meyer-Olkin 检验统计(KMO)值为 0.521, Bartlett 球度检验值为 350.361, 相伴概率为 0, 表明基于 25 个采样点位的 16 个指标构成的评价指标体系适合于进行 PCA 分析。按照 70% 的累积方差贡献率提取出 5 个主成分, 如表 2 所示。

选择载荷值大于 0.6 的候选评价指标: 第 1 主成分包括 Cond、BOD<sub>5</sub>、高锰酸盐指数、TN、TP 和 Cl<sup>-</sup>, 主要描述了无机离子、有机物质和营养物质的影响; 第 2 主成分包括 Wtemp、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 Zn, 主要描述了营养物质、重金属和水文因素的影响; 第 3 主成分包括 F<sup>-</sup>、石油类和 QHEI, 主要描述了溶解氧和栖息地环境因素的影响; 第 4 主成分包括浮游植物多样性指数, 主要反映了生物因素的影响; 第 5 主成分包括底栖动物多样性指数, 主要反映了生物因素的影响。由此筛选出 14 个评价指标, 这些指标对北运河河流生态系统健康状况的贡献均较大, 故剔除 pH 和 DO。

对这 14 个候选评价指标进行独立性分析。首先进行 K-S 正态检验, 对符合正态分布的指标进行 Pearson 相关分析, 对不符合正态分布的指标进行 Spearman 相关分析, 结果如表 3 所示。

相关分析结果表明, 浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、Wtemp 和 QHEI 与其他指标间的相关性不显著, 相对独立, 故这 4 个指标予以保留。在水质指标中, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、F<sup>-</sup>、Zn 和石油类与其他指标间的相关性不显著, 相对独立, 故对这 4 个指标予以保留; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与高锰酸盐指数、TN 和 TP 均极显著相关, 因此剔除高锰酸盐指数、TN 和 TP; 由于 BOD<sub>5</sub> 和高锰酸盐指数均为指示有机污染的指标, 而高锰酸

表 1 候选评价指标信息统计<sup>1)</sup>

Table 1 Statistical information for candidate indicators

候选评价指标	最小值	最大值	平均值	标准差	
水生生物指标	浮游植物多样性指数	0.640 0	4.150 0	2.693 2	1.126 5
	底栖动物多样性指数	0.000 0	1.550 0	0.572 8	0.587 4
水文指标	水温/°C	20.300 0	29.600 0	25.516 0	2.046 1
水质指标	pH	7.700 0	8.800 0	8.112 0	0.315 3
	Cond/S·cm <sup>-1</sup>	25.370 0	1 594.000 0	652.761 6	342.994 9
	DO/mg·L <sup>-1</sup>	0.700 0	11.800 0	5.752 0	3.125 8
	BOD <sub>5</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	0.600 0	24.600 0	5.112 8	5.873 2
	高锰酸盐指数/mg·L <sup>-1</sup>	2.300 0	33.600 0	7.960 0	6.815 3
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.100 0	20.400 0	4.756 9	7.181 9
	TN/mg·L <sup>-1</sup>	1.000 0	82.600 0	13.708 0	16.682 1
	TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.030 0	3.900 0	0.866 4	1.156 0
	F <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	0.150 0	0.980 0	0.504 0	0.215 5
	Cl <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	0.250 0	2.280 0	0.504 4	0.409 4
	Cu/mg·L <sup>-1</sup>	0.000 0	0.023 0	0.000 9	<b>0.004 6</b>
	Zn/mg·L <sup>-1</sup>	0.000 0	0.172 0	0.018 2	0.038 1
	Pb/mg·L <sup>-1</sup>	0.000 0	0.000 0	0.000 0	<b>0.000 0</b>
	Cd/mg·L <sup>-1</sup>	0.000 0	0.000 0	0.000 0	<b>0.000 0</b>
	As/mg·L <sup>-1</sup>	0.000 0	0.004 6	0.002 1	<b>0.001 7</b>
	Hg/mg·L <sup>-1</sup>	0.000 0	0.000 0	0.000 0	<b>0.000 0</b>
	石油类/mg·L <sup>-1</sup>	0.000 0	0.060 0	0.019 6	0.023 4
挥发酚/mg·L <sup>-1</sup>	0.000 0	0.005 0	0.000 8	<b>0.001 7</b>	
栖息地指标	QHEI	24.000 0	99.000 0	59.120 0	21.789 0

1) 黑体字表示标准差 SD &lt; 0.01 的候选评价指标

表 2 候选评价指标的主成分分析结果<sup>1)</sup>

Table 2 Principal component analysis results for candidate indicators

候选评价指标	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分	第 5 主成分
浮游植物多样性指数	-0.150	-0.154	0.023	<b>-0.848</b>	-0.143
底栖动物多样性指数	-0.119	-0.026	0.192	0.031	<b>0.832</b>
水温	-0.119	<b>0.776</b>	-0.104	0.302	-0.221
pH	-0.072	-0.211	0.538	0.533	-0.400
Cond	<b>0.853</b>	0.218	-0.130	0.178	0.124
DO	-0.481	-0.326	-0.147	0.533	-0.304
BOD <sub>5</sub>	<b>0.860</b>	0.000	-0.068	0.232	-0.167
高锰酸盐指数	<b>0.945</b>	0.232	0.053	-0.066	-0.046
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.324	<b>0.839</b>	0.216	0.094	0.231
TN	<b>0.910</b>	0.041	-0.135	-0.156	0.001
TP	<b>0.834</b>	0.498	0.116	-0.036	0.085
F <sup>-</sup>	0.361	-0.136	<b>0.740</b>	-0.037	0.185
Cl <sup>-</sup>	<b>0.900</b>	-0.293	0.184	-0.098	-0.117
Zn	0.146	<b>0.823</b>	-0.009	-0.333	0.040
石油类	0.451	-0.143	<b>-0.690</b>	0.307	0.112
QHEI	-0.095	0.225	<b>0.755</b>	0.123	0.376
方差贡献率/%	36.057	16.446	12.854	11.025	6.631
累积方差贡献率/%	36.057	52.503	65.356	76.381	83.012

1) 粗体字表示载荷值大于 0.6 的候选评价指标

盐指数已被剔除,因此保留 BOD<sub>5</sub>;由于 BOD<sub>5</sub> 与 Cond 极显著相关,故剔除 Cond,同理剔除 Cl<sup>-</sup>.

