

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期

Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM_{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM_{2.5} 三维结构变化特征 牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O₃ 和 SOA 形成潜势分析 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 通量支干流对比及影响机制初探 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb²⁺ 的吸附行为 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 闫文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价

胡小红¹, 左德鹏^{1*}, 刘波², 黄振芳², 徐宗学¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 北京市水文总站, 北京 100081)

摘要: 底栖动物可反映多种生态威胁对水环境的累积效应, 与河流水生态系统健康状况密切相关。本研究以北京市典型流域北运河流域为例, 基于2015年夏季野外采样调查34个站点水生态数据, 对底栖动物群落特征进行分析, 采用典型对应分析筛选得到水质驱动因子, 利用临界点指示类群分析方法探究关键影响因子的指示物种及其阈值, 并基于底栖动物完整性指数和综合指数法对水生态系统健康状况进行评价。结果表明, 底栖动物群落以耐污的水生昆虫和软体动物为主, 多样性水平较低, 位于0~1.01之间; 氟化物、生化需氧量、氨氮和总磷为底栖动物群落的关键水质影响因子; 氨氮有4种正响应指示物种, 其阈值范围为1.09~6.94 mg·L⁻¹, 总磷有3种正响应指示物种, 其阈值范围为0.48~1.27 mg·L⁻¹; 健康评价结果表明全流域水生态健康评价结果总体较差, 中上游健康状况相对较好, 健康状况最好地区主要位于昌平区山区, 健康状况最差地区主要位于朝阳区及中心城区。本研究结果可为河流生态修复和污染物控制提供依据, 同时也为其他城市水生态文明建设提供参考。

关键词: 底栖动物; 临界指示物种分析法(TITAN); 阈值; 城市河流; 水生态健康评价

中图分类号: X52; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0247-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104158

Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroinvertebrates Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing

HU Xiao-hong¹, ZUO De-peng^{1*}, LIU Bo², HUANG Zhen-fang², XU Zong-xue¹

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Hydrological Station, Beijing 100081, China)

Abstract: Macroinvertebrates can reflect the cumulative effect of various ecological threats on the water environment and are closely related to the health of river ecosystems. In this study, taking the North Canal River basin, a typical basin in Beijing, as an example, ecological data from 34 stations were investigated in the summer of 2015. Characteristics of the macroinvertebrates communities were analyzed, and driving environmental factors were identified using typical correspondence analysis. Thresholds and response species of those driving environmental factors were conducted using the thresholds indicator taxa analysis (TITAN). In this study, the health status of the river ecosystem was evaluated by the multi-metrics method and benthic index of biotic integrity (B-IBI). The benthic community was dominated by pollution-tolerant aquatic insects and mollusks, with a low-level Shannon-wiener diversity index between 0-1.01; fluoride, biochemical oxygen demand, ammonia-nitrogen, and total phosphorus were driving environmental factors influencing the community structure of macroinvertebrates. Indicator species of ammonia-nitrogen were identified by the TITAN in the North Canal River basin with a threshold range of 1.09-6.94 mg·L⁻¹; three indicator species of total phosphorus were identified with a threshold range of 0.48-1.27 mg·L⁻¹, which were all positive response species. According to the health assessment, the river ecosystem in the North Canal River basin was generally unhealthy, and the upstream ecosystem was better than that downstream; the health conditions in the mountainous areas of Changping district were the best, whereas those in Chaoyang and central city districts were the worst. This study can provide a basis for ecological restoration and pollution control of rivers and also provide a reference for the water ecological civilization construction in other cities.

Key words: macroinvertebrates; thresholds indicator taxa analysis (TITAN); threshold; urban river; river ecological health assessment

快速城市化进程导致大量城市河流出现水体污染、富营养化、生物多样性锐减、水源枯竭和河道断流等问题, 城市河流水生态系统受到严重威胁。城市河流生态系统健康问题已成为限制我国城市健康可持续发展的关键问题, 河流生态系统健康是当前我国水环境管理的主要目标。底栖动物群落在水生态系统中起十分重要作用, 是水生态系统重要组成部分, 具有种类多, 生命周期长, 迁移能力弱, 便于采集的特点, 且不同种类对水质敏感性差异大, 是河流生态系统结构和功能健康的指示者。由于水环境污

染物输入会改变底栖动物群落组成和结构, 进而影响到河流水生态系统健康, 因此, 明确影响底栖动物群落结构和功能的水环境因子, 以及底栖动物所能承受的胁迫范围十分必要。准确评价影响底栖动物群落变化时环境因子的临界点是底栖动物与环境因

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-06-19

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8202030); 国家重点研发计划项目(2017YFC1502703)

作者简介: 胡小红(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水文过程模拟, E-mail: 201921470009@mail.bnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dpzuo@bnu.edu.cn

量标准 (GB 3838-2002) 以及水和废水监测分析方法。

1.2.2 水生生物样品采集

对于底栖动物,在所选定点位 100 m 范围之内,使用彼得逊采泥器随机采集样本。将所采集之物经过 60 目的网筛转入 200 mL 塑料瓶中,并加入 90% 酒精保存。在现场采用人工挑拣方法,将底栖动物样品转入 200 mL 广口塑料瓶中,同时加入 95% 酒精溶液保存待检。转入实验室后,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 数据分析方法

