

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



2019

Vol.40 No.8
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM_{2.5}污染特征与浓度控制效果 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM_{2.5}和PM₁₀中元素组成特征及重污染成因分析 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 康宝荣, 刘立志, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO₄²⁻化学特征及来源 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N₂O产生特征 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发影响 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM_{2.5}毒性 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析

王海邻¹, 刘玉飞^{1,2}, 任玉芬^{2*}, 贺玉晓^{1*}, 王思琪², 张红星², 王效科², 李紫鑫¹

(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)

摘要: 为了解北京市河流浮游动物群落空间分布特征及其与水环境因子之间的关系, 于2017年9月采集了北京市28个水体的81个断面的样品, 鉴定出浮游动物4类68种, 其中原生动物17种占25%, 轮虫36种占53%, 枝角类13种占19%, 桡足类占3%, 主要是桡足幼体和无节幼体. 15种优势种中12种主要来自于轮虫和桡足类. 山区河流浮游动物以原生动物和桡足类为主, 城郊结合区以桡足类为主, 城区以轮虫为主. 综合水质标识指数法、Shannon - Wiener指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数计算结果表明, 山区河流水质总体上优于城区, 城市水质优于城郊结合区; 采用单因子水质标识指数法识别出水体主要污染因子为总氮. 通过主成分分析(PCA)和典范对应分析(CCA)后发现, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 BOD_5 和COD等对浮游动物特征影响较大.

关键词: 北京; 河流; 浮游动物; 群落结构; 水质

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3568-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201811156

Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing

WANG Hai-lin¹, LIU Yu-fei^{1,2}, REN Yu-fen^{2*}, HE Yu-xiao^{1*}, WANG Si-qi², ZHANG Hong-xing², WANG Xiao-ke², LI Zi-xin¹

(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)

Abstract: To clarify the spatial distribution characteristics of zooplankton communities and the relationship between zooplankton and water environmental factors, 81 samples from 28 rivers and lakes in Beijing were collected in September 2017. A total of 68 species of zooplankton were identified, including 17 species of protozoa (25%), 36 species of rotifers (53%), 13 species of cladocera (19%), and copepods (3%, which were mainly copepodids and nauplii). Among 15 dominant species, 12 were copepods and rotifers. Zooplankton communities varied between the different rivers. The zooplankton in rivers in mountainous areas were mainly protozoa and copepods; in suburban areas, communities were dominated by copepods; and in urban areas, rotifers were dominant. A comprehensive water quality index, the Shannon-Wiener index, the Pielou evenness index, and the Margalef richness index were also calculated. Results showed that the water quality of the rivers in mountainous areas was generally better than in urban areas, which was better than in suburban areas. TN was found to be the main form of pollution using the single factor water quality index. Principal component analysis (PCA) and canonical correspondence analysis (CCA) identified that $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, BOD_5 , and COD had a significant effect on zooplankton community characteristics.

Key words: Beijing; river; zooplankton; community structure; water quality

浮游动物是水生生态系统中重要的生物组成部分, 作为初级消费者具有个体小、数量多、代谢旺盛、对环境变化敏感等特点, 是联系初级生产者 and 高级消费者承上启下的重要一环^[1]. 影响浮游动物群落结构的因素包括非生物因素和生物因素, 非生物因素如营养盐(氮、磷等)、光照、温度、流速和人类活动等, 生物因素如寄生和捕食与竞争等. 由于空间环境差异性以及生物之间相互作用的复杂性, 影响浮游生物群落的主导因子在不同水体中也是存在差异^[2, 3]. 此外浮游动物不同特征在不同生境中的不同响应, 其群落特征能客观反映水域生态系统质量状况^[4~6], 分析浮游动物群落特征有助于对水质状况做出准确评估, 同时也能弥补理化监测评价部分不足.