根据上述分析,筛选后的北运河河流生态系统健康评价指标共有 9 个,如图 2 所示.在这些指标

中,浮游植物作为河流生态系统中重要的初级生产者,对水环境变化的反应十分敏感,其多样性直接影响着上层食物链结构及整个生态系统的稳定;底栖动物生命周期较长,对不同类型的污染和干扰响

应敏感，能综合反映长期人为活动对河流生态系统的扰动程度，其多样性是水体健康程度的重要指标；Wtemp 是随时间和空间变化的水文因子，不仅可以直接影响水体中水生生物的生理生化活动，而且可以反映人类活动对水体的影响；BOD<sub>5</sub> 主要反映水体中可以被生物利用的有机物污染程度；NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 主要反映水体中营养物质的浓度大小；F<sup>-</sup> 具有较强的还

原性，易与高氧化态的阳离子结合，其被氧化的过程需消耗溶解氧，因此可以反映水体中的溶解氧含量；Zn 可以表征水体及河床底泥中的重金属含量；石油类可以反映水体中烃类物质的污染程度；QHEI 从底质、堤岸稳定性、河道变化、人类活动强度等方面反映了栖息地环境质量状况，是水生态系统和水陆过渡带完整性程度的综合表征。

表 3 相关分析结果<sup>1)</sup>

Table 3 Results of Spearman and Pearson correlation analysis

	浮植多样性	底栖多样性	水温	Cond	BOD <sub>5</sub>	高锰酸盐指数	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	TP	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Zn	石油类	QHEI
浮植多样性	1.000 <sup>b</sup>													
底栖多样性	0.015 <sup>b</sup>	1.000 <sup>b</sup>												
水温	-0.206 <sup>b</sup>	-0.08 <sup>b</sup>	1.000 <sup>b</sup>											
Cond	-0.266 <sup>b</sup>	-0.051 <sup>b</sup>	0.085 <sup>b</sup>	1.000 <sup>b</sup>										
BOD <sub>5</sub>	-0.328 <sup>b</sup>	-0.245 <sup>b</sup>	-0.008 <sup>b</sup>	<b>0.734<sup>b</sup>**</b>	1.000 <sup>b</sup>									
高锰酸盐指数	-0.111 <sup>b</sup>	-0.105 <sup>b</sup>	0.064 <sup>b</sup>	<b>0.792<sup>b</sup>**</b>	<b>0.784<sup>b</sup>**</b>	1.000 <sup>b</sup>								
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.368 <sup>a</sup>	0.057 <sup>a</sup>	0.356 <sup>a</sup>	0.513 <sup>a</sup> **	0.668 <sup>a</sup> **	<b>0.827<sup>a</sup>**</b>	1.000 <sup>b</sup>							
TN	-0.056 <sup>b</sup>	-0.081 <sup>b</sup>	-0.118 <sup>b</sup>	<b>0.729<sup>b</sup>**</b>	<b>0.710<sup>b</sup>**</b>	<b>0.914<sup>b</sup>**</b>	<b>0.756<sup>a</sup>**</b>	1.000 <sup>b</sup>						
TP	-0.425 <sup>a</sup> *	-0.096 <sup>a</sup>	0.273 <sup>a</sup>	<b>0.740<sup>a</sup>**</b>	<b>0.781<sup>a</sup>**</b>	<b>0.928<sup>a</sup>**</b>	<b>0.844<sup>a</sup>**</b>	<b>0.846<sup>a</sup>**</b>	1.000 <sup>a</sup>					
F <sup>-</sup>	0.067 <sup>b</sup>	0.195 <sup>b</sup>	-0.157 <sup>b</sup>	0.22 <sup>b</sup>	0.176 <sup>b</sup>	0.303 <sup>b</sup>	0.048 <sup>a</sup>	0.132 <sup>b</sup>	0.224 <sup>a</sup>	1.000 <sup>b</sup>				
Cl <sup>-</sup>	0.051 <sup>b</sup>	-0.135 <sup>b</sup>	-0.323 <sup>b</sup>	<b>0.640<sup>b</sup>**</b>	<b>0.716<sup>b</sup>**</b>	<b>0.807<sup>b</sup>**</b>	0.143 <sup>a</sup>	<b>0.799<sup>b</sup>**</b>	0.308 <sup>a</sup>	0.506 <sup>b</sup> **	1.000 <sup>b</sup>			
Zn	-0.206 <sup>a</sup>	0.034 <sup>a</sup>	0.449 <sup>a</sup> *	0.550 <sup>a</sup> **	0.519 <sup>a</sup> **	0.575 <sup>a</sup> **	0.504 <sup>a</sup> *	0.450 <sup>a</sup> *	0.547 <sup>a</sup> **	-0.044 <sup>a</sup>	0.090 <sup>a</sup>	1.000 <sup>a</sup>		
石油类	-0.238 <sup>b</sup>	-0.128 <sup>b</sup>	0.022 <sup>b</sup>	0.558 <sup>b</sup> **	0.432 <sup>b</sup> *	0.294 <sup>b</sup>	0.182 <sup>a</sup>	0.351 <sup>b</sup>	0.285 <sup>a</sup>	-0.176 <sup>b</sup>	0.318 <sup>b</sup>	0.171 <sup>a</sup>	1.000 <sup>b</sup>	
QHEI	-0.232 <sup>b</sup>	0.297 <sup>b</sup>	-0.053 <sup>b</sup>	-0.009 <sup>b</sup>	-0.152 <sup>b</sup>	-0.043 <sup>b</sup>	0.045 <sup>a</sup>	-0.22 <sup>b</sup>	0.077 <sup>a</sup>	0.514 <sup>b</sup> **	-0.475 <sup>b</sup> *	-0.008 <sup>a</sup>	-0.079 <sup>b</sup>	1.000 <sup>b</sup>