1.3.1 冗余分析

冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 是一种回归分析结合主成分分析的排序方法,是研究解释变量矩阵与响应变量矩阵关系的多元统计方法,广泛用于生态学和环科学多元数据分析中,以往研究大多未考虑解释变量共线性的作用,得到的解释率实际是条件效应解释率, Lai 等^[22]的研究基于层次分割理论得到 RDA 分析中每个解释变量的解释率,本研究采用该理论得到水质因子对底栖动物的解释率。

1.3.2 临界指示物种法

临界指示物种法 (TITAN)^[23] 结合了物种分析法和非参数突变法,通过确定物种变化点及其对环境因子响应方向确定物种生态阈值。在进行数据分析前,排除出现频次小于 5 的物种,通过 TITAN 法找出每个物种最佳变化点,得到最大指示值得分 (IndVal),根据物种在变化点两侧相对丰度和频率将物种分为正响应物种和负响应物种,再对样本进行 1 000 次自举重抽样,得到各物种变化点不确定性、纯度和可靠度,以不确定性 (uncertainty < 0.05)、纯度 (purity \geq 0.95) 和可靠度 (reliability \geq 0.95) 为依据,验证阈值和对应指示物种可靠性。

1.3.3 B-IBI 指数法

建立 B-IBI 指数及评价标准的首要条件是确定参考点和干扰点,国内外研究多以定性标准选用未受人类干扰或干扰较小监测点作为参照点^[7,24,25]。而城市水体受人类活动影响较大,只能选择相对影响程度小的监测点作为参照点。构建 B-IBI 的生物指标必须具有敏感性、可比性、准确性和实用性^[8],选用反映群落丰富度、个体相对丰度和生物耐污能力 3 个类型 22 个指标构建候选指标体系,见表 1。

表 1 候选指标及对干扰反应方向

Table 1 Candidate metrics and their expected direction of response to disturbance

序号	指标类型	生物指数	对干扰反应方向
M1	反映群落丰富度	总分类单元数	减小
M2		EPT 分类单元数	减小
M3		水生昆虫分类单元数	减小
M4		软体动物分类单元数	减小
M5		摇蚊分类单元数	减小
M6		多样性指数	减小
M7		均匀度指数	减小
M8	反映种类个体数量比例	优势分类单元个体 (相对丰度)	增大
M9		前 3 位优势分类单元	增大
M10		毛翅目	减小
M11		蜉蝣目	减小
M12		襀翅目	减小
M13		颤蚓	增大
M14		摇蚊	增大
M15		双翅目	增大
M16		寡毛类	增大
M17		甲壳动物 + 软体动物	减小
M18		无足类群	增大
M19	反映生物耐污能力	敏感类群分类单元数	减小
M20		耐污类群分类单元数	增大
M21		敏感类群	减小
M22		BI 指数	增大

在剔除分布范围很窄的候选指标后,根据 Barbour^[25]提出的方法对比候选指标在参照点与受损点 25%~75% 分位数范围 (IQ) 重叠情况,并赋予不同数值。各自中位数都在对方箱体之内, IQ = 0;

箱体部分重叠,仅一个中位数值在对方箱体范围之内, IQ = 1; 箱体部分重叠,但各自中位数值都在对方箱体范围之外, IQ = 2; 若箱体没有重叠, IQ = 3。保留 IQ \geq 2 的候选指标进行下一步分析。对经敏感

性分析筛选的候选指标进行 Spearman 相关性分析,以检验候选指标的冗余程度. 以 $P < 0.05$ 为显著水平,当 $|R| > 0.8$ 时,则代表两个候选指标间生物信息重叠度高,需要删除其中一个候选指标. 经过相关性检验之后,最终获得构建 B-IBI 评价体系的核心指标.

对入选生物指标进行计分,需统一各指标量纲,常用方法有 3 分法、4 分法和比值法等,相关研究表明比值法更加准确,故本研究采用比值法. 对外界干扰正响应的指标,取其 5% 分位值为最佳期望值,计算公式见式(1);对外界干扰负响应的指标,取其 95% 分位值为最佳期望值,计算公式见式(2),分值范围为 0~1,若大于 1,记为 1. 计算出各点的 B-IBI,计算公式为式(3).

$$B_i = \frac{\text{最大值} - \text{观测值}}{\text{最大值} - 5\% \text{分位值}} \quad (1)$$

$$B_i = \text{观测值} / 95\% \text{分位值} \quad (2)$$

$$\text{B-IBI} = \sum_{i=1}^n B_i \quad (3)$$

最后以参照点 B-IBI 指数值 25% 分位值为其健康阈值, B-IBI 值大于该阈值点位为健康等级;而对 B-IBI 小于该阈值点位进行 3 等分,即:亚健康、不健康和病态这 3 个等级.

