

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王玮,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升革,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素去除及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛体达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析

贺玉晓¹, 李珂^{1,2}, 任玉芬^{2*}, 王思琪², 方文颖³

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京市生态系统研究站, 北京 100085; 3. 南水北调大宁管理处, 北京 102442)

摘要: 2019年春季(3~5月)在北京市开展了17个水体20个断面的大型底栖动物调查,分析其群落结构特征与环境因子的关系。共采集并鉴定出大型底栖动物64个分类单元(种),分属3门6纲32科。结果发现,北京不同区域河流大型底栖动物的密度组成、优势种和物种数存在较大的空间差异,山区是水生昆虫密度最大的区域,平均密度为33.95 ind.·m⁻²,主要优势种为蚋科(Simuliidae sp.)、纹石蛾(*Hydropsyche* sp.)和高山似突摇蚊(*Paracadius alpicola*);郊区摇蚊幼虫和寡毛纲的平均密度最大,分别为82.58 ind.·m⁻²和36.21 ind.·m⁻²,主要优势种为小云多足摇蚊(*Polypedilum nubeculosum*)和苍白摇蚊(*Chironomus pallidivittatus*);市区以腹足纲的密度最大,为88.75 ind.·m⁻²,主要优势种为铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)和梨形环棱螺(*Bellamya purificata*)。市区和郊区发现的物种数均比山区多14种。CCA典范对应分析结果表明,营养盐浓度是影响郊区大型底栖动物群落结构的主要因素,人类活动强度和水温是影响市区和山区大型底栖动物群落结构的主要因素。

关键词: 北京; 河流; 大型底栖动物; 群落结构; 环境因子; 典范对应分析

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2951-12 DOI: 10.13227/j.hjcx.201911161

Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring

HE Yu-xiao¹, LI Ke^{1,2}, REN Yu-fen^{2*}, WANG Si-qi², FANG Wen-ying³

(1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Beijing Urban Ecosystem Research Station, State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Daning Management Office of the Beijing South-to-North Water Diversion, Beijing 102442, China)

Abstract: Macrobenthos from 20 sites of 17 rivers in Beijing were investigated in the spring of 2019, and the relationship between community structure characteristics and environmental factors was analyzed. A total of 64 classification units (species) of macrobenthos from 3 phyla, 6 classes, and 32 families were identified. We found that there were large spatial differences between the density composition and dominant species of macrobenthos. Mountainous river area had the highest density of aquatic insects (33.95 ind.·m⁻²), and the main dominant species were Simuliidae sp., *Hydropsyche* sp., and *Paracadius alpicola*. In suburban areas, Chironomidae and Oligochaeta showed the largest average density, which was 82.58 ind.·m⁻² and 36.21 ind.·m⁻², respectively, and *Polypedilum nubeculosum* and *Chironomus pallidivittatus* were the dominant species in this area. Furthermore, macrobenthos in urban rivers were mainly Gastropods (88.75 ind.·m⁻²), and the dominant species were *Bellamya aeruginosa* and *Bellamya purificata*. Fourteen more species were found in the urban and suburban river areas than in mountain areas. According to the results of the canonical correspondence analysis, there were many factors affecting the community structure of macrobenthos, including water temperature, TN, Chl-a, pH, and human activity. Nutrient concentration was the main factor affecting the community structure of macrobenthos in the suburban river area, while human activities and water temperature were the major determinants of the macrobenthos community structure in mountainous and urban rivers.

Key words: Beijing; rivers; macrobenthos; community structure; environment factors; canonical correspondence analysis

河流与城市发展息息相关,城市化给人们带来便利的同时,城市河道水文和河岸带也快速改变^[1]、流域集水区土地利用变化加剧以及河流水质不断恶化^[2],严重影响河流生态系统。协调城市化发展与河流生态系统健康的关系,保障居民福祉是我国当前亟需研究和解决的问题。大型底栖动物是河流生态系统重要组成部分,它们的种类组成、丰度、空间分布和季节动态等能反映河流生态变化规律^[3],其群落结构特征受当地的自然环境特征和社会

经济发展程度双重因素影响^[4]。相对于其他生物类群(如藻类和鱼类),大型底栖动物具有易鉴定、寿命较长、活动能力和范围较小以及对环境变化较敏感等特点^[5],开展底栖动物监测对当地生物群落影响小,不

收稿日期: 2019-11-18; 修订日期: 2020-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503004, 2017YFF0207303); 国家自然科学基金项目(71533005, 31600333)

作者简介: 贺玉晓(1976~),女,博士,副教授,主要研究方向为水生生物, E-mail: heyuxiao@hpu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yfren@cees.ac.cn

会破坏其群落结构,且可以为解释累积效应提供有力信息,是理想的指示生物^[6],被国内外很多研究者关注. Li 等^[7]采用 CCA 典范对应分析研究发现不同尺度的环境因子对大型底栖动物空间变异解释度存在明显差异. Johnson 等^[8]的研究发现生境尺度的环境因子对大型底栖动物的影响更大,生境指标解释了底栖动物类群组成变异的 23%.

国内有不少学者利用大型底栖动物对河流生态健康状况进行评价,研究多集中在如长江流域^[9,10]、洞庭湖^[11]、辽河流域^[12,13]以及京津冀地区河流. 北京市密云水库^[14]、潮白河流域^[15]、北运河流域^[16,17]及永定河流域^[18]也开展了大型底栖动物调查工作,并将其作为河流生态系统健康评价的重要组成部分. 张宇航等^[17]的研究发现北京河流大型底栖动物受河流自然环境变化影响显著,形成了典型的山区-城市底栖动物空间格局. 本文对北京市春季河流大型底栖动物开展调查,分析区域河流大型底栖动物群落结构与环境因子之间的关系,明晰区域生态环境差异对大型底栖动物群落结构的影响,以便更加准确地分析评估河流生态状况,以期为区域生态管理和城市水生态修复提供基础数据和技术支撑,也为水环境管理部门提供决策依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京境内共有包括永定河水系、潮白河水系、北运河水系、大清河水系和蓟运河水系等五大河系^[19]. 其中北运河水系,贯穿主要城区,在北京市内全长 89.4 km,流域面积 4 348 km²,是北京市中心城

区的主要行洪和排污河道^[20]. 北京市交通五环线以内城市化较高,建设面积约占 67%,是北京市的主要城区^[21],人类活动干扰较强烈.

考虑到北京河道底质的多样性、土地利用的空间变化和人为干扰因素,兼顾空间均匀性,分别在山区(S1~S2)、郊区(五环外 S3~S11)及市区(五环内 S12~S20)布设 20 个大型底栖动物监测断面(图 1),涵盖饮用水水源区、工业用水区、农业用水区和景观娱乐用水区. 各采样点详细信息如表 1 所示. 于 2019 年 3~5 月,开展 20 个监测点大型底栖动物采样监测.