1) a 表示 Spearman 相关分析, b 表示 Pearson 相关分析; \* 表示 P < 0.05, \*\* 表示 P < 0.01; 粗体字表示相关性达到极显著水平且相关系数大于 0.5

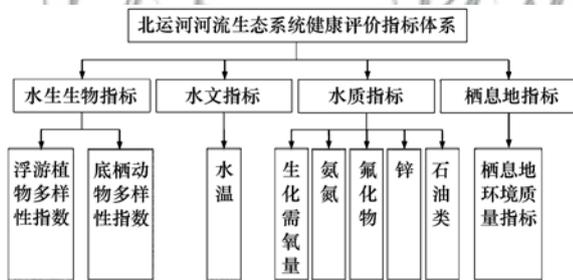


图 2 北运河河流生态系统健康评价指标体系

Fig. 2 Health assessment indices of the stream ecosystem in the North Canal River basin

在淡水生态系统中，水生生物的食物链主要由浮游植物、浮游动物、底栖动物、高等植物、鱼类和微生物组成，而高等植物和微生物对水生态健康的指示作用较弱<sup>[28, 29]</sup>。浮游植物是水生态系统的初级生产者，处于食物链最底层；浮游动物多以浮游植物、细菌、碎屑为食，同时又是鱼类和部分底栖动物的食物；底栖动物以摄食碎屑物为主，对营养物质的分解和循环有重要作用；鱼类处于食物链顶端，对环境变化较敏感<sup>[30~32]</sup>。在本研究中，仅选择了浮游植物和底栖动物作为指示物种。北运

河水系地处北京市中心区域，人口稠密，城市化水平高，是北京市境内受人类活动干扰最强烈的水域之一。流域内鱼类存在滥捕、滥放等人为因素的影响，土著鱼类的多样性急剧下降，不适合作为河流生态系统健康状况的指示物种<sup>[33, 34]</sup>。有研究表明，底栖动物多样性指数与浮游动物多样性指数之间有较强的相关性，不适宜同时作为河流生态系统健康评价指标<sup>[27]</sup>。与浮游动物相比，底栖动物是河流生态系统中最重要、最稳定的定居动物类群之一，是河流水质监测最常用的指标，因此剔除浮游动物相关指标。

水温是水环境变化的重要驱动因子，水温的高低会直接或间接影响水体理化性质和水生生物结构<sup>[35]</sup>。有研究表明，水温对水体中 pH、DO、营养盐等理化因子的分布会产生重大影响，从而引起不同的水环境响应，其中，水温与 DO 含量为负相关关系且相关系数极高<sup>[36, 37]</sup>。与水体理化性质相比，水生生物结构主要受到水温升高的影响<sup>[38]</sup>。随着水温的升高，浮游植物蓝藻和绿藻的生长期延长，代谢速率加快，生物活性增强，生物量占据明显优

势,同时,河道底泥中的有机物质加速分解,从而产生加重水体富营养化的趋势<sup>[39]</sup>;底栖动物长期栖居在水体底质中,生活场所相对固定,迁移能力较弱,因此难以回避局部水温升高的影响,同时,底栖动物敏感种如蜉蝣目(Ephemeroptera)会因无法适应新栖境而在升温区逐渐消失,喜温种如摇蚊科(Chironomidae)则数量增多,从而导致底栖动物区系组成向喜温和耐低溶解氧的生物相变化<sup>[40]</sup>.随着社会经济的快速发展,北京市区,尤其是北运河水系覆盖区域,对电力的需求日益增大.由于大部分电厂的发电效率有限,多余热量须通过冷却水循环系统带出,从而使得接纳水域水温升高,改变了水体的理化属性,破坏了原有的生态平衡<sup>[38]</sup>.因此,水温是北运河河流生态系统健康评价过程中的重要指标之一.