1.3.4 综合指数法

本研究采用基于底栖动物的生物快速评价综合指数对研究区城市水体健康进行评价,并与 B-IBI 评

价结果进行对比分析. 采用表 1 中的指标,经过分布范围检验,相关性检验后,确定生物评价指数,对其进行标准化评分计算^[16],再计算其综合评价得分:

$$\text{综合评价指数得分} = \sum_{i=1}^n P_i / n \quad (4)$$

式中, P_i 为第 i 个评价指标的标准化得分. 按等比法划分健康等级为健康、亚健康、不健康和病态这 4 个等级.

2 结果与讨论

2.1 北运河水系底栖动物空间分布特征

北京市北运河水系共采集到底栖动物 29 种,隶属 5 纲 11 科,以水生昆虫和软体动物为主,其中水生昆虫 13 种,软体动物 13 种,环节动物 3 种,群落结构单一. 由图 2(a) 可见,所有样点中,朝宗桥物种数最高,为 15 种,其次为凤河营闸和大红门,样点数为 12 种,其余样点物种均小于等于 10 种. 部分站点受高强度人类活动及水污染影响,底栖动物群落退化严重,锥石口、跃进桥、二热闸、松林闸、土城沟出口闸、酒仙桥闸、乐家花园、团城湖和南花园这 9 个站点均只捕获到 1 种物种. 对北京市北运河水系底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数空间分布特征进行分析,如图 2(b) 所示. 流域内底栖动物多样性指数空间异质性较大,基本处于较低水平,整体状况较差,多个点位多样性指数为 0. 由图 2(c) 可知,流域内样点的 BI 指数最小值为 5,最大值为 9.2.

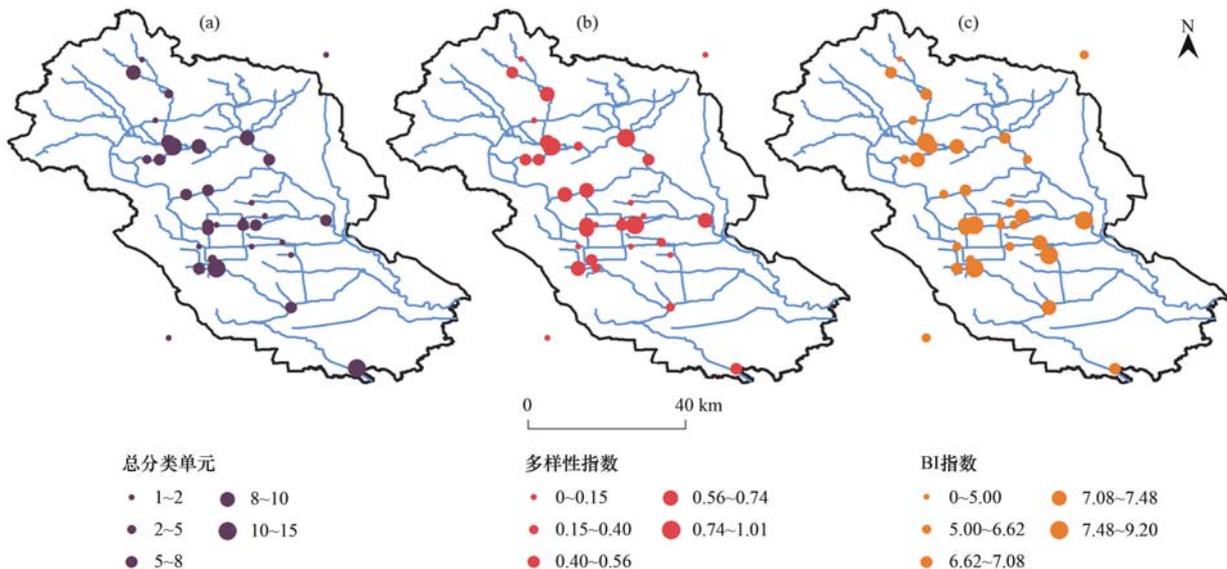


图 2 北运河流域底栖动物特征值空间分布

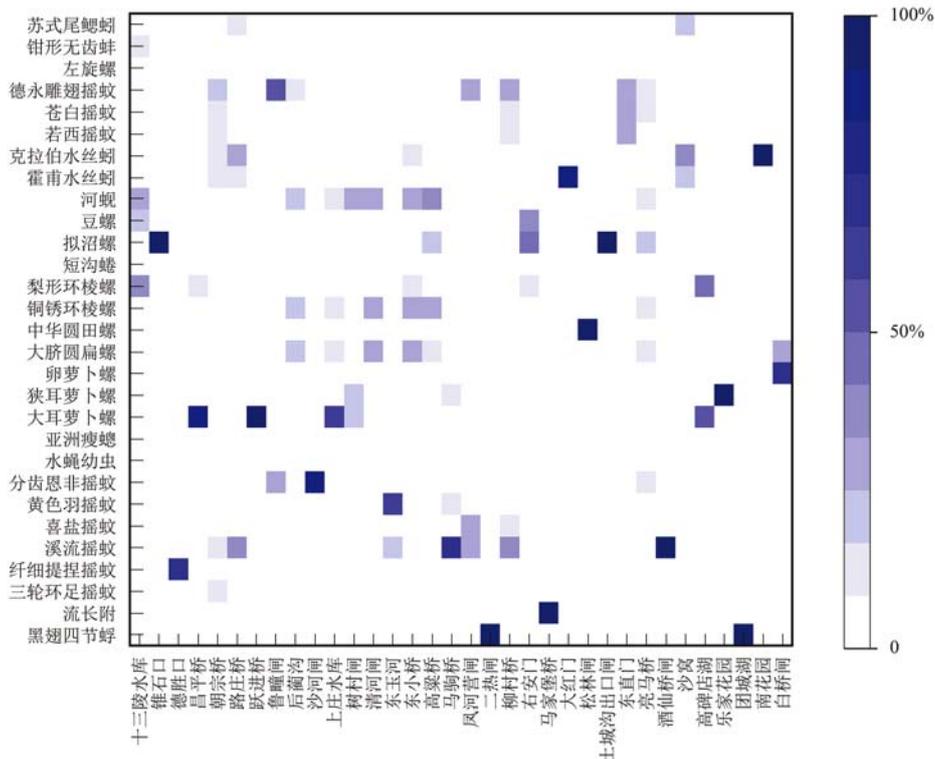
Fig. 2 Spatial distribution of characteristic values of macrobenthos in the North Canal River basin