河流是城市景观重要组成部分, 对缓解城市热岛效应、维持城市生物多样性、城市给排水有着十分重要的作用^[7, 8]. 人类活动干扰对城市河流水质、水生生物种类组成、分布特征等产生重要影响^[9], 目前针对水生生物尤其是浮游动物的研究主要集中于水量充沛的南方地区以及东北高纬度地区^[10~18], 海河流域河流浮游动物研究相对较少, 对北京地区河流浮游动物特征研究也限于城区的部

收稿日期: 2018-11-20; 修订日期: 2019-03-05

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: 王海邻(1971~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为城市水生态及水环境, E-mail: whl@hpu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yfren@rcees.ac.cn; heyuxiao@hpu.edu.cn

分河段或者单个流域^[8, 19~21], 对城市整体河流研究鲜见报道. 通过对北京市河流水体中浮游动物分布特征以及影响因素研究, 分析浮游动物群落空间特征及其与环境因子之间的关系, 以期北京市河流水质监测与评价提供基础数据, 对北京市河流水质保护及水生生态系统恢复具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市位于华北平原北部, 西北高, 东南低, 山区面积约占总面积的 62%, 平原区面积约占总面积的 38%. 北京市为典型的北温带半湿润大陆性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 春、秋短促. 北京市天然河道自西向东贯穿五大水系, 分别为拒马河水系、永定河水系、北运河水系、潮白河水系和蓟运河水系. 多由西北部山地发源, 向东南蜿蜒流经平原地区, 最后分别在海河汇入渤海(蓟运河除外).

1.2 采样点选择和采样时间

采样点涵盖饮用水水源区、工业用水区、农业用水区和景观娱乐用水区, 共 28 个采样点, 81 个采样断面(每个采样点设置 3 个采样断面, 长度小于 2 km 且生境相似的水体设置 2 个断面)(图 1). 28 个采样点分山区水体(S1~S2)、城郊结合区水体(S3~S21)和城区水体(S22~S28). 具体河流采样点名称和编号如下: 碓石口沟(S1)、白马关河(S2)、平谷新城汝河(S3)、东沙河(S4)、怀河(S5)、牯牛河(S6)、小中河(S7)、顺义城区潮白河(S8)、城北减河(S9)、七分干渠(S10)、月牙河(S11)、北运河通州城市段(S12)、萧太后河改线段

(S13)、萧太后河马家湾蓄洪区(S14)、小清河(S15)、哑叭河(S16)、刺猬河(S17)、黑河沟(S18)、门城湖(S19)、龙泉湾河(S20)、东埠头河(S21)、龙形水系(S22)、朝阳区亮马河(S23)、北护城河(S24)、故宫外筒子河(S25)、三里河(S26)、南护城河(S27)和马草河(S28). 样品采集和分析时间为 2017 年 9~10 月.

1.3 样品采集及分析方法

1.3.1 浮游动物水样采集与鉴定

使用采水器采集混合水样 50 L, 用 25 号浮游生物网过滤, 将滤取的样本放入 100 mL 标本瓶中, 加入体积分数为 4%~5% 的甲醛溶液固定^[22]. 固定后的样本在室内静置 48 h 后虹吸上清液, 浓缩至 30 mL. 鉴定时混匀沉淀后的样品, 在 100~400 倍光学显微镜(Olympus-CX21)下使用 1 mL 计数板鉴定浮游动物种类、体数量, 换算成密度, 生物量根据浮游动物体积计算^[23~25].

1.3.2 环境因子水样采集与测定

水温(T)、pH、电导率(COND)、溶解氧(DO)和浊度(NTU)使用便携式 YSI 水质测定仪现场测量, 透明度(SD)使用赛氏盘测量. 采集混合水样 1 L, 48 h 内带回实验室. 参照文献^[26]测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^-)、五日生化需氧量(BOD_5)、化学需氧量(COD)、氯离子(Cl^-)和硫酸根离子(SO_4^{2-}).