2.2 评价指标的权重

根据熵的定义与计算方法,确定评价指标体系的熵  $H$  及熵权  $w$ , 计算结果如下:

$$H = [0.943\ 1\ 0.748\ 3\ 0.956\ 0\ 0.979\ 3\ 0.954\ 4\ 0.961\ 5\ 0.984\ 4\ 0.923\ 9\ 0.933\ 8]$$

$$w = [0.092\ 5\ 0.409\ 1\ 0.071\ 5\ 0.033\ 6\ 0.074\ 0\ 0.062\ 6\ 0.025\ 4\ 0.123\ 7\ 0.107\ 6]$$

表5 北运河河流生态系统健康评价标准

Table 5 Health assessment criteria for the stream ecosystem in the North Canal River basin

评价等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
SEHCI	>0.868 8	0.704 9 ~ 0.868 8	0.541 0 ~ 0.704 9	0.377 1 ~ 0.541 0	<0.377 1

北运河河流生态系统健康评价结果如图 3(a) 所示. 在设立的 25 个采样点位中, 2 个为 I 级, 占点位总数的比例为 8%; 1 个为 II 级, 占 4%; 9 个为 III 级, 占 36%; 8 个为 IV 级, 占 32%; 5 个为 V 级, 占 20%. 从全流域来看, 北运河河流生态系统的健康状况总体较差, 其中, 水系中部和东南部地区的健康等级普遍较低, 西北部地区的健康等级相对较高. 在 25 个采样点中, 河流生态健康综合指数最高的为德胜口(B3), 位于德胜口沟; 最低的为清河闸(B21), 位于清河干流的上段.

在 ArcGIS 10.2 的地统计分析模块中, 采用反距离加权法(inverse distance weighted, IDW)对北运河河流生态健康综合指数进行插值运算, 得到该指数在北运河水系的分布状况, 如图 3(b) 所示. 从整个流域来看, 北运河河流生态系统健康状况具有较强的空间异质性, 健康等级较高的地区主要分布在水系上游, 而中下游地区的健康等级则较低. 水系

不同类型的不同指标权重如表 4 所示. 由此可知, 4 类评价指标的权重大小排序为: 水生生物指标 > 水质指标 > 栖息地指标 > 水文指标; 水生生物指标的权重大小排序为: 底栖动物多样性指数 > 浮游植物多样性指数; 水质指标的权重大小排序为: 石油类 > 氨氮 > 氟化物 > 生化需氧量 > 锌.

2.3 河流生态系统健康评价

根据北运河河流生态系统健康评价指标体系和对应权重, 计算河流生态健康综合指数, 其中最小值为 0.213 0, 最大值为 0.912 3, 95% 分位数为 0.868 8, 故健康评价标准如表 5 所示.

表4 北运河河流生态系统健康评价指标权重

Table 4 Weight of the health assessment indices for the stream ecosystem in the North Canal River basin

评价指标类型	类型权重	评价指标	指标权重
水生生物指标	0.501 5	浮游植物多样性指数	0.092 5
		底栖动物多样性指数	0.409 1
水文指标	0.071 5	水温	0.071 5
		BOD <sub>5</sub>	0.033 6
水质指标	0.319 4	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.074 0
		F <sup>-</sup>	0.062 6
		Zn	0.025 4
		石油类	0.123 7
栖息地指标	0.107 6	QHEI	0.107 6

上游地区的十三陵水库(B1)、锥石口(B2)和德胜口(B3)位于远离北京市中心的西北部昌平区, 受人类活动影响较弱, 因此其河流生态系统健康处于相对原始的未开发或半开发状态, 从而形成了健康等级较高的集中区.

北运河水系的中下游地区健康状况具有较强的空间异质性. 南沙河、清河中游、通惠河干流为该地区健康状况普遍较差的河段, 这 3 个河段均为城市排水河道. 南沙河是温榆河的一级支流, 由于多年排放污水及河床底泥释放污染物, 导致河道生境遭到破坏; 此外, 南沙河上建有上庄水库, 水库常年蓄水导致河道淤积严重, 加剧了水体污染<sup>[41]</sup>. 通惠河作为北京市雨污排泄枢纽, 承接了南护城河、北护城河和前三门暗沟的来水, 大量生活污水和生产废水未经处理就直接排入河道, 导致水质恶化<sup>[42]</sup>; 此外, 通惠河河底和边坡的混凝土板护砌结构加剧了生态系统的退化<sup>[43]</sup>. 中下游地区健康状