与山区河流相比,城市河流河道形态、河岸带土地利用等均受人类活动直接改造和间接影响,导致城市河流水质、水量和水生态都承受巨大压力. 城市河流底栖动物种类少,多样性低,敏感类群少,

耐污类群多. 一般来说,山区河流底栖动物分布会优于城市河流,但由图 2 可知,在北运河流域,底栖动物分布并非完全是山区优于城市. 从行政区域来看,底栖动物分类单元数小、多样性低的点位集中在海

淀区、朝阳区、东城区和西城区。昌平区底栖动物分布整体优于其他区域,而昌平桥和锥石口两个点位底栖动物分布较差,依据水生生态调查记录结果,发现锥石口周围存在明显潜在污染源及重度流域侵蚀;昌平桥底质单一,栖境复杂度低,河岸带分布住宅和商业用地。

由图 3 中北运河流域各点位底栖动物分布可知,北运河水生昆虫种类较多,但大多数样点都以耐污能力较强的摇蚊为绝对优势种,水生昆虫摇蚊主要以细菌和藻类为食,对水质净化有重要作用;而耐污能力较差的敏感种,如蜉蝣目的黑翅四节蜉只出现在仅有一个物种的二热闸和团城湖两个样点。



色块颜色深浅代表对应站点该底栖动物数量占比大小

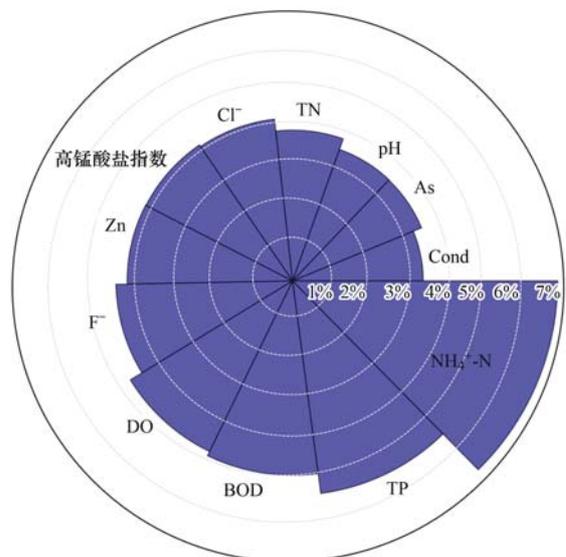
图 3 北运河流域采样点底栖动物分布

Fig. 3 Distribution of macrobenthos in the North Canal River basin

2.2 底栖动物的关键水质影响因子识别

本次采样共测量了 12 种水质因子,包括: pH、氟化物(F^-)、溶解氧(DO)、氨氮($NH_4^+-N^+$)、高锰酸盐指数、砷(As)、锌(Zn)、总磷(TP)、总氮(TN)、电导率(Cond)、生化需氧量(BOD)和氯化物(Cl^-)。冗余分析结果表明,12 种水质因子共解释了 54.2% 的群落结构变化。采用层次分割法得到各因子解释率及其所占比例见图 4,其中, F^- 、 NH_4^+-N 、TP 和 BOD 通过显著性水平为 0.01 的置换检验,是影响北京市北运河底栖动物分布的关键水质因子。

图 5 展示了关键 4 种影响底栖动物的水质因子在北运河流域的空间分布, $NH_4^+-N^+$ 与 TP 主要反映水体氮、磷等营养物质浓度,具有较高一致性,低值主要分布在昌平区的山区河流及中心城区的护城河,高值主要分布在昌平区南部及北运河流域南部; BOD 是水体有机污染物含量的综合指标,高值主要分布在昌平区南部; F^- 具有较强还原性,其被氧化



轴向数值代表单种水质因子对底栖动物群落影响的解释率

图 4 北运河流域底栖动物水质影响因子解释率

Fig. 4 Interpretation rate of impactful water quality factors on macrobenthos in the North Canal River basin