1.4 数据处理方法

优势种根据物种的出现频率及个体数量来确定, 用优势度表示:

$$Y = f_i \times P_i \quad (1)$$

式中, Y 是优势度, f_i 是第 i 物种的出现频率, P_i 是

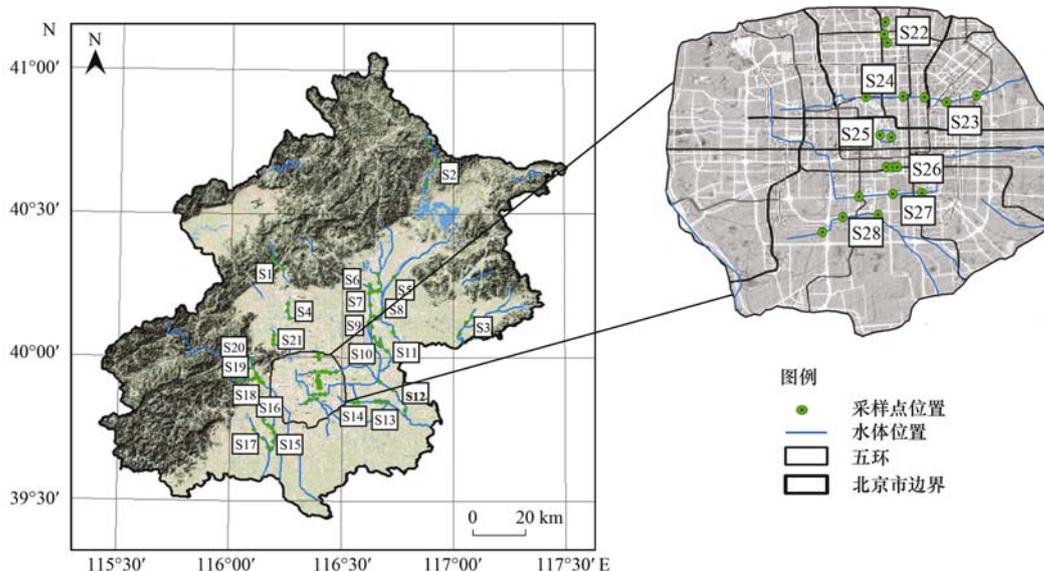


图 1 监测点位示意

Fig. 1 Locations of the monitoring sites

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.

Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Pielou 均匀度指数 (J) 和 Margalef 丰富度指数 (M)^[27] 计算均通过 BioDiversity Pro 2.0 软件包完成. 水环境质量评价采用综合水质标识指数法 (I_{wq})^[28~30]. 数据统计分析使用 SPSS 19.0 软件包完成, 图件绘制采用 Origin 8.0 软件包完成, 浮游动物群落与环境因子进行主成分分析 (PCA) 和典范对应分析 (CCA) 使用 Canoco for Windows 4.5 软件包完成.

2 结果与分析

2.1 浮游动物群落特征

28 个采样点共鉴定出浮游动物 4 类 68 种, 均为淡水河流常见种, 其中原生动物 17 种占 25%, 轮虫 36 种占 53%, 枝角类 13 种占 19%, 桡足类占 3%, 主要是桡足幼体和无节幼体. 城区及城郊结合区水体中以轮虫为主, 臂尾轮虫属、龟甲轮虫属种类占据优势; 山区水体中原生动物、轮虫、桡足类均有

检出, 物种种类为山区 < 城区 < 城郊结合区. 优势种在山区以原生动物、桡足类为主, 在城郊结合区以桡足类为主, 在城区以轮虫为主 (见表 1). 28 个采样点中, 未出现枝角类的优势种, 在北运河城市段 (S12)、萧太后河该线段 (S13)、黑河沟 (S18)、亮马河 (S23) 和马草河 (S28) 未检出枝角类.