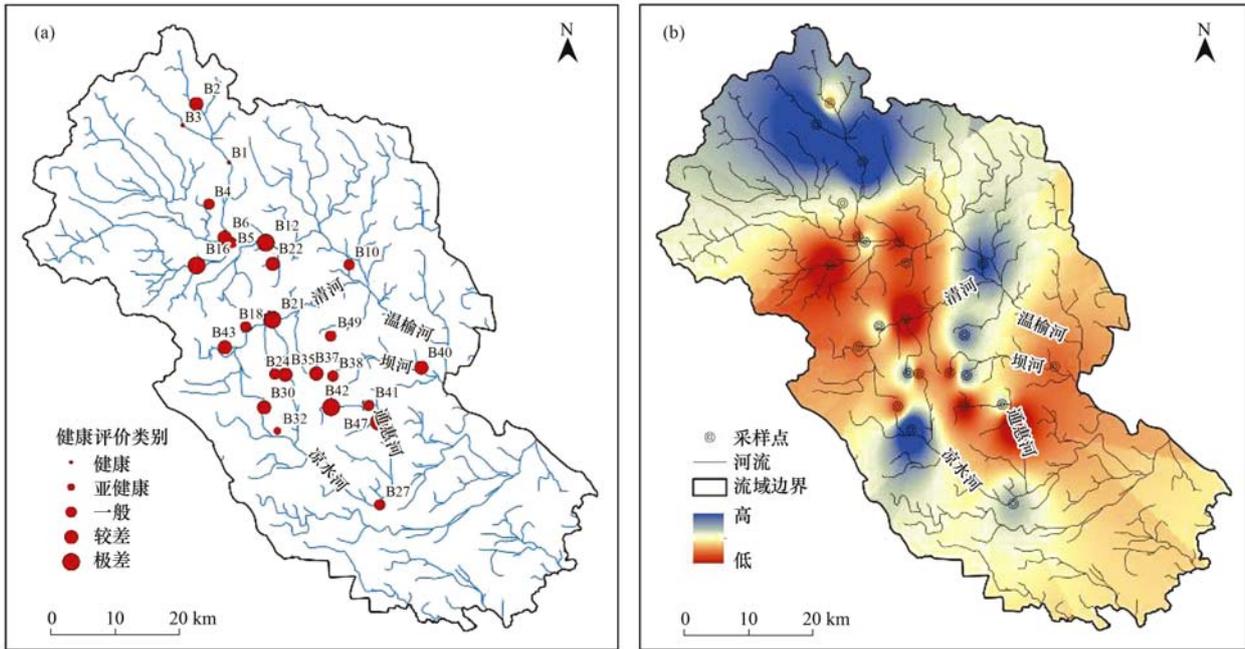


图 3 北运河河流生态系统健康评价结果

Fig. 3 Health assessment results for the stream ecosystem in the North Canal River basin

况相对较好的河段包括凉水河上游和温榆河支流，这可能与近年来北京市政府着手治理有关。由凉水河管理处主持的凉水河水环境综合治理工程，通过建设临时应急处理设施、实施截留、封堵违法排污口等手段，开展治污清淤、河道改造和生态修复等工程<sup>[44, 45]</sup>，严格控制污水入凉水河，使凉水河水质得到了明显的改善。这些河段交错镶嵌于整体健康状况较差的北运河水系中下游地区，从而形成了该地区相对复杂的河流生态健康现状。

### 2.4 河流生态系统单项指标健康评价

为明确北运河水系不同河段的主导影响因素，对河流生态系统单项指标进行插值运算，得到单项指标健康评价结果在北运河水系的分布，如图 4 所示。

综合 4 类单项评价指标的健康评价结果可以发现，北运河水系上游地区的健康状况均普遍较好。下游地区的水生生物健康状况较好，而水文、水质和栖息地健康状况均较差，这可能与流域内高程西北高、东南低有关<sup>[46]</sup>。流域内的污水沿城区排水河道自西北向东南流动，最终汇集于下游地区，从而导致该地区水质较差。水系内中游地区的健康状况相对复杂，水生生物和水质健康状况参差不齐，水文和栖息地健康状况普遍较差，这可能与中游地区分布着北京市中心城区、朝阳区和海淀区有关。该地区人口稠密，产业集中，城市化水平较高，是北京境内发展程度最高、发展速度最快的地区，

水环境质量受社会经济发展影响较大，天然水陆生境遭到破坏；同时，随着人水矛盾的日益突出，人们开始意识到河流生态系统重要性，采取了一系列措施恢复天然水陆生境<sup>[12]</sup>。因此该地区呈现出参差不齐的河流生态系统健康状况。

根据熵权法的权重计算结果，4 类评价指标的权重大小排序为：水生生物指标 > 水质指标 > 栖息地指标 > 水文指标。在熵权法的定义中，熵权并不表示某指标的重要性，而是代表各指标在竞争意义上的相对激烈程度，也即各指标提供有效信息量的多寡程度<sup>[26]</sup>。因此，4 类评价指标的权重大小排序情况说明水生生物指标为北运河河流生态系统健康评价提供了最多信息，水生生物指标对最终评价结果的贡献最大，而图 3(b) 中的河流生态系统健康评价结果分布与图 4 中的水生生物指标健康评价结果分布最为接近也验证了这一结论。水生生物作为河流生态系统的重要组成部分，具有整合不同时间尺度上各种物理、化学和生物影响的能力，可以反映多种生态胁迫对水环境造成的累积效应<sup>[30, 47]</sup>，因而水生生物可以为河流生态系统提供多时空尺度上的重要信息，是河流生态系统健康评价的必选指标类型。

近年来，国内众多学者针对北运河河流生态健康开展了一系列研究。李文君等<sup>[48]</sup>综合考虑水量、水质、生物状况、水体连通性以及防洪标准等因素，构建了包含 5 类 9 个指标的河流生态健康评价