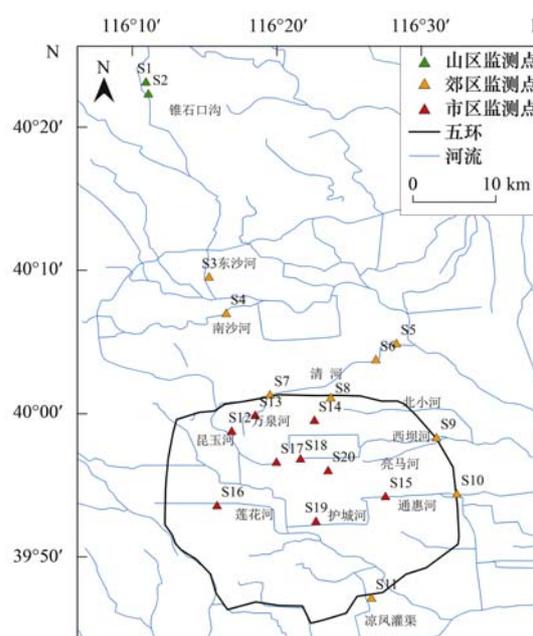


图 1 采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution map of the sampling sites

表 1 采样点位信息

Table 1 Information of sampling sites

	序号	名称	水质类别	水体功能	底质	备注
山区	S1	锥石口沟	II	饮用水源保护区	大卵石、水草	周围草本树木密集
	S2	锥石口沟	II	饮用水源保护区	大卵石	修路又翻新的河道
郊区	S3	东沙河	IV	娱乐用水区	淤泥、细沙	桥下的浅滩,有少量淤泥
	S4	南沙河	IV	娱乐用水区	大卵石、粗砂	生态型岸坡,水库附近
	S5	清河	V	农业用水区及一般景观要求水域	小卵石、砂石	生态型岸坡,水体清澈流动
	S6	清河	V	农业用水区及一般景观要求水域	黑色淤泥	水流缓慢,水搅动后黑且臭
	S7	清河	IV	娱乐用水区	人工岩床,粗砂,水草	浆砌石护岸,有水草
	S8	清洋河	IV	娱乐用水区	人工岩床,粗砂,细沙	浆砌石护岸,水体常发绿
	S9	西坝河	IV	农业用水区及一般景观要求水域	人工岩床,粗砂,细沙,	水体有异味,淤泥堆积性河岸
	S10	通惠河	V	一般景观要求水域	人工岩床,粗砂,细沙	浆砌石护岸,水体发绿
	S11	凉风灌渠	IV	娱乐用水区	大砾石,水草	生态型岸坡,流速较快
市区	S12	昆玉河	III	娱乐用水区	人工岩床,粗砂,细沙	水泥型护岸,水体清澈见底
	S13	万泉河	IV	娱乐用水区	人工岩床,粗砂,细沙	浆砌石护岸,水位变化较大
	S14	小月河	IV	娱乐用水区	人工岩床,粗砂,细沙	浆砌石护岸,水体发绿
	S15	通惠河	IV	一般工业用水区及娱乐用水区	人工岩床,粗砂,细沙	浆砌石护岸,水体发绿
	S16	莲花河	IV	娱乐用水区	大砾石,水草	生态型护岸,周围灌木茂密
	S17	南长河	III	一般鱼类保护区	人工岩床,粗砂,水草	生态型护岸,水体发黄
	S18	北护城河	IV	一般工业用水区及娱乐用水区	细沙,淤泥,水草	生态型护岸,周围有工地施工
	S19	陶然亭湖	IV	娱乐用水区	细沙,淤泥,水草	沉水植物较多,水体混浊
	S20	什刹海	III	重要游览区	细沙,淤泥,水草	河道沉水植物较多

1.2 样品采集

1.2.1 大型底栖动物采集及鉴定

选取生物环境开阔, 流速、水深、底质组成及生物环境均有一定代表性的 100 m 河段进行采样^[4], 可涉水型河流样品采集采用索伯网, 每个采样点采集 3 个 30 cm × 30 cm 样方, 混合成一个样品. 无法涉水的大型河流, 使用 1/16 m² 彼得逊采泥器采集大型底栖动物, 每个样点采集 3 次混合成一个样品. 现场用 60 目尼龙网筛洗所采集泥样, 剩余物带回实验室, 置于白色瓷盘中, 逐一挑出大型底栖动物, 并用 95% 酒精保存. 大型底栖动物鉴定在显微镜下进行, 所有样品都尽可能鉴定至最低的分类单元^[22,23].

1.2.2 环境因子采集与测定

使用便携式 YSI 水质测定仪现场测量水温 (WT)、pH、电导率 (COND) 和溶解氧 (DO). 采集混合水样 1 L 存放于广口塑料瓶中, 水样采集完毕 48 h 内带回实验室. 参照文献^[24]测定总氮 (TN)、总磷 (TP)、氨氮 (NH₄⁺-N)、五日生化需氧量 (BOD₅)、化学需氧量 (COD) 和叶绿素 (Chl-a). 采用栖息地环境质量评价指标 (qualitative habitat evaluation index, QHEI) 于各采样点现场状况调查赋分, 依据美国 EPA 快速生物评价手册中的评价方法, 确定栖息地多样性、河道变化、人类活动强度、植被多样性和底质异质性 5 个指标, 每个指标分为 4 个级别: 好 (16 ~ 20)、较好 (11 ~ 15)、一般 (6 ~ 10) 和差 (0 ~ 5)^[25,26].

1.3 数据处理方法

1.3.1 多样性指数

底栖动物群落特征分析采用物种优势度指数 (Y)、Margalef 丰富度指数 (d)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J) 表征.

(1) 物种优势度指数

$$Y = f_i \times P_i$$

(2) Margalef 丰富度指数

$$d = (S - 1) / \ln N$$

(3) Shannon-Wiener 多样性指数

$$H' = \sum \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}$$

(4) Pielou 均匀度指数

$$J = H' / \ln S$$

式中, Y 是优势度, f_i 是第 i 物种出现的频率, P_i 是第 i 物种个体数量占总个体数量的比例, 当 $Y > 0.02$ 时, 确定为优势种, 山区、郊区和市区河流分开计算^[27]. S 表示总物种数, N 表示总个体数, n_i 表示第 i 种的个体数^[17].

1.3.2 水环境质量评价

依据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 等级划分标准, 采用综合水质标识指数法 (I_{wq}) 及单因子水质标识指数法对各样点水环境进行评价, 具体计算方法为:

$$I_{wq} = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4$$

$$X_1 \cdot X_2 = \sum_{i=1}^m w_i P'_i$$

式中, X_1 为水体的综合水质类别; X_2 为综合水质在 X_1 类水质变化区间所处位置; X_3 为参与整体水质评价的指标中劣于功能区目标标准的水质指标个数; X_4 为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果; m 为参与评价的主要污染物指标数; w_i 为第 i 项指标权重; P'_i 为第 i 项的单因子水质标识指数^[28].

1.3.3 多元分析

大型底栖动物群落与环境因子之间的关系采用典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA)^[29]. 分析前先进行除趋势对应分析 (DCA), 若结果中最大梯度长度值大于 3, 则选择单峰模型 (CCA) 排序; 若最大梯度长度值小于 3, 则选择线性模型 (冗余分析, RDA) 排序. 环境因子筛选采用向前引入法 (forward selection), 保留能通过蒙特卡罗置换检验的显著因子 (Monte Carlo test, 9999 random permutations, $P < 0.05$). 用 CCA 排序图将物种 (各区域的优势种)、样点和环境因子绘出, 直观呈现种类组成及群落分布与环境因子之间的关系. CCA 分析采用 CANOCO 5.0 软件包完成.

2 结果与分析

2.1 环境因子特征

水环境质量评价结果如表 2 所示, 山区河流综合水质标识指数为 $I_{wq} = 3.341$, 为 III 类水质; 郊区为 4.330, 为 IV 类水质; 市区为 3.840, 为 III 类水质. 依据单因子标识指数法和综合水质标识指数法计算结果, 判别出影响北京市河流水体的主要污染因子为 TN, 其次为 TP 和 COD. 北京市河流水体水质山区优于市区, 市区优于郊区.