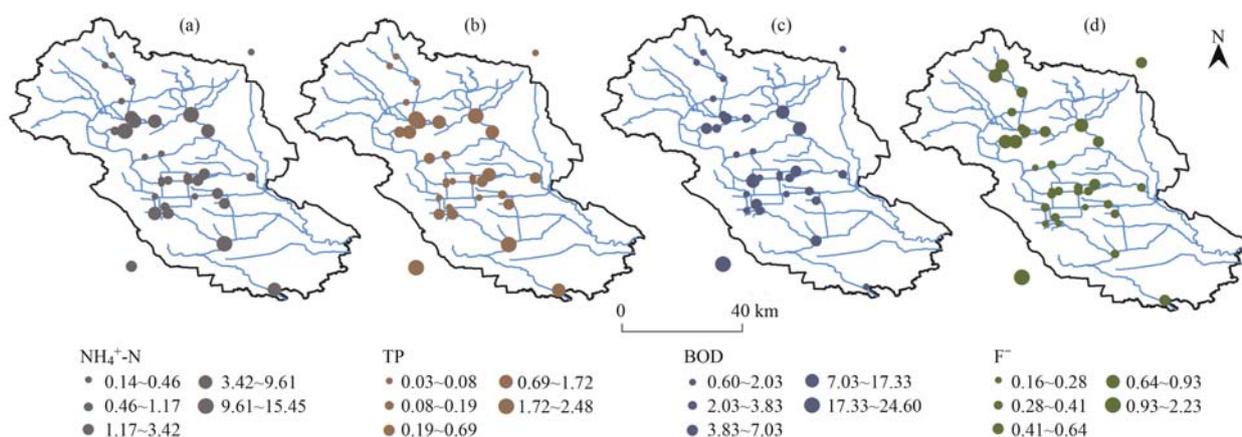


图5 北运河流域关键水质因子空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of key water quality factors in the North Canal River basin

过程需要消耗 DO,可以反映水体中 DO 含量,高值主要分布在昌平区、海淀区。

2.3 水质因子对应指示物种及其阈值划分

采用 TITAN 法分析北京市北运河底栖动物群落,结果表明氟化物 and 生化需氧量均没有指示物种,得出 5 种氨氮指示物种,均为正响应物种(即响应变量随环境因子梯度增加而增加),如图 6 所示.指示物种包括摇蚊科和椎实螺科,分别为 A5(溪流摇蚊)、A6(喜盐摇蚊)、A26(德永雕翅摇蚊)、A12(狭耳萝卜螺)和 A27(左旋螺),椎实螺科阈值高于摇蚊科,阈值范围为 $1.09 \sim 6.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即当水体氨氮含量达到 $6.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,除狭耳萝卜螺和左旋螺外,大部分正响应物种已超过耐受极限,群落已不再产生显著阈值响应。

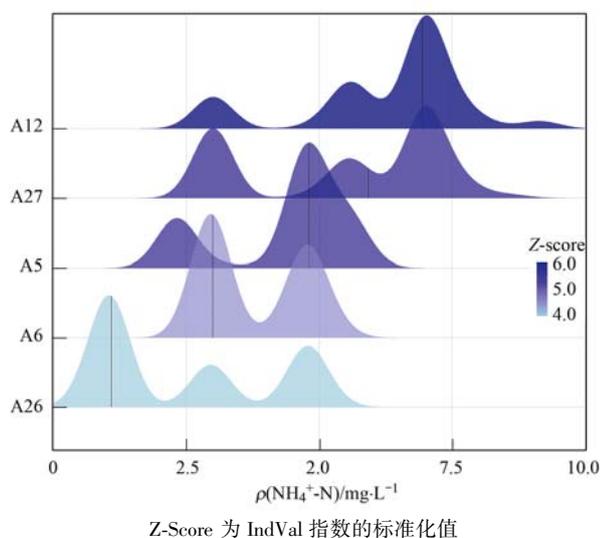


图6 TITAN 法分析北运河流域氨氮指示物种及阈值

Fig. 6 Indicator species and thresholds of ammonia nitrogen in the North Canal River basin by the TITAN method

采用 TITAN 法得到 3 种总磷指示物种,均为正响应物种,如图 7 所示.总磷的指示物种也包括摇蚊科和椎实螺科,椎实螺科阈值高于摇蚊科,阈值范围

为 $0.48 \sim 1.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即当水体总磷含量达到 $1.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,除狭耳萝卜螺和左旋螺外,大部分正响应物种已超过耐受极限,群落已不再产生显著阈值响应。

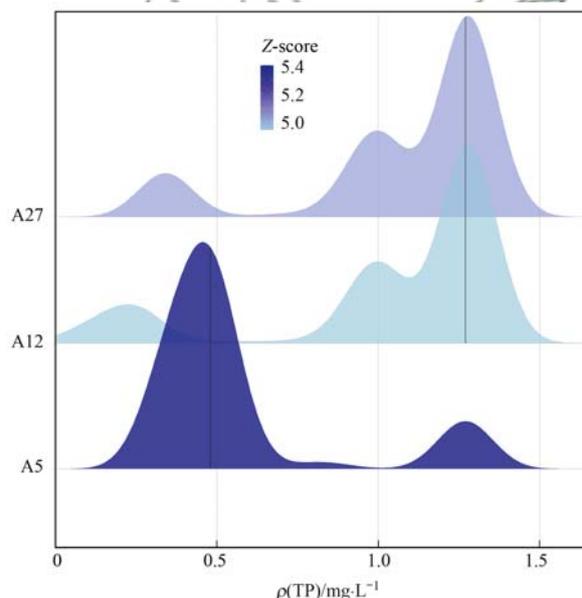


图7 TITAN 法分析北运河流域总磷指示物种及阈值

Fig. 7 Indicator species and thresholds of total phosphorus in the North Canal River basin by the TITAN method