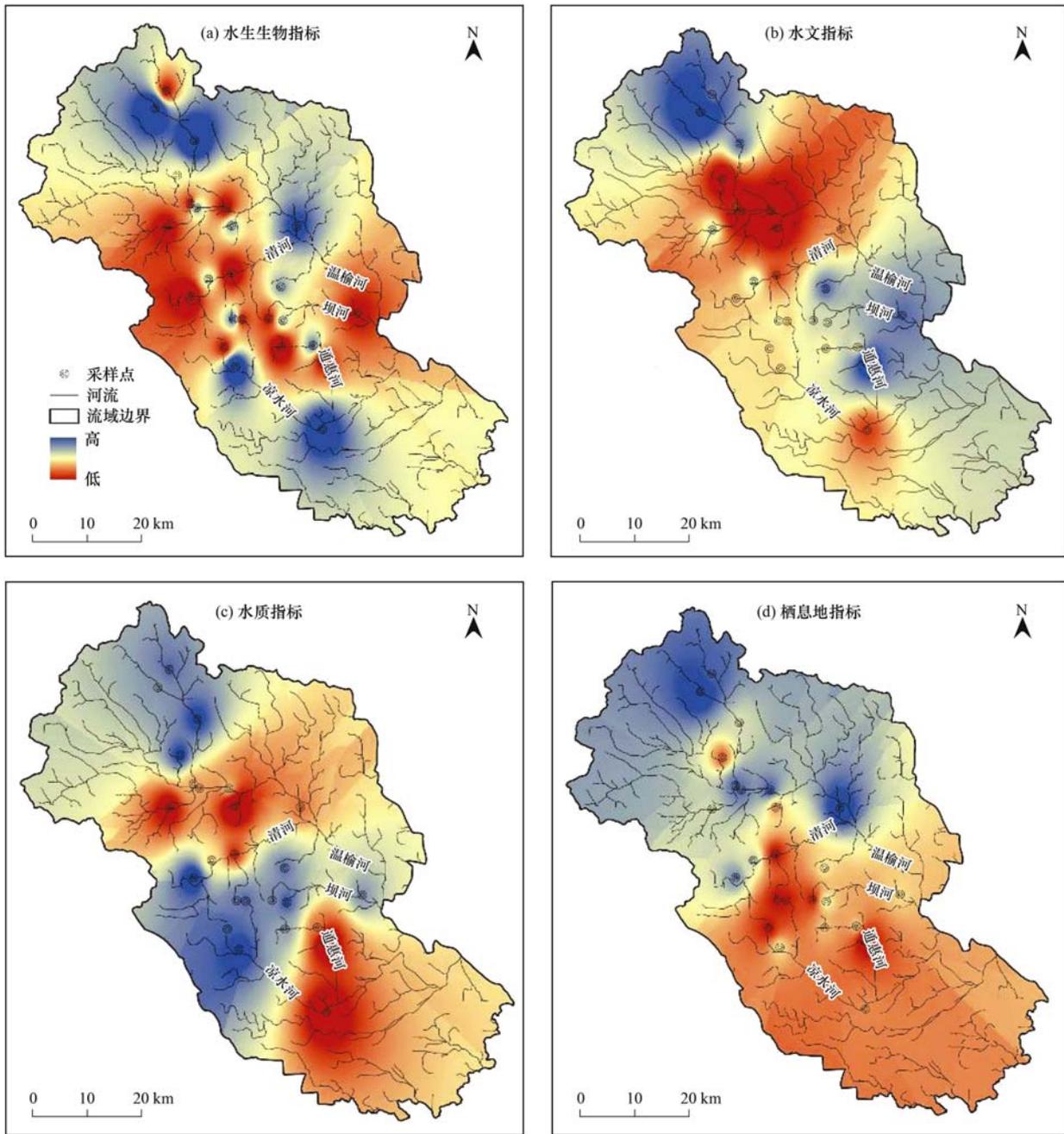


图 4 北运河河流生态系统单项指标健康评价结果

Fig. 4 Health assessment results for the stream ecosystem on four aspects in the North Canal River basin

指标体系，并对北运河河流生态健康状况进行了评价，结果表明北运河生态处于亚健康状态。宋刚福等<sup>[49]</sup>基于水文、水环境、形态结构、河岸带以及水生生物等因素，构建了包含 5 类 15 个指标的河流生态健康评价指标体系，并对北运河上、中、下游各区段进行生态健康综合评价，结果表明北运河生态系统健康状况处于亚健康状态。这些研究均表现为水质和水生生物类型指标的权重较大，且健康评价结果与本研究基本一致。与其他研究相比，本研

究构建的北运河河流生态系统健康评价指标体系具有简洁明了、计算方便等特点，可以通过评价结果直接识别出影响北运河河流生态系统健康状况的具体因子。随着人类活动干扰的强度增大和来源多样化，仅从水生生物、水文、水质和栖息地这几个方面开展城市河流生态系统健康评价已无法满足要求，考虑多方面因素、运用多种方法、整合多种尺度，将会是未来城市河流生态健康研究的发展趋势。

### 3 结论

(1) 北运河河流生态系统健康评价指标体系包含浮游植物多样性指数、底栖动物多样性指数、水温、生化需氧量、氨氮、氟化物、锌、石油类和栖息地环境质量评价指标 4 类 9 项指标; 4 类评价指标的权重大小排序为水生生物 > 水质 > 栖息地 > 水文。

(2) 在北运河水系的 25 个样点中, 有 2 个为 I 级, 1 个为 II 级, 9 个为 III 级, 8 个为 IV 级, 5 个为 V 级; 北运河河流生态系统的健康状况总体较差, 其中, 上游地区普遍较好, 中下游地区相对较差, 且呈现出较强的空间异质性。