各采样点生物量及密度空间分布如图 2 所示, 从中可知浮游动物密度、生物量及物种组成呈现城郊结合区水体 (S3 ~ S21) > 城区水体 (S22 ~ S28) > 山区水体 (S1 ~ S2) 的空间分布特征. 浮游动物中桡足类密度最大, 达到 $398.2 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中平谷新城汝河 (S3) 贡献了 40.2%, 其次为轮虫 $374.6 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$, 原生动物为 $54.2 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$, 枝角类最小 $33.2 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$. 浮游动物密度和生物量最大值出现在平谷新城汝河 (S3), 分别为 $203.2 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1633 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 最小出现在昌平碓石口 (S1) 采样点, 分别为 $1.7 \text{ ind.} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Margalef 丰富度指数 (M)、Pielou 均匀度指数 (J) 计算结

表 1 水体间浮游动物优势种¹⁾

Table 1 Dominant species of zooplankton in different waters

优势种	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28
原生动物																												
普通表壳虫 <i>Arcella vulgaris</i>		+			+																+							
长圆砂壳虫 <i>Diffugia oblonga</i>		+																										
球形砂壳虫 <i>Diffugia globulosa</i>		+																										
轮虫																												
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>												+		+							+			+				+
壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>																									+			+
剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>																												+
裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>							+																					+
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>																								+				
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>																												+
囊形单趾轮虫 <i>Monostyla bulla</i>																												
罗氏异尾轮虫 <i>Trichocerca rousseleti</i>																												
盘状鞍甲轮虫 <i>Lepadella patella</i>																												+
椎尾水轮虫 <i>Epiphanes senta</i>																												+
桡足类																												
无节幼体 <i>Nauplii</i>					+		+			+	+			+	+						+	+	+					
桡足幼体 <i>Copepodid</i>				+			+	+	+	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

1) “+” 表示该物种在该河段为优势种

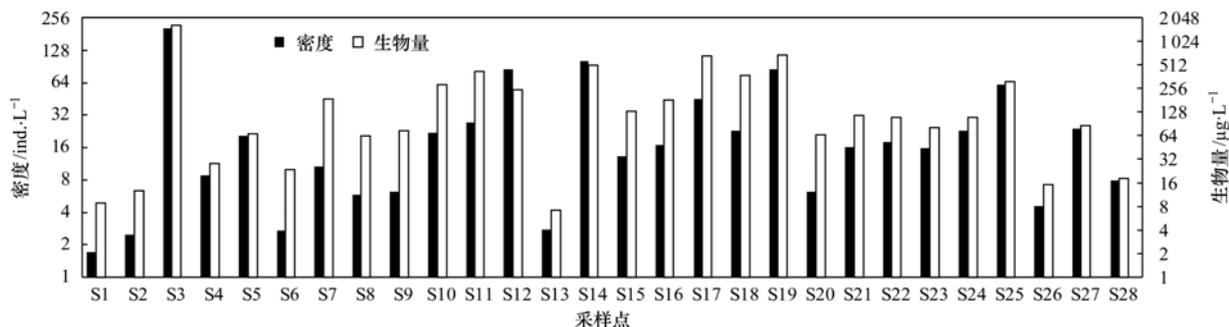


图 2 各采样点浮游动物平均密度与生物量

Fig. 2 Average density and biomass of zooplankton for the different sampling sites

果分别介于 1.21 ~ 3.71、1.3 ~ 9.8 和 0.37 ~ 0.96 之间(图 3), 均呈现山区(S1 ~ S2) > 城区(S22 ~ S28) > 城郊结合区(S3 ~ S21). 28 个采样点中, Shannon-Wiener 多样性指数平均值为 2.54, 根据 Shannon-Wiener 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 β -中污染和轻污染之间. 结合均匀性指数和丰富度指数计算结果可知, 采样点 S7、S11、S12 和 S18 相比于北京市其他采样点, 水质状况相对较差, 水体环境更应受到相关管理部门重视.