2.4 基于底栖动物的北运河水系水生态健康评价

2.4.1 基于 B-IBI 法的水生态健康评价

北京市北运河流域受人类活动影响剧烈,难以找到无干扰点或弱干扰点,因此,结合已有研究和实际情况,确立了参考点选择的两个原则:①栖息地评价分数在 80 分以上,且河岸带无点源污染;②水质综合评价标准在 III 类标准以上.据此标准选择的参照点有德胜口、树村闸、清河闸和亮马桥。

根据候选参数分布范围可以剔除变化范围小的参数,其中,EPT 分类单元数、均匀度指数、毛翅目相对丰度、蜉蝣目相对丰富、襁翅目相对丰度、双

翅目相对丰度、无足类群相对丰度、敏感类群相对丰度、敏感类群分类单元数、捕食者相对丰度、滤食者相对丰度和粘附者相对丰度的分布范围非常集中,不适合参与指标构建.对余下的 14 个参数进行判别能力分析,根据 IQ 值判定,软体动物分类单元数、多样性指数、优势分类单元个体丰度、前 3 位

优势分类单元个体丰度和颤蚓丰度这 5 个参数 IQ 值大于等于 2.剔除其余参数,保留参数的相关性分析结果见表 2,发现多样性指数与优势分类单元个体丰度、前 3 位优势分类单元个体丰度显著相关,且后两者也显著相关,故保留多样性指数,剔除另外两个参数.

表 2 候选指标 Spearman 相关性分析结果¹⁾

Table 2 Results of spearman rank correlation analysis among candidate metrics

	M1	M3	M4	M5	M6	M8	M9	M13	M14	M16	M17	M20	M22
M1	1.00												
M3	0.78 **	1.00											
M4	0.63 **	0.09	1.00										
M5	0.83 **	0.97 **	0.16	1.00									
M6	0.79 **	0.47 **	0.65 **	0.53 **	1.00								
M8	-0.74 **	-0.35 *	-0.72 **	-0.42 *	-0.95 **	1.00							
M9	-0.75 **	-0.48 **	-0.64 **	-0.52 **	-0.93 **	0.82 **	1.00						
M13	0.42 *	0.50 **	-0.19	0.53 **	0.31	-0.24	-0.28	1.00					
M14	0.61 **	0.82 **	0.09	0.85 **	0.31	-0.24	-0.30	0.22	1.00				
M16	0.42 *	0.50 **	-0.19	0.53 **	0.31	-0.22	-0.28	1.00 **	0.22	1.00			
M17	-0.29	-0.71 **	0.38 *	-0.62 **	-0.03	-0.08	0.06	-0.53 **	-0.63 **	-0.53 **	1.00		
M20	1.00 **	0.79 **	0.63 **	0.83 **	0.79 **	-0.74 **	-0.75 **	0.42 *	0.61 **	0.42 *	-0.29	1.00	
M22	0.33	0.35 *	0.03	0.39 *	0.21	-0.12	-0.24	0.55 **	0.33	0.55 **	-0.37 *	0.33	1.00

1) * 表示在 0.05 显著性水平上相关, ** 表示在 0.01 显著性水平上相关

采用比值法对选出的 3 个参数进行计分,得出参照点和其他样点 B-IBI 值,以参照点 25% 分位数值为健康标准,对小于该值分布范围进行 3 等分,北京市北运河 B-IBI 指数值的评价标准见表 3.北运河

水系 33 个点的水生态健康等级见图 8(a), 7 个站点评估结果为健康, 7 个站点评估结果为亚健康, 8 个站点评估结果为不健康, 11 个站点评估结果为病态.

表 3 北运河流域底栖动物指数 B-IBI 健康评价分级标准

Table 3 Grading standards for health assessment based on B-IBI of macrobenthos in the North Canal River basin

等级	健康	亚健康	不健康	病态
参数	> 2.41	1.93 ~ 2.41	1.14 ~ 1.93	0 ~ 1.14

2.4.2 基于指数综合法的水生态健康评价

基于表 1 提出的评价指数,首先进行分布范围比较,发现: EPT 分类单元数、均匀度指数、毛翅目相对丰度、蜉蝣目相对丰富、襉翅目相对丰度、双翅目相对丰度、无足类群相对丰度、敏感类群相对丰度、敏感类群分类单元数、捕食者相对丰度、滤食者相对丰度和粘附者相对丰度分布范围非常集中.对剩余指数进行 K-S 正态分布检验,发现均不满足正态分布,故采用 Spearman 相关性分析,得到其相关系数及显著性,见表 2.其中,总分类单元数与摇蚊分类单元数、耐污类群分类单元数显著相关,因总分类单元数包含信息更多,故保留;水生昆虫分类单元数与摇蚊分类单元数和摇蚊丰度显著相关,摇蚊分类单元数与摇蚊丰度和耐污类群分类单元数显著相关,且水生昆虫分类单元与总分类单元也存在很强相关性,故保留摇蚊丰度参数;多样性指数与优势分类单元丰度和前 3 位优势分类单元丰

度显著相关,保留多样性指数.最终筛选出总分类单元数、软体动物分类单元数、多样性指数、摇蚊丰度、寡毛类丰度、软体动物丰度和 BI 指数这 7 个指标.