(3) 北运河水系中下游地区的南沙河、清河中游、通惠河干流的健康状况普遍较差, 相对较好的凉水河上游地区和温榆河支流交错镶嵌其中, 形成了北运河水系复杂的河流生态系统现状; 4 类单项指标健康评价结果显示, 水生生物指标是河流生态系统健康评价的必选指标类型。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 闵文武. 辽河流域着生藻类群落结构及水生态健康评价 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2015.  
Min W W. The periphytic algae community structure and stream ecosystem health assessment in Liao River Basin, China [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2015.
- [ 2 ] 朱卫红, 曹光兰, 李莹, 等. 图们江流域河流生态系统健康评价 [J]. 生态学报, 2014, **34**(14): 3969-3977.  
Zhu W H, Cao G L, Li Y, *et al.* Research on the health assessment of river ecosystem in the area of Tumen River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(14): 3969-3977.
- [ 3 ] 刘麟菲, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 应用硅藻指数评价渭河流域水生态健康状况 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, **52**(3): 317-321.  
Liu L F, Xu Z X, Yin X W, *et al.* Assessing water quality with diatom indices in the Wei River basin [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2016, **52**(3): 317-321.
- [ 4 ] Kallis G, Butler D. The EU water framework directive; measures and implications [J]. *Water Policy*, 2001, **3**(2): 125-142.
- [ 5 ] Ladson A R, White L J, Doolan J A, *et al.* Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia [J]. *Freshwater Biology*, 1999, **41**(2): 453-468.
- [ 6 ] 刘焱序, 彭建, 汪安, 等. 生态系统健康研究进展 [J]. 生态学报, 2015, **35**(18): 5920-5930.  
Liu Y X, Peng J, Wang A, *et al.* New research progress and trends in ecosystem health [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 5920-5930.
- [ 7 ] 郝利霞, 孙然好, 陈利顶. 海河流域河流生态系统健康评价 [J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3692-3701.  
Hao L X, Sun R H, Chen L D. Health assessment of river ecosystem in Haihe River Basin, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3692-3701.
- [ 8 ] 唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价 [J]. 应用生态学报, 2002, **13**(9): 1191-1194.  
Tang T, Cai Q H, Liu J K. River ecosystem health and its assessment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(9): 1191-1194.
- [ 9 ] 于志慧, 许有鹏, 张媛, 等. 基于熵权物元模型的城市化地区河流健康评价分析——以湖州市区不同城市化水平下的河流为例 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(12): 3188-3193.  
Yu Z H, Xu Y P, Zhang Y, *et al.* Assessment of river health in urbanized area based on entropy weight and matter element model: a case study in Huzhou city at different stages of urbanization [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3188-3193.
- [ 10 ] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 等. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用 [J]. 生态学报, 2014, **34**(4): 993-1001.  
Deng X J, Xu Y P, Zhai L X, *et al.* Establishment and application of the index system for urban river health assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(4): 993-1001.
- [ 11 ] 吴易雯, 李莹杰, 张列宇, 等. 基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价 [J]. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1091-1102.  
Wu Y W, Li Y J, Zhang L Y, *et al.* Assessment of lakes ecosystem health based on objective and subjective weighting combined with fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(5): 1091-1102.
- [ 12 ] 李学军, 鲍战猛, 高彩凤, 等. 北运河浮游动物调查及水质评价 [J]. 生态学杂志, 2014, **33**(6): 1559-1564.  
Li X J, Bao Z M, Gao C F, *et al.* Zooplankton investigation and water quality evaluation in Beiyun River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(6): 1559-1564.
- [ 13 ] 杨柳, 李泳慧, 王俊才, 等. 基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价 [J]. 生态学报, 2012, **32**(11): 3313-3322.  
Yang L, Li Y H, Wang J C, *et al.* The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(11): 3313-3322.
- [ 14 ] 郭婧, 荆红卫, 李金香, 等. 北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析 [J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1511-1518.  
Guo J, Jing H W, Li J X, *et al.* Surface water quality of Beiyun Rivers basin and the analysis of acting factors for the recent ten years [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1511-1518.
- [ 15 ] 许晓伟, 刘德文, 车洪军, 等. 北运河水环境调查与评价 [J]. 海河水利, 2009, (2): 14-22.  
Xu X W, Liu D W, Che H J, *et al.* Investigation and evaluation of water environment in the Beiyun River [J]. *Haihe Water Resources*, 2009, (2): 14-22.
- [ 16 ] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [ 17 ] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [ 18 ] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [ 19 ] 赵文. 水生生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [ 20 ] Thorp J H, Covich A P. Ecology and classification of North American freshwater invertebrates (2nd ed.) [M]. New York: Academic Press, 2001.
- [ 21 ] 杨潼. 中国动物志—环节动物门—蛭纲 [M]. 北京: 科学出