不同区域河流水环境特征差异较大 (表 2). 不同区域 COND、BOD₅ 浓度和 TN 浓度差异显著 ($P < 0.05$). 郊区河流 COND 平均值显著高于市区, 市区显著高于山区. BOD₅ 山区河流平均浓度 ($3.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 与市区河流 ($3.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 差异较小, 郊区河流 ($5.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 显著高于这两个区域 ($P < 0.05$), TN 浓度也呈现类似趋势. COD 浓度、TP 浓度、NH₄⁺-N 浓度和 Chl-a 浓度在各区域河流差异不显著. 对于生境质量指标而言, 底质异质性、栖息地

多样性、植被多样性、河道变化和人类活动强度具有显著差异 ($P < 0.05$)。根据现场调研,山区监测点 (S1 ~ S2) 位于河流上游,部分区域为饮用水源地,底质主要为卵石,周围植被较好,人为活动对水体干扰小,生境质量较好,各项指标平均得分较高。郊区沙河 S3 ~ S4 和清河 S5 ~ S7 均位于农业和城镇区,河岸两侧多为农田,河岸多为自然状态,水流缓慢,河床淤积,五环附近监测点 S8 ~ S11 两侧机动车流量较大,河岸大多经过人工改造,河床底质多为砂砾

和淤泥混合,底质的异质性由远郊向近郊逐渐降低,河流各项指标平均得分较低。市区监测点 S12 ~ S16 属于城市河道生境,河岸硬质化,河道渠道化严重,闸坝众多,河流横向和纵向连通性差,导致水生态系统脆弱^[1]。二环附近 S17 ~ S20 主要为景观用水,河道底部沉水植物茂盛,河岸附近人为活动强度大。市区河流受人类活动的强烈干扰,水文过程及生境变化大,各项生境质量指标在 3 个区域里平均得分最低。

表 2 北京不同区域河流环境特征¹⁾

Table 2 Environmental characteristics of different river areas of Beijing

理化指标	山区 (S1 ~ S2)	郊区 (S3 ~ S11)	城区 (S12 ~ S20)
I_{wq}	3.341	4.330	3.840
WT/°C	15.27 ± 5.09	19.57 ± 1.09	19.25 ± 1.00
pH	8.78 ± 0.74	8.90 ± 0.40	9.01 ± 0.31
COND/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	379 ± 55.72a	860.67 ± 230.35b	649.38 ± 365.27c
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.69 ± 1.19	6.76 ± 2.09	6.51 ± 1.25
BOD ₅ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.38 ± 1.65a	5.01 ± 2.13b	3.91 ± 1.46a
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	22.97 ± 7.73	35.23 ± 24.79	28.32 ± 11.13
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.86 ± 1.01a	6.97 ± 2.91b	4.42 ± 4.29a
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.17 ± 0.25	0.24 ± 0.31	0.16 ± 0.24
NH ₄ ⁺ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.074 ± 0.081	0.09 ± 0.11	0.098 ± 0.10
Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	8.57 ± 11.67	23.48 ± 46.13	28.31 ± 82.94
底质异质性	18.75 ± 1.06a	10.05 ± 5.32b	7.56 ± 3.28b
栖息地多样性	18.25 ± 0.35a	7.72 ± 4.46b	5.17 ± 2.29b
植被多样性	17.50 ± 0.71a	7.78 ± 3.76b	5.72 ± 2.69b
人类活动强度	17.50 ± 0.71a	7.89 ± 2.10b	4.44 ± 1.64c
河道变化	19.50 ± 0.50a	8.44 ± 4.19b	9.06 ± 1.24b

1) 不同的字母表示两个区域之间的多重比较结果具有显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 大型底栖动物的群落特征

2.2.1 种类组成

20 个采样点共鉴定出大型底栖动物 64 个分类单元(种),分属 3 门 6 纲 32 科,其中软甲纲 1 种,双壳纲 2 种,寡毛纲 2 种,蛭纲 2 种,腹足纲 14 种,昆虫纲 43 种,其中摇蚊幼虫 28 种(摇蚊幼虫为耐污种居多,且在北京地区占优势,故单独列出),水生昆虫 15 种。所有采样点出现频率大于 20% 的有 11 种(表 3),其中狭耳萝卜螺 (*Radix tagotis*) 的出现率最高,达到 0.500,其次为梨形环棱螺 (*Bellamya purificata*)、铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*)、豆螺 (*Bithynia* sp.) 和小云多足摇蚊 (*Polypedilum nubeculosum*),出现频率分别为 0.483、0.467、0.417 和 0.350。山区优势种主要为水生昆虫的纹石蛾 (*Hydropsyche* sp.)、长角泥甲 (*Elmidae* sp.)、蚋科 (*Simuliidae* sp.)、毛蠓科 (*Psychodidae* sp.) 和 高山似突摇蚊 (*Paracadius alpicola*); 郊区优势种多为摇蚊幼虫中的小云多足摇蚊 (*Polypedilum nubeculosum*)、苍白摇蚊 (*Chironomus pallidivittatus*)、溪流摇蚊 (*Chironomus riparius Meigen*)、寡毛纲的苏

氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*)、克拉伯水丝蚓 (*Limnodrilus claparedianus*)、扁蛭 (*Glossiphonia* sp.) 和腹足纲的膀胱螺 (*Physa acuta*)。市区优势种则多为软体动物的梨形环棱螺 (*Bellamya purificata*)、铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*)、狭耳萝卜螺 (*Radix tagotis*) 和河蚬 (*Corbicula fluminea*)。

不同区域大型底栖动物物种数量和组成也存在差异(表 4)。郊区河流物种数最多(38 种),其次为山区(37 种),市区物种数最少,仅有 10 种。山区河流物种数均值最大(15 种),其次是郊区(14 种),市区物种数均值最小(11 种),大型底栖动物的物种丰富度从山区向郊区至市区逐渐减少。山区监测点发现的 EPT 昆虫(蜉蝣目 Ephemeroptera、襁翅目 Plecoptera 和毛翅目 Trichoptera) 最多,未发现软甲纲、蛭纲、寡毛纲和双壳纲。郊区监测点发现的昆虫纲和腹足纲最多,分别为 24 种和 11 种。各区域中昆虫纲种类最多,市区 18 种,郊区 22 种,山区 14 种,其中摇蚊幼虫(隶属双翅目)种类占昆虫纲种类绝对优势(市区 81%,郊区 83%)。摇蚊幼虫物种多为耐污类群,而 EPT 多为清洁指示种,说明由山区河