根据各指标评分标准得到指标评分,计算出综合健康评分,按照健康等级判定标准,北京市北运河水系水体健康等级如图 8(b) 所示,全流域大部分样点处于亚健康状态, 4 个站点评估结果为健康, 2 个站点为不健康, 1 个站点为病态.

对比两种方法的水生态健康评价结果,发现指数综合法评价结果大多数站点呈亚健康状况, B-IBI 评价结果中病态比例最大;指数综合法评价的健康站点分布在昌平区、朝阳区和大兴区,除大兴区凤河营闸站点外,其他 3 个站点在 B-IBI 评价结果中也为健康状态; B-IBI 评价的健康站点分布在昌平区、朝阳区、海淀区和西城区,病态站点主要分布在中心城区和朝阳区,可见 B-IBI 法对水生态健康

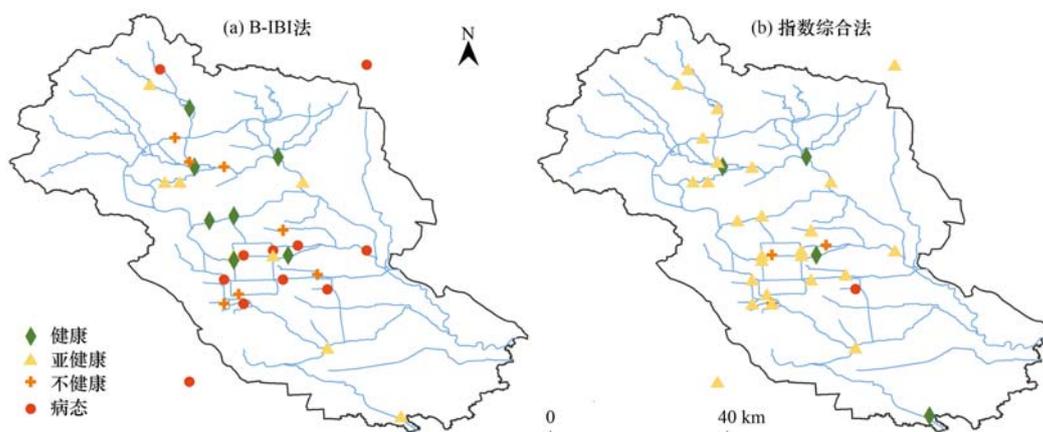


图 8 北运河流域水生态健康评价结果

Fig. 8 Results of aquatic ecosystem health assessment in the North Canal River basin

评价标准更宽松,对病态标准更严格.基于两种健康评价方法,有 35.3% 的站点健康评价等级相同,综合两种健康评价结果,认为北运河水系水生态整体处于亚健康-不健康状态.

3 结论

(1) 北运河水系底栖动物群落以水生昆虫和软体动物为主,共鉴定出 5 纲 11 科,物种分类单元数平均值为 5.47,主要以耐污种为主,底栖动物群落香浓维纳指数平均值为 0.4, BI 指数平均值为 6.95.

(2) 氟化物、生化需氧量、氨氮和总磷为北运河水系底栖动物群落关键水环境影响因子.采用 TITAN 法在北运河水系确定了 4 种氨氮正响应指示物种,阈值范围 $1.09 \sim 6.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 种总磷正响应指示物种,阈值范围 $0.48 \sim 1.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) 通过对比 B-IBI 和综合指数法两种水生态健康评价方法,发现北运河水系水生态健康总体较差,中上游健康状况相对较好,健康状况最好地区主要位于昌平区山区,最差地区主要位于朝阳区及中心城区.

参考文献:

[1] 谭颖, 郑训皓, 陈慈, 等. 流溪河大型底栖动物群落的时空分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, **41**(2): 747-760.
Tan Y, Zheng X H, Chen C, *et al.* Temporal and spatial distributions of macroinvertebrates and their influencing environmental factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(2): 747-760.

[2] 秦珊, 崔建升, 刷泽佳, 等. 人为干扰条件下白洋淀底栖动物群落变化及其主要环境影响因子分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 1123-1133.
Qin S, Cui J S, Ju Z J, *et al.* Changes of benthic invertebrate community in the Baiyangdian Lake and analysis of main environmental factors under the condition of human disturbance [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 1123-1133.

[3] 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 94-

106.

Li Y L, Li Y F, Xu Z X. Effect of environmental factors on macroinvertebrate community structure in the Huntai River basin in the Huntai River basin[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 94-106.