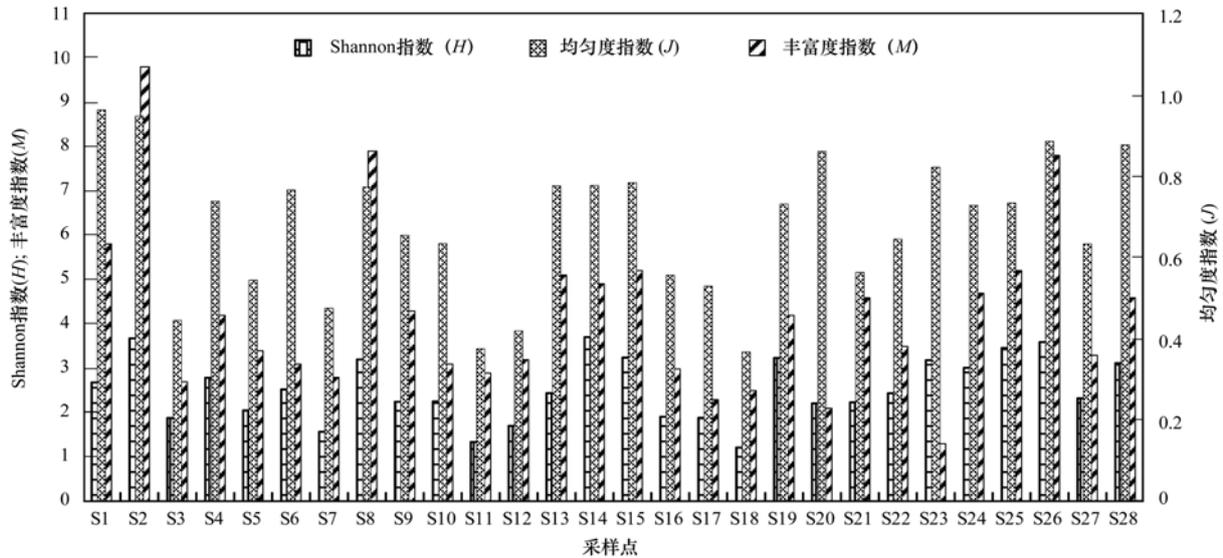


图 3 各采样点浮游动物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数

Fig. 3 Diversity index, evenness index, and richness index of zooplankton at the different sampling sites

2.2 水环境质量评价

水环境质量评价采用综合水质标识指数法, 结

果如表 2 所示. 北京市水体综合水质标识指数 $I_{wq} = 3.4$, 为 III 类水质. 其中: 山区 2.8, 为 II 类水质; 城

表 2 综合水质标识指数法水质评价结果¹⁾

Table 2 Evaluation results of water quality using the comprehensive water quality index method

采样点	单因子水质标识指数							水体功能类别	综合水质标识指数
	DO	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	COD	F ⁻		
S1	4.22	1.00	1.60	8.16	2.80	1.20	1.90	II	2.920
S2	2.70	1.70	1.00	7.75	3.31	1.30	1.10	II	2.720
S3	2.20	4.50	3.70	6.61	4.90	4.60	1.20	V	3.910
S4	5.81	1.10	1.60	12.38	6.32	1.80	1.30	IV	4.330
S5	2.40	4.51	1.80	7.34	3.50	4.91	1.30	III	3.730
S6	4.01	1.50	1.00	4.31	3.70	1.30	1.10	III	2.420
S7	5.50	1.60	6.91	8.03	6.61	4.50	1.50	V	4.930
S8	4.01	1.90	2.90	6.83	4.51	4.41	1.40	III	3.740
S9	4.10	1.60	2.40	6.53	3.70	3.20	1.40	IV	3.210
S10	4.41	3.40	4.51	6.63	5.92	6.23	1.50	III	4.751
S11	4.41	3.60	7.94	6.83	6.33	5.02	1.50	III	5.152
S12	—	—	3.50	6.81	6.11	6.31	1.30	V	4.830
S13	3.90	1.70	2.70	9.04	5.30	3.60	1.30	V	3.910
S14	—	—	1.70	8.13	3.90	6.01	1.30	V	4.220
S15	—	—	3.90	9.65	6.82	6.42	1.30	IV	5.631
S16	2.70	4.80	2.10	7.32	4.80	5.10	1.20	V	4.020
S17	4.51	3.30	4.71	7.14	5.62	5.72	1.20	III	4.651
S18	3.90	1.20	1.40	2.10	2.10	1.40	1.20	III	1.900
S19	—	—	3.30	6.73	6.23	6.23	1.50	III	4.831
S20	2.70	1.60	1.70	4.71	2.20	1.80	1.90	III	2.310
S21	4.60	1.70	2.10	7.43	3.40	1.90	1.80	IV	3.210
S22	4.21	1.50	1.60	5.12	3.80	1.90	1.30	III	2.720
S23	4.40	1.60	2.30	7.43	4.10	1.90	1.30	IV	3.210
S24	2.90	1.90	1.10	7.53	3.90	1.70	1.40	IV	2.910
S25	3.20	3.20	1.90	3.90	3.60	4.60	1.40	IV	3.100
S26	3.30	1.70	1.80	6.50	3.70	1.40	1.20	—	2.800
S27	2.80	3.60	1.00	9.35	3.60	6.32	1.20	IV	3.920
S28	4.00	3.90	4.20	7.03	6.22	4.90	1.20	IV	4.520