表 3 大型底栖动物优势种名称及出现频率¹⁾

Table 3 Frequency of occurrence and dominant species of macrobenthos

物种名称	拉丁名	山区	郊区	市区	出现频率
节肢动物门	Arthropoda				
昆虫纲	Insecta				
毛翅目	Trichoptera				
纹石蛾属(一种)	<i>Hydropsyche</i> sp.	+			0.0167
蜻蜓目	Odonata				
大蜓科(一种)	<i>Cordulegastridae</i> sp.	+			0.0167
鞘翅目	Coleoptera				
长角泥甲科(一种)	<i>Elmidae</i> sp.	+			0.0833
双翅目	Diptera				
蚋科(一种)	<i>Simuliidae</i> sp.	+			0.167
毛蠓科(一种)	<i>Psychodidae</i> sp.	+			0.0167
大蚊属(一种)	<i>Tipula</i> sp.	+			0.0667
高山似突摇蚊	<i>Paracriodius alpicola</i>	+			0.0167
高沟粗腹摇蚊	<i>Trissopelopia longimana</i>	+			0.0333
拉普摇蚊(一种)	<i>Lappodiamesa Serra-Tosio</i> sp.	+			0.0167
特氏直突摇蚊	<i>Orthocriodius thienemanni</i> Kieffer		+		0.0500
小云多足摇蚊	<i>Polypedilum nubeculosum</i>		+	+	0.350
长跗摇蚊(一种)	<i>Tanypus</i> sp.			+	0.0667
苍白摇蚊	<i>Chironomus pallidivittatus</i>		+	+	0.0833
溪流摇蚊	<i>Chironomus riparius</i> Meigen		+	+	0.117
德勇雕翅摇蚊	<i>Glyptotendipes tokunagai</i> Sasa			+	0.0833
林间环足摇蚊	<i>Cricotopus sylvestris</i>	+			0.0833
三轮环足摇蚊	<i>Cricotopus triannulatus</i>			+	0.0833
软体动物门	Mollusca				
腹足纲	Gastropoda				
大耳萝卜螺	<i>Radix auricularia</i>	+	+	+	0.283
狭耳萝卜螺	<i>Radix tagotis</i>		+	+	0.500
膀胱螺	<i>Physa acuta</i>		+		0.283
大脐圆扁螺	<i>Hippeutis umbilicatis</i>		+	+	0.350
中华圆田螺	<i>Cipangopaludina cahayensis</i>		+	+	0.217
铜锈环棱螺	<i>Bellamyia aeruginosa</i>		+	+	0.467
梨形环棱螺	<i>Bellamyia purificata</i>		+	+	0.483
方格短沟蜷	<i>Semisulcospira cancellata</i>			+	0.100
豆螺(一种)	<i>Bithynia</i> sp.		+	+	0.417
双壳纲	Bivalvia				
河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>			+	0.0833
环节动物门	Annelida				
寡毛纲	Oligochaeta				
苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>		+		0.117
克拉伯水丝蚓	<i>Limnodrilus claparedianus</i>		+		0.250
蛭纲	Hirudinea				
扁蛭(一种)	<i>Glossiphonia</i> sp.		+	+	0.300

1) “+”表示优势种,出现频率指存在物种*i*的样品数与样品总数60的比值

流水环境优于郊区。

2.2.2 密度分布特征

不同区域河流大型底栖动物密度类群组成空间差别较大(图2)。山区采样点摇蚊幼虫主要为高山似突摇蚊和拉普摇蚊,这两个物种仅在山区监测点出现。除摇蚊外的其他昆虫大多为敏感性物种且在山区监测点密度最高,平均密度为 $33.95 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$,市区和郊区其他昆虫相对密度很小甚至为0[图3

(a)],表明河流生态环境已发生变化或受到污染。腹足纲主要分布在市区和郊区河流[图3(b)],腹足纲密度所占比重越高,摇蚊幼虫所占比重越小,市区监测点S17、S18、S19和S20所占比重均大于90%(图2)。寡毛纲和蛭纲等耐污性物种在远郊(S3~S6)监测点中的相对密度远大于山区和市区[图3(c)],近郊五环附近(S7~S11)腹足纲、摇蚊幼虫和寡毛纲占据主要优势,摇蚊幼虫的相对密度从郊区

表 4 大型底栖动物种类组成空间特征

Table 4 Spatial characteristics of the macrobenthos community in different river areas of Beijing

门	纲	目	山区	郊区	市区
节肢动物门	软甲纲		0	1	1
	寡毛纲		0	2	2
	蛭纲		0	2	2
环节动物门		蜉蝣目	2	1	1
		蜻蜓目	1	0	1
		襀翅目	1	0	0
	昆虫纲	毛翅目	1	0	0
		鞘翅目	2	1	1
		广翅目	1	0	0
		双翅目	13	22	18
软体动物门	双壳纲		0	1	2
	腹足纲		3	11	10
总物种数			24	38	37
每个采样点平均物种数			15	14	11

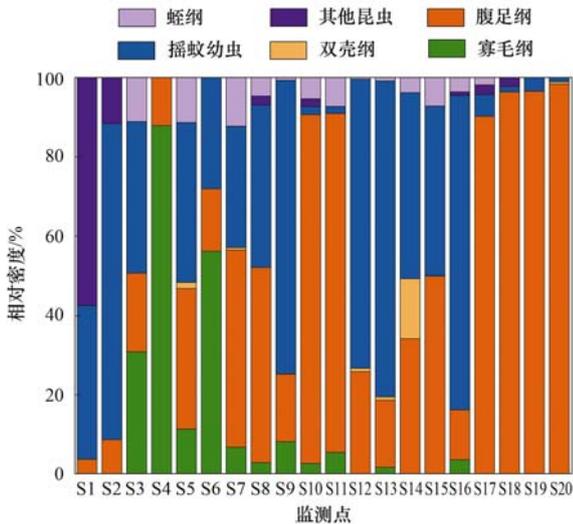


图 2 北京不同区域河流大型底栖动物主要类群的相对密度
Fig. 2 Relative abundance of macrobenthos common taxonomic groups in different river areas of Beijing

向市区逐渐下降 [图 3(d)].

2.2.3 生物多样性

Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数计算结果分别介于 0.58 ~ 2.54, 0.31 ~ 0.93 和 1.23 ~ 3.88 (图 4). Shannon-Wiener 多样性指数市区平均值为 1.60, 低于山区 (1.91) 和郊区 (1.96); Margalef 物种丰富度指数山区平均值为 2.89, 高于郊区 (2.64) 和市区 (2.14); Pielou 均匀度指数山区 (0.72)、郊区 (0.73) 和市区 (0.69) 的平均值差异性不明显 (图 4). 根据 Shannon-Wiener 多样性指数的评价标准 (0 ~ 1 重污染、1 ~ 2 为 α -中污型、2 ~ 3 为 β -中污型、3 ~ 4.5 为轻污染、>4.5 为清洁水体), 北京市大多数水体处于 α -中污染 (40%) 和 β -中污型 (55%) 之间. 结合均匀度指数和丰富度指数计算结果可知, S4、S12 和 S17 相比于北京市其他监测点水质状况相对较差,

更应受到相关管理部门重视.

2.3 大型底栖动物群落结构与环境因子之间的关系

CANOCO 软件包检验结果显示, DCA 一轴的梯度长度为 3.80, 选用 CCA 分析. CCA 分析前, 将物种数据和环境因子进行 $\lg(x+1)$ 转换 (pH 除外). CCA 分析结果表明 (表 5), 轴 1 的特征值及其与底栖动物与环境的相关性、种类物种变量、物种与环境关系的变量大于轴 2. 其中, 轴 1 和轴 2 分别可以解释 22.71% 与 11.78% 的物种累计变量和 45.97% 和 23.85% 的物种-环境累积变异. 前两轴的物种变异累计百分数为 69.82%, 表明排序能够较好地反映大型底栖动物与环境因子间的相互关系. 筛选出水温 (WT)、人类活动强度、总氮 (TN)、pH 和叶绿素 (Chl-a) 等环境因素与大型底栖动物群落关系最为显著, 分别解释了 18.1%、14.3%、9.9%、4.9% 和 7.7% 的大型底栖动物群落结构空间分异. 第 1 轴与水温 (WT)、人类活动强度和 pH 的相关性较高, 第 2 轴与总氮 (TN)、叶绿素 (Chl-a) 的相关性较高.