[4] 杨璐, 李佳蹊, 钱塘毅, 等. 太子河着生藻类群落与氮、磷营养盐的定量关系研究[J]. 生态毒理学报, 2019, **14**(6): 104-117.

Yang L, Li J X, Qian T Y, *et al.* Quantitative analysis of nitrogen and phosphorus nutrients for periphyton population in Taizi River[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, **14**(6): 104-117.

[5] 吴丹, 卢奥然, 田爽, 等. 浑太河鱼类群落多样性及生境适宜性量化分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(11): 4875-4885.

Wu D, Lu A R, Tian S, *et al.* Quantitative analysis of the diversity and habitat suitability of the Huntai River fish community[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4875-4885.

[6] Cao X F, Wang J, Liao J Q, *et al.* The threshold responses of phytoplankton community to nutrient gradient in a shallow eutrophic Chinese lake[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **61**: 258-267.

[7] 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.

Wang B X, Yang L F, Hu B J, *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(6): 1481-1490.

[8] 李强, 杨莲芳, 吴璟, 等. 底栖动物完整性指数评价西苕溪溪流健康[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 2141-2147.

Li Q, Yang L F, Wu J, *et al.* Stream health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Xitiao Stream, Zhejiang province, China [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(9): 2141-2147.

[9] 池仕运, 竺维佳, 施练东, 等. 应用底栖动物完整性指数评价水源地水库溪流健康状态[J]. 水生生态学杂志, 2012, **33**(2): 16-25.

Chi S Y, Zhu W J, Shi L D, *et al.* The use of benthic index of biotic integrity (B-IBI) to assess the stream health in the upper watershed of reservoir-based water resources area[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(2): 16-25.

[10] 陈俊贤, 蒋任飞, 陈艳. 水库梯级开发的河流生态系统健康

- 评价研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(3): 334-340.
- Chen J X, Jiang R F, Chen Y. Evaluation on the health of river ecosystem under the cascade development of reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(3): 334-340.
- [11] 孔凡青, 崔文彦, 周绪申. 基于大型底栖动物完整性指数(B-IBI)的永定河水系生态健康评价[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(3): 550-555.
- Kong F Q, Cui W Y, Zhou X S. Health assessment on Yongding River watershed using benthic index of biotic integrity (B-IBI) [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(3): 550-555.
- [12] 付岚, 江源, 刘琦, 等. 基于大型底栖动物完整性指数 B-IBI 的东江流域水生态健康评价[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(8): 1502-1511.
- Fu L, Jiang Y, Liu Q, *et al.* Eco-health assessment of Dongjiang River basin based on index of biotic integrity (B-IBI) of macroinvertebrates [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(8): 1502-1511.
- [13] 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 等. 北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 633-639.
- Chen L, Li L F, Zhi X S, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of microorganism pollutions in the Beiyun River [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 633-639.
- [14] 苏瑶, 许育新, 安文浩, 等. 基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1270-1279.
- Su Y, Xu Y X, An W H, *et al.* Assessment of ecosystem health of an urban river based on the microbe index of biotic integrity (M-IBI) [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1270-1279.
- [15] 耿世伟, 渠晓东, 张远, 等. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2281-2287.
- Geng S W, Qu X D, Zhang Y, *et al.* Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment [J]. Environmental Science, 2012, **33**(7): 2281-2287.
- [16] 渠晓东, 陈军, 陈皓阳, 等. 大型底栖动物快速生物评价指数在城市河流中的应用[J]. 水生态学杂志, 2021, **42**(3): 14-22.
- Qu X D, Chen J, Chen H Y, *et al.* Application of rapid bioassessment indices of macroinvertebrates in urban streams [J]. Journal of Hydroecology, 2021, **42**(3): 14-22.
- [17] 顾晓昀. 北京市北运河水系城市河流生态系统健康评价 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2018. 7-10.
- Gu X Y. Health assessment of urban stream ecosystem in the North Canal River basin, Beijing, China [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2018. 7-10.
- [18] 文方芳, 贾伟, 李桐, 等. 北运河流域(北京段)养分资源估算与现状分析[J]. 中国农技推广, 2015, **31**(10): 37-40.
- [19] 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.
- [20] 邱莹, 靳燕, 苏振华, 等. 城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2287-2295.
- Qiu Y, Jin Y, Su Z H, *et al.* Analysis of the spatial changes in bacterial communities in urban reclaimed water channel sediments: a case study of the North Canal River [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2287-2295.
- [21] 荆红卫, 张志刚, 郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染来源分析[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(2): 319-327.
- Jing H W, Zhang Z G, Guo J. Water pollution characteristics and pollution sources of Bei Canal River system in Beijing [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(2): 319-327.
- [22] Lai J S, Zou Y, Zhang J L, *et al.* rdacca.hp: an R package for generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analysis [J]. bioRxiv, 2021, doi: 10.1101/2021.03.09.434308.
- [23] Baker M E, King R S. A new method for detecting and interpreting biodiversity and ecological community thresholds [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2010, **1**(1): 25-37.
- [24] Blocksom K A, Kurtenbach J P, Klemm D J, *et al.* Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002, **77**(3): 311-333.
- [25] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, *et al.* A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1996, **15**(2): 185-211.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)