1) “—”表示数据缺失

郊结合区 4.0, 为 IV 水质; 城区为 3.3, 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原理^[27-29], 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. 28 个采样点中, S4 最为突出, TN 劣于功能区 8 个类别. 山区河流水环境影响因子是 TN, 两个采样点均劣于功能区 5 个级别以上; 影响城郊结合区河流水环境因子为 TN、TP、NH₄⁺-N 和 COD, 城区河流水体绝大部满足水功能区要求. 总体上, 北京市河流水体水质空间分布呈现山区优于城区, 城区优于城郊结合区.

2.3 浮游动物群落结构与环境因子的关系

采样点水环境因子 PCA 分析结果表明, 28 个采样点水环境存在明显差异(图 4). 在浮游动物群落结构中起主要影响作用的环境因子包括 NTU、TP、NH₄⁺-N、BOD₅、COD、F⁻ 和 Cl⁻. 依据 PCA 分析结果, 对这 7 个环境因子和浮游动物优势种群落进行 CCA 分析, 结果如图 5 所示. 第一排序轴特征值 λ = 0.40, 物种与环境因子相关系数为 0.89; 第二排序轴 λ = 0.21, 物种与环境因子相关系数为 0.82, 表明排序能够较好地反映浮游动物与水环境因子间的相互关系. BOD₅、COD 和 Cl⁻ 是第一排序轴的重要影响因子, BOD₅ 和 COD 与第一排序轴相关性较大, 与大多数优势种密度呈显著负相关(P < 0.05), 相关系数分别为 -0.62 和 -0.69; 其他因子的相关性较小(NTU: 0.25、TP: -0.28、NH₄⁺-N: 0.16、F⁻: -0.06、Cl⁻: -0.49). 与第二排序轴显著相关的水环境因子为 NH₄⁺-N, 相关系数为 -0.56, 与大多数优势种密度呈显著负相关(P < 0.05), 其他因子的相关性较小(NTU: -0.20、TP: -0.50、BOD₅: -0.07、COD: -0.25、F⁻: -0.05、

Cl⁻: 0.19). 因此, 影响北京市河流浮游动物群落结构主要环境因子为 NH₄⁺-N、BOD₅ 和 COD, 均呈现负相关关系, 即大多数浮游动物优势种密度随着 NH₄⁺-N、BOD₅ 和 COD 浓度升高而降低.