表 5 CCA 排序结果

Table 5 CCA ordination summary

项目	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.582 1	0.302 0	0.209 8	0.111 6
物种-环境关系	0.928 4	0.939 0	0.860 1	0.878 5
物种变异百分数/%	22.71	34.49	42.68	47.03
物种变异累计百分数/%	45.97	69.82	86.39	95.21

从各因子进入 CCA 分析的顺序及其解释率可以看出 (图 6), 水温 (WT)、人类活动强度和总氮 (TN) 的解释率相对较高, 而 pH 和叶绿素 (Chl-a) 的解释率相对较低. 山区监测点沿人类活动强度分布, 郊区监测点主要沿 TN 和 Chl-a 分布, 市区监测点主要分布在人类活动强度的反方向. 这说明高营养盐浓度是影响郊区大型底栖动物群落结构的主要因

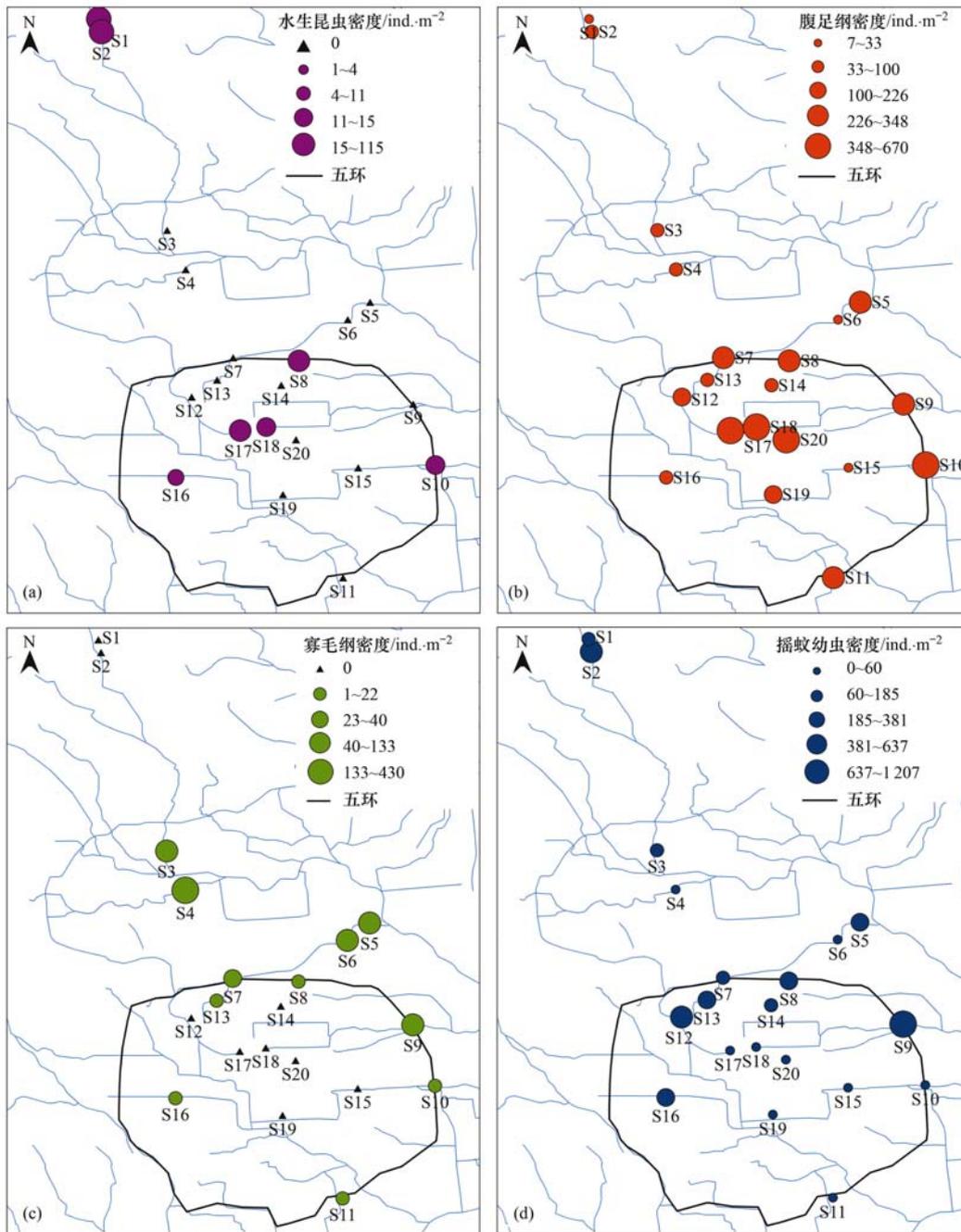


图3 北京不同区域河流大型底栖动物主要类群密度的空间分布特征

Fig. 3 Spatial patterns of density for macrobenthos common taxonomic groups in different river areas of Beijing

素,人类活动强度是影响市区和山区大型底栖动物群落结构的主要因素。

典范应对分析揭示了 30 种大型底栖动物优势种与环境因子的关系(图 6). 苏氏尾鳃蚓、克拉伯水丝蚓、扁蛭和膀胱螺等种的分布与 TN 和 Chl-a 的浓度呈正相关,这些物种大多在郊区河流有较高优势度且均属于耐污、耐低氧的物种. 长角泥甲科、大蚊幼虫、大蜉科和拉普摇蚊等水生昆虫在山区河流有较高优势度,这些物种的分布与人类活动强度指标呈正相关,与 TN 和 Chl-a 呈负相关. 中华圆田螺、梨形环棱螺和铜锈环棱螺等腹足纲物种和苍白摇蚊、

德勇雕翅摇蚊等摇蚊科幼虫与人类活动强度呈负相关。

3 讨论

3.1 大型底栖动物群落结构特征分析

北京市河流大型底栖动物分布呈现寡毛类、摇蚊等少数耐污染物种为优势类群;以 EPT 昆虫为代表的敏感物种比例降低甚至完全消失的特点,这与 Walsh 等^[30]的研究结果基本一致. 在山区上游溪流监测点位中,水生昆虫清洁指示种占优势,如纹石蛾、长角泥甲科和大蚊科幼虫等. 而在郊区监测点,

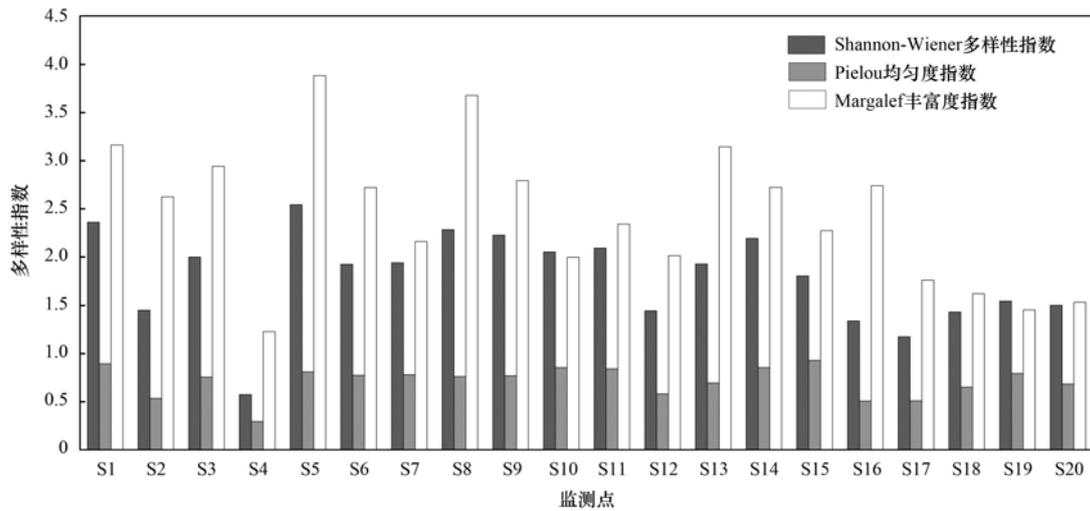


图 4 北京不同区域大型底栖动物多样性指数

Fig. 4 Species diversity indices of macrobenthos communities of different areas in Beijing