- 版社, 1996.
- [22] 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.
- [23] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 928-936.  
Zheng B H, Zhang Y, Li Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(6): 928-936.
- [24] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish [M]. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [25] 李帅, 魏虹, 倪细炉, 等. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(9): 2700-2708.  
Li S, Wei H, Ni X L, *et al.* Evaluation of urban human settlement quality in Ningxia based on AHP and the entropy method [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(9): 2700-2708.
- [26] 巴雅尔, 郭家盛, 卢少勇, 等. 博斯腾湖大湖湖区近 20 年生态健康状况评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(3): 503-507.  
Ba Y E, Guo J S, Lu S Y, *et al.* Assessing ecological health of open water region from Bostenhu Lake during last 20 years [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(3): 503-507.
- [27] 左其亭, 陈豪, 张永勇. 淮河中上游水生生态健康影响因子及其健康评价[J]. 水利学报, 2015, **46**(9): 1019-1027.  
Zuo Q T, Chen H, Zhang Y Y. Impact factors and health assessment of aquatic ecosystem in upper and middle Huai River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(9): 1019-1027.
- [28] 苏海磊, 吴丰昌, 李会仙, 等. 我国水生生物水质基准推荐的物种选择[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(5): 506-511.  
Su H L, Wu F C, Li H X, *et al.* Species selection for deriving water quality criteria for protection of aquatic organisms in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(5): 506-511.
- [29] 禹娜, 刘一, 姜雪芹, 等. 上海城区小型河道生物组成特征及食物链结构分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2010, (6): 91-100, 124.  
Yu N, Liu Y, Jiang X Q, *et al.* Analysis on biological composition and food-chain structure in the urban rivers of Shanghai [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2010, (6): 91-100, 124.
- [30] 徐宗学, 武玮, 殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. 水利水电科技进展, 2016, **36**(1): 23-30.  
Xu Z X, Wu W, Yin X W. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, **36**(1): 23-30.
- [31] 陈纯, 李思嘉, 胡初, 等. 四种浮游植物生物量计算方法的比较分析[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 927-935.  
Chen C, Li S J, Hu R, *et al.* Comparative analysis of four methods for calculating biomass of phytoplankton community [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 927-935.
- [32] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 896-901.  
Qiu X C, Zhao H X, Sun X X. Relationships between zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake, Ningxia of Northwest China: a multivariate analysis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(4): 896-901.
- [33] 吕振霄. 非法放生与水环境之间的相互影响[J]. 环境工程, 2016, **34**(S1): 270-271.
- [34] 张春光, 赵亚辉, 邢迎春, 等. 北京及其邻近地区野生鱼类物种多样性及其资源保育[J]. 生物多样性, 2011, **19**(5): 597-604.  
Zhang C G, Zhao Y H, Xing Y C, *et al.* Fish species diversity and conservation in Beijing and adjacent areas [J]. Biodiversity Science, 2011, **19**(5): 597-604.
- [35] 袁琳娜, 杨常亮, 李晓铭, 等. 高原深水湖泊水温日成层对溶解氧、酸碱度、总磷浓度和藻类密度的影响: 以云南阳宗海为例[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 161-168.  
Yuan L N, Yang C L, Li X M, *et al.* Effect of daily thermal stratification on dissolved oxygen, pH, total phosphorus concentration, phytoplankton and algae density of a deep plateau lake: a case study of Lake Yangzonghai, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(1): 161-168.
- [36] 王琳杰, 余辉, 牛勇, 等. 抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1384-1392.  
Wang L J, Yu H, Niu Y, *et al.* Distribution characteristics of water temperature and water quality of Fuxian Lake during thermal stratification period in summer [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1384-1392.
- [37] Yu H, Tsuno H, Hidaka T, *et al.* Chemical and thermal stratification in lakes [J]. Limnology, 2010, **11**(3): 251-257.
- [38] 肖婷婷, 荣焱, 陈德敏, 等. 南宁电厂温排水对郁江干流水温及水生态的影响程度分析[J]. 水电能源科学, 2015, **33**(6): 31-34.  
Xiao T T, Rong Y, Chen D M, *et al.* Influence analysis of warm water discharge for Nanning power plant on Yujiang water temperature and water ecosystem [J]. Water Resources and Power, 2015, **33**(6): 31-34.
- [39] 尹立明. 水温变化特性对衡水湖湿地生态环境影响的分析[J]. 海河水利, 2014, (6): 7-11.  
Yin L M. Analysis of water temperature change characteristics of Hengshui lake wetland ecological environment [J]. Haihe Water Resources, 2014, (6): 7-11.
- [40] 吴健, 黄沈发, 杨泽生. 热排放对水生生态系统的影响及其缓解对策[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(S1): 127-129.  
Wu J, Huang S F, Yang Z S. Effects of thermal discharge on aquatic ecosystems and the mitigation countermeasures [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **29**(S1): 127-129.
- [41] 朱光旭, 郭庆军, 陈同斌, 等. 北京市南沙河沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2148-2153.  
Zhu G X, Guo Q J, Chen T B, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in the sediments of Nansha River in Beijing [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(8): 2148-2153.
- [42] 张亭. 通惠河水环境综合治理工程技术探讨[J]. 中国水利, 2016, (22): 33-34, 36.  
Zhang T. Technologies of water environment restoration for

- Tonghui River[J]. *China Water Resources*, 2016, (22): 33-34, 36.
- [43] 白文荣. 通惠河下段水环境问题分析[J]. *北京水务*, 2010, (1): 41-42.
- Bai W R. Water environment problems in the lower section of the Tonghui river[J]. *Beijing Water*, 2010, (1): 41-42.
- [44] 刘杰. 凉水河河道治理工程的科学管理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- Liu J. Research on scientific management of the regulation project of Liang-Shui River[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [45] 薛拓. 关于凉水河生态水环境建设的思考[J]. *北京水务*, 2011, (6): 10-12.
- [46] 童保铭. 北运河水系河流水质时空变化及驱动力研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [47] 周笑白, 张宁红, 张咏, 等. 太湖水质与水生生物健康的关联性初探[J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 271-278.
- Zhou X B, Zhang N H, Zhang Y, *et al.* Preliminary study on the relationship between the water quality and the aquatic biological health status of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 271-278.
- [48] 李文君, 邱林, 陈晓楠, 等. 基于集对分析与可变模糊集的河流生态健康评价模型[J]. *水利学报*, 2011, 42(7): 775-782.
- Li W J, Qiu L, Chen X N, *et al.* Assessment model for river ecology health based on set pair analysis and variable fuzzy set [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(7): 775-782.
- [49] 宋刚福, 沈冰. “拉开档次”法的改进及其在河流生态健康评价中的应用[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1891-1896.
- Song G F, Shen B. Improvement of “scatter degree” method and its application in evaluating river ecosystem health[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1891-1896.



## CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing .....	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM <sub>2.5</sub> Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan .....	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Panjin .....	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City .....	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning .....	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin .....	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China .....	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region .....	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China .....	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China .....	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province .....	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China .....	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m .....	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes .....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China .....	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research .....	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain .....	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin .....	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir .....	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area .....	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir .....	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment .....	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios .....	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain .....	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China .....	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling .....	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) .....	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly( <i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network .....	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater .....	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization .....	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies .....	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion .....	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere .....	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria .....	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate .....	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession .....	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain .....	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil .....	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via <sup>13</sup> C Pulse-labeling .....	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China .....	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast .....	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River .....	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation .....	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China .....	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area .....	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils .....	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil .....	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province .....	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi .....	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province .....	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires .....	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO <sub>2</sub> Emissions in Chongqing; An Empirical Analysis at the County Level .....	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles .....	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments .....	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)