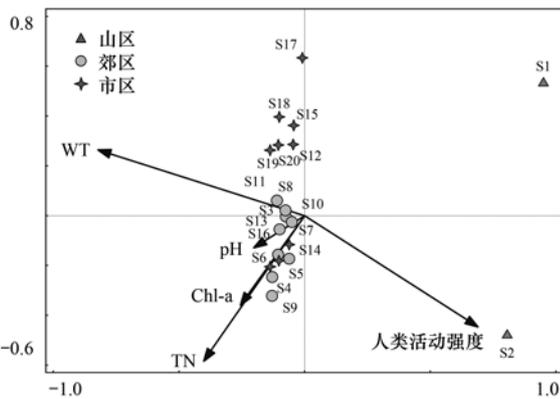


图 5 采样点与环境因子的典范应对分析排序

Fig. 5 CCA plots of sampling sites and environmental factors

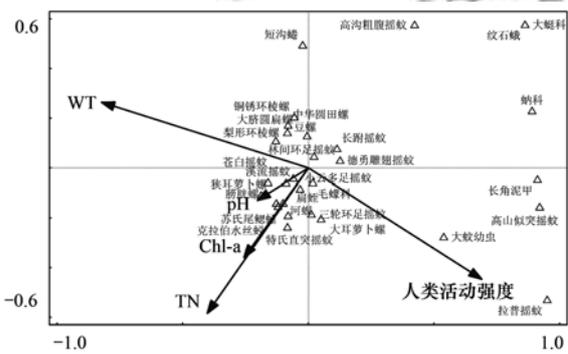


图 6 大型底栖动物群落结构与环境因子的典范对应分析排序

Fig. 6 CCA plots of macrobenthos assemblages and environmental factors

昆虫纲的摇蚊科、寡毛纲的克拉伯水丝蚓和苏氏尾鳃蚓等更占优势,水生昆虫明显减少,部分监测点没有监测到,指示物种的缺失是环境变化或环境污染的预兆^[4].流经农业用地、河床多为淤泥的郊区河流,以耐污型寡毛纲和摇蚊幼虫为主,五环内市区河道的优势种主要为梨形环棱螺、铜锈环棱螺、大耳萝卜螺和方格短勾蠕等腹足纲,这种结果可能与北京市开展的河流生态修复有关^[31],河流两岸建立绿色廊道,被修复河流河床水生植物较为丰富,水生植物生长的附着生物为螺类提供良好的食物资源^[9].

国内相关研究结果显示(表 6),城市河流底栖动物多样性指数偏低、优势种大都以寡毛纲的霍甫水丝蚓、克拉伯水丝蚓和摇蚊属的溪流摇蚊、喜盐摇蚊等为主.与国内其他城市河流相比^[32-37],北京市城市河流大型底栖动物物种数较多(64 种),多样性指数相对较高.就优势种而言,北京与其他城市河流非常相似,多为寡毛纲、摇蚊幼虫和腹足纲.不同的是,北京市区河流寡毛纲占比减少,腹足纲成为绝对优势,从大型底栖动物物种结构变化来看,北京市区水质逐渐改善.

表 6 本研究与其他城市河流大型底栖动物群落结构的比较¹⁾

Table 6 Comparison of macrobenthos community structure between Beijing and other reservoirs

研究区	物种数	优势种	密度/ind. · m ⁻²	多样性指数	文献
上海	20	霍甫水丝蚓和梨形环棱螺	690	0.16	[34]
济南	57	霍甫水丝蚓、溪流摇蚊和喜盐摇蚊	2 490	1.37	[36]
长沙	24	摇蚊科和颤蚓科	2 130	0.86	[32]
常州	113	霍甫水丝蚓和梨形环棱螺	658	—	[37]
徐州	21	克拉伯水丝蚓、苏氏尾鳃蚓和长足摇蚊	—	2.10	[35]
天津	112	霍甫水丝蚓、中华摇蚊和红裸须摇蚊	—	—	[33]
北京	64	铜锈环棱螺、梨形环棱螺和狭耳萝卜螺	182	1.79	本研究

1) “—”表示数据缺失

3.2 水环境因子与大型底栖动物空间格局关系

大型底栖动物生活史全部或者大部分时间都生活在水中,其群落结构与水环境因子联系紧密。CCA 结果显示主要影响山区大型底栖动物群落的水环境因子是水温。大型底栖动物的群落结构随着温度变化而变化^[38],本研究中山区河流水温平均比郊区和市区低 4~5℃,山区优势种中的纹石蛾、高沟粗腹摇蚊等物种偏爱较冷而无污染的水域,郊区和市区优势种中的中华园田螺、铜锈环棱螺和小云多足摇蚊等均属于广布种,广泛分布于静水缓流水域^[39]。温度升高 0.9℃,流速缓慢或者静止的水域中大型底栖动物逐渐转向耐污种和广适种^[40]。

水体中氮、磷含量与大型底栖动物群落组成有较高的相关性。王备新等^[37]对常州地区太湖流域上游水系大型底栖无脊椎动物群落结构特征及其与环境的关系研究结果表明:TN 和 TP 对研究区大型底栖无脊椎动物群落结构的影响较大。CCA 结果也显示 TN 和 Chl-a 是影响郊区大型底栖动物群落结构的主要因素,寡毛纲和蛭纲与水体营养盐呈正相关, S9 摇蚊幼虫密度可达 1 200 ind. · m⁻²。根据调查,在郊区河流监测点 TN 和 TP 含量均明显高于山区和市区,一般会伴随水体富营养化。浮游植物在水体初级生产力中的比重逐渐增大,而水生植被则逐渐减少,甚至消失,直接降低生境多样性,限制了与水生植物密切相关底栖动物种类的生存^[41]。而寡毛类和摇蚊幼虫,对环境适应能力较强,替代腹足纲和双壳纲成为优势种,所以大型底栖动物对水体的富营养化有很好地响应。综合水质标识指数法计算结果表明:北京市河流水质空间分布呈现郊区水质劣于市区,市区水质劣于山区,与大型底栖动物群落结构的分布特质呈现良好的一致性。常作为清洁指示种的水生昆虫,主要分布在水质较好的山区河流;腹足纲主要分布在市区河流;而耐污性很强的寡毛纲和摇蚊属幼虫,主要分布在富营养化严重,氮磷浓度高的郊区河流。

3.3 人类活动强度与大型底栖动物空间格局关系

人类活动是影响北京山区和市区大型底栖动物群落结构的主要因子。河流生境空间异质性很大程度上决定了底栖动物群落结构空间异质性。底质类型、水生植被边坡状况、周围土地利用方式和人类活动影响等物理生境条件是影响大型底栖动物群落结构的重要因素^[42]。栖息地质量与蜉蝣目相对丰度、黏附者相对丰度呈正相关,城镇建设用地面积比例与软体动物相对丰度和寡毛类动物相对丰度呈正相关,河段尺度对底栖动物群落结构最为显著^[43]。典范应对分析结果发现,纹石蛾科、长角泥甲科、蚰科

和大蚊幼虫等 6 种清洁指示物种与人类活动强度呈正相关,且这些物种主要分布在山区监测点(S1~S2),特别是水生昆虫种类和密度与其他区域监测点相比均较高。山区海拔较高,林地比例大,人类活动对水体干扰较小,水质较好,适合 EPT 等类群栖息。

北京市区城市化程度极高,市区五环内监测点 S11~S20 受人为活动影响较大,栖息地质量评分中人类活动强度得分显著低于山区和市区,流域内河道渠道化程度高,原河床中石块、淤泥和大型木质残体基本被清除,替代为硬质河床,大部分大型底栖动物难以找到附着的底质,导致多样性降低,市区的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均低于山区和郊区。市区部分河道(S17~S20)水生植物较多,监测出 10 种腹足纲物种且相对密度均大于 90%。任海庆等^[44]的研究发现水生植物能显著影响大型底栖动物群落结构和空间分布, Kaenel 等^[45]研究了水生植物的管理对底栖无脊椎动物群落结构的影响,结果表明清除水生植物后,大型底栖动物的总数下降约 65%,因此建议水生植物只能在夏天清除,并将清除的植物放在河床上为大型底栖动物提供庇护场。市区河道由于城市景观需要,沉水植物生长良好,可以为腹足纲和双壳纲等软体动物提供食物和产卵场,提高溶解氧浓度,缓冲生物种群抵抗各种非生物扰动或生物间的相互作用^[31,32],因此市区监测点软体动物出现的物种数和相对密度远高于山区和郊区,这与戴奇等^[46]研究城市河道大型底栖动物群落的特征结果相同。

有研究表明显著影响河流大型底栖动物的主导环境因子具有明显空间尺度效应^[2],不同底质类型直接影响大型底栖动物群落结构^[47],本研究结果中,可能因为研究尺度的原因,底质异质性没有被筛选为显著影响因子。北京山区监测点底质异质性较高,郊区到市区底质异质性逐渐降低,市区多数监测点底质已人工硬化,郊区沙河和清河监测点河床淤泥较厚,因此寡毛纲和蛭纲等耐污种在郊区部分监测点占绝对优势,密度高达 143.21 ind. · m⁻² 和 24.69 ind. · m⁻²,且由远郊向近郊逐渐降低。淤泥、细沙和砂砾的稳定性较差,异质性低,淤泥底质为寡毛纲物种提供了充足食物来源,耐低氧的寡毛类物种往往是沉积生境中底栖生物的绝对优势种^[48]。

人类活动强度与河流水质、水文和河流生境等环境因素的影响是系统性和相耦合的^[2],河道变化、河岸植被多样性和周围土地利用方式等物理生境条件均会对大型底栖动物群落结构和分布产生影响^[42]。在生态系统中,每一个环境因子都不是独立

的发挥作用,人类活动强度对大型底栖动物的影响是一个非常复杂的过程,有待于进一步加强大型底栖动物群落结构对河流的人为干扰响应研究。

4 结论

(1)北京不同区域河流大型底栖动物种类组成空间差别较大,由市区向郊区、山区延伸,总物种数、单个断面平均物种数以及总体出现频率先增加后减少。

(2)北京不同区域河流大型底栖动物密度类群组成空间差异明显,山区河道水生昆虫平均密度最大,以更喜清洁水体的水生昆虫和具有清洁指示功能的摇蚊幼虫为主;郊区河道以耐污性强的和摇蚊幼虫和寡毛纲占优势;市区河道底栖动物群落结构单一,以腹足纲为主。

(3)TN 和 Chl-a 是影响郊区大型底栖动物群落结构的主要因素,人类活动强度和水温是影响市区和山区大型底栖动物群落结构的主要因素。

参考文献:

- [1] 陈利顶, 齐鑫, 季芬, 等. 城市化过程对河道系统的干扰与生态修复原则和方法[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(4): 805-811.
Chen L D, Qi X, Li F, *et al.* Disturbances of urbanization to river course system and related ecological restoration principles and approaches[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, **29**(4): 805-811.
- [2] 王强, 庞旭, 王志坚, 等. 城市化对河流大型底栖动物群落的影响研究进展[J]. 生态学报, 2017, **37**(18): 6275-6288.
Wang Q, Pang X, Wang Z J, *et al.* Advances in research on the influence of urbanization on stream benthic macroinvertebrate communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(18): 6275-6288.
- [3] Purcell A H, Bressler D W, Paul M J, *et al.* Assessment tools for urban catchments: developing biological indicators based on benthic macroinvertebrates[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, **45**(2): 306-319.
- [4] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
Duan X H, Wang Z Y, Xu M Z. Benthic macroinvertebrate and application in the assessment of stream ecology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [5] Morley S A, Karr J R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound basin [J]. Conservation Biology, 2002, **16**(6): 1498-1509.
- [6] 韩明利, 梁文明, 张元, 等. 龙子祠泉域底栖动物群落组成及水质生物学评价[J]. 水产学杂志, 2018, **31**(5): 34-40.
Han M L, Liang W M, Zhang Y, *et al.* Biological evaluation of water quality and community composition of zoobenthos in LongZiCi karst spring[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2018, **31**(5): 34-40.
- [7] Li F Q, Chung N, Bae M J, *et al.* Relationships between stream macroinvertebrates and environmental variables at multiple spatial scales[J]. Freshwater Biology, 2012, **57**(10): 2107-2124.
- [8] Johnson L B, Breneman D H, Richards C. Macroinvertebrate community structure and function associated with large wood in low gradient streams [J]. River Research and Applications, 2003, **19**(3): 199-218.
- [9] 蔡永久, 姜加虎, 张路, 等. 长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 811-819.
Cai Y J, Jiang J H, Zhang L, *et al.* Community structure and biodiversity of macrozoobenthos of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze river[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(6): 811-819.
- [10] 潘超, 周驰, 苗滕, 等. 长江流域鄂西四河流大型底栖动物群落结构特征及水质生物学评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(11): 2529-2539.
Pan C, Zhou C, Miao T, *et al.* Macrozoobenthic community structure and water quality bioassessment of four rivers in western Hubei Province, Yangtze River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(11): 2529-2539.
- [11] 王丑明, 张屹, 石慧华, 等. 洞庭湖大型底栖动物群落结构和水质评价[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 395-404.
Wang C M, Zhang Y, Shi H H, *et al.* Macrozoobenthic community structure and bioassessment of water quality in Lake Dongting, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 395-404.
- [12] 张亚, 丁森, 张远, 等. 太子河流域土地利用对大型底栖动物功能摄食类群的影响[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(9): 1527-1536.
Zhang Y, Ding S, Zhang Y, *et al.* Effects of land use on macroinvertebrate functional feeding groups in Taizi River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(9): 1527-1536.
- [13] 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 [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 94-106.
- [14] 胡涛, 魏开建, 张桂蓉, 等. 密云水库大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 水生态学杂志, 2018, **39**(4): 79-88.
Hu T, Wei K J, Zhang G R, *et al.* Macroinvertebrate communities and bioassessment of water quality in Miyun Reservoir, Beijing[J]. Journal of Hydroecology, 2018, **39**(4): 79-88.
- [15] 徐菲, 王永刚, 张楠, 等. 北京市白河和潮河流域生态健康评价[J]. 生态学报, 2017, **37**(3): 932-942.
Xu F, Wang Y G, Zhang N, *et al.* Health assessment of watershed ecosystems: the Chao river and Bai River Basins as a case study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(3): 932-942.
- [16] 顾晓昀, 徐宗学, 王汨, 等. 北运河水系底栖动物群落结构与水环境质量评价[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(6): 1444-1454.
GU X Y, Xu Z X, Wang M, *et al.* Macroinvertebrates community structure and water quality assessment in the North Canal River Basin, Beijing, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(6): 1444-1454.
- [17] 张宇航, 张敏, 张海萍, 等. 北京河流大型底栖动物空间格局及其环境响应研究[J]. 生态毒理学学报, 2018, **13**(4): 101-110.
Zhang Y H, Zhang M, Zhang H P, *et al.* Study on the spatial pattern of macroinvertebrate and their responses to environmental changes in Beijing rivers [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(4): 101-110.
- [18] 慕林青, 张海萍, 赵树旗, 等. 永定河底栖动物生物完整性

- 指数构建与健康评价[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(4): 697-707.
- Mu L Q, Zhang H P, Zhao S Q, *et al.* River health assessment of Yongding River based on benthic integrated biotic index[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(4): 697-707.
- [19] 陈向. 城市化对河流生态系统的影响研究-以北京市为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016. 13-19.
- [20] Shen Z Y, Hou X S, Li W, *et al.* Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, **123**: 96-107.
- [21] 穆晓东, 刘慧平, 薛晓娟. 基于遥感监测的北京 1984-2007 年城市扩展研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, **48**(1): 81-85.
- Mu X D, Liu H P, Xue X J. Urban growth in Beijing from 1984 to 2007 as gauged by remote sensing[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, **48**(1): 81-85.
- [22] 王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫[M]. 北京: 中国言实出版社, 2011.
- [23] 徐宗学, 殷旭旺. 渭河流域常见水生生物图谱[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [24] 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.
- [25] 郑丙辉, 张远, 李英博, 等. 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, *et al.* Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(6): 928-936.
- [26] 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 等. 北京北运河河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2756-2587.
- Gu X Y, Xu Z X, Liu L F, *et al.* Health assessment of the stream ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2756-2587.
- [27] 李科, 张萌, 刘雄军, 等. 陡水湖流域大型底栖动物群落结构及其环境影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(4): 939-949.
- Li K, Zhang M, Liu X J, *et al.* Community structure and environmental determinants of macrozoobenthos in the Doushui lake basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, **28**(4): 939-949.
- [28] 王珺博. 综合水质标识指数法(WQI)在永定河石景山段水质评价中的应用[J]. 环境与发展, 2017, **42**(2): 42-43.
- Wang J B. Application of comprehensive Water Quality Index Method (WQI) in water quality evaluation of Shijingshan Section of Yongding River[J]. Inner Mongolia Environmental Sciences, 2017, **42**(2): 42-43.
- [29] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(1): 218-226.
- Yin X W, Xu Z X, Gao X, *et al.* Macrozoobenthos community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(1): 218-226.
- [30] Walsh C J, Roy A H, Feminella J W, *et al.* The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2005, **24**(3): 706-723.
- [31] 金桂琴, 孙迪, 王培京, 等. 北运河流域水系综合治理开展中期评估[J]. 北京水务, 2014, (6): 49-50.
- [32] 宋劼, 赵娜, 李志威. 基于底栖动物的城市内河水生态状况评价—以圭塘河为例[J]. 中国农村水利水电, 2017, (11): 51-57.
- Song J, Zhao N, Li Z W, *et al.* Water ecological evaluation of urbanizing river based on macroinvertebrates: a case of the Guitang River in Changsha city[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (11): 51-57.
- [33] 耿世伟, 陈晨, 陈安, 等. 天津淡水生态系统大型底栖动物群落结构特征研究[J]. 环境科学与管理, 2019, **44**(7): 156-160.
- Geng S W, Chen C, Chen A, *et al.* Structure of macrobenthic community of freshwater ecosystem in Tianjin[J]. Environmental Science and Management, 2019, **44**(7): 156-160.
- [34] 陈小华, 高伟, 刘文亮, 等. 平原河网地区大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(8): 1310-1316.
- Chen X H, Gao W, Liu W L, *et al.* Characteristics of macrobenthos community structure and its relationship to environmental factors within a typical plain river network[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(8): 1310-1316.
- [35] 李朝, 蔡琨, 杜娟, 等. 徐州城市河流和湖泊的大型底栖动物群落结构及影响因子分析[J]. 生态科学, 2016, **35**(1): 61-66.
- Li Z, Cai K, Du J, *et al.* Characteristics of macrobenthic community structure and its relationship with environmental factors in the Xuzhou's urban river and urban lake[J]. Ecological Science, 2016, **35**(1): 61-66.
- [36] 相华, 郭伟, 谭璐, 等. 济南流域大型底栖动物群落生态分布及时空格局[J]. 河北渔业, 2018, (6): 30-34.
- Xiang H, Guo W, Tan L, *et al.* Ecological distribution and spatial-temporal patterns of benthic macroinvertebrate in Jinan, China[J]. Hebei Fisheries, 2018, (6): 30-34.
- [37] 王备新, 徐东炯, 杨莲芳, 等. 常州地区太湖流域上游水系大型底栖无脊椎动物群落结构特征及其与环境的关系[J]. 生态农村环境学报, 2007, **23**(2): 47-51.
- Wang B X, Xu D J, Yang L F, *et al.* Characteristics of benthic macroinvertebrates communities in relation to environment in upper reaches of the Taihu Lake watershed in Changzhou area, China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, **23**(2): 47-51.
- [38] Kwak T J, Naiman R J, Bilby R, *et al.* River ecology and management: lessons from the pacific coastal ecoregion[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2000, **81**(3): 882-883.
- [39] 张又, 程龙, 尹洪斌, 等. 巢湖流域不同水系大型底栖动物群落结构及影响因素[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 200-215.
- Zhang Y, Cheng L, Yin H B, *et al.* Benthic macroinvertebrate community structure and environmental determinants in river systems of Chaohu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(1): 200-215.
- [40] Flourey M, Usseglio-Polatera P, Ferreol M, *et al.* Global climate change in large European rivers: long-term effects on macroinvertebrate communities and potential local confounding factors[J]. Global Change Biology, 2013, **19**(4): 1085-1099.
- [41] Céréghino R, Ruggiero A, Marty P, *et al.* Influence of vegetation cover on the biological traits of pond invertebrate communities[J]. Annales de Limnologie-International Journal of Limnology, 2008, **44**(4): 267-274.
- [42] Maul J D, Farris J L, Milam C D, *et al.* The influence of stream habitat and water quality on macroinvertebrate communities in

- Degraded Streams of Northwest Mississippi [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **518**(1-3): 79-94.
- [43] 李艳利, 李艳粉, 李科. 不同尺度下人类活动对浑太河流域鱼类和大型底栖动物群落特征的影响[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(8): 1145-1153.
- Li Y L, Li Y F, Li K. Relative influence of anthropogenic stressors on fish and macroinvertebrate communities at different scales in Huntai rivers[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(8): 1145-1153.
- [44] 任海庆, 袁兴中, 刘红, 等. 环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(10): 3148-3156.
- Ren H Q, Yuan X Z, Liu H, *et al.* The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(10): 3148-3156.
- [45] Kaenel B R, Matthaei C D, Uehlinger U. Disturbance by aquatic plant management in streams: effects on benthic invertebrates [J]. *Regulated Rivers Research and Management*, 1998, **14**(4): 341-356.
- [46] 戴奇, 李双, 周忠良, 等. 上海城区河道底栖动物群落特征与沉积物重金属潜在生态风险[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(10): 1985-1992.
- Dai Q, Li S, Zhou Z L, *et al.* Characteristics of zoobenthos community and potential ecological risk of heavy metals in urban rivers in Shanghai [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(10): 1985-1992.
- [47] 赵永晶, 刘学勤. 巢湖水向湖滨带底栖动物群落结构研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(S2): 39-44.
- Zhao Y J, Liu X Q. Community structure of macrozoobenthos in the littoral zone of the Chaohu Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(S2): 39-44.
- [48] 张玉珍, 黄文丹, 王智苑, 等. 福建敖江流域水域生态系统健康评估[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(6): 1079-1086.
- Zhang Y Z, Huang W D, Wang Z Y, *et al.* Evaluation of aquatic ecosystem health in Aojiang Basin, Fujian Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(6): 1079-1086.



CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Han, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)