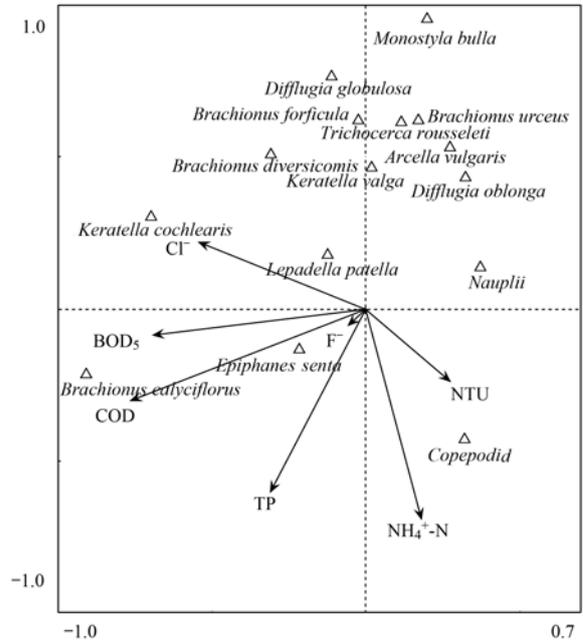


图 5 水体间浮游动物与环境因子 CCA 排序

Fig. 5 CCA sorting diagram of zooplankton and environmental factors

3 讨论

3.1 浮游动物群落特征分析

北京市浮游动物密度及生物量主要取决于轮虫和桡足类, 对浮游动物总密度和生物量起决定性作用. 28 个采样点浮游动物物种组成大多以轮虫为主, 与大多数亚热带水体中浮游动物物种组成结构相似, 这是由河流浮游动物组成的特异性决定的^[31, 32]. 常见的轮虫为雌体, 且这种雌体通常以孤雌生殖繁衍其后代, 具有个体小、周期短、发育快等特点, 能快速适应河流中理化环境的改变和水文条件的变化, 因此在河流生境中轮虫常居优势地位^[33, 34].

一般而言, 优势种类数及其丰度对群落结构的稳定性有重要作用, 且优势种类越多, 优势度越小, 群落结构越稳定. 此次调查发现, 城区水体(S22 ~ S28)优势种多为臂尾轮虫属、龟甲轮虫属, 为富营养水体指示物种^[35-37], 表明城区水体氮磷含量较高. 城郊结合区和山区水体中(S3 ~ S21), 优势种类则以桡足类为主, 桡足类可以在各种生态系统中存活, 也是高盐度富营养水体中最丰富的群体^[38, 39]. 山区水体(S1 ~ S2)优势种为表壳虫、砂壳虫等贫营养水体指示生物. 造成这种空间分布特征的原因主要是城区及城郊结合区周边土地利用和

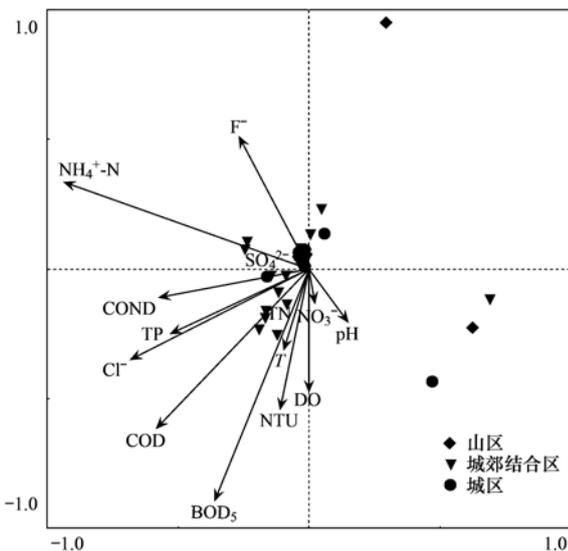


图 4 水体间环境因子 PCA 排序

Fig. 4 PCA sequence diagram of water environmental factors

土地覆盖类型不同,城区和城郊结合区受人类活动干扰强烈,人口密度大,河流易受到污染^[40].

与前人研究结果比较后发现,2009年后浮游动物

多样性指数小于此次调查结果(表3),北京市水体浮游动物多样性指数在升高,从浮游动物多样性指数变化来看北京市水体水质整体在改善.

表3 相关研究与本次研究结果对比¹⁾

Table 3 Comparison of results between existing research and this study

研究区域	调查年份	物种数	密度	生物量	多样性指数	文献
白河	2004~2006	大于	大于	大于	大于	[20]
温榆河	2004~2006	大于	大于	大于	大于	[20]
北运河	2009~2010	大于	大于	大于	小于	[21]
北运河	2015	大于	大于	大于	小于	[31]
温榆河	2010~2011	—	—	—	小于	[19]

1)“—”表示数据缺失

3.2 水质空间分布影响因素分析

水体综合水质标识指数及浮游动物多样性指数均显示城郊结合区水体水质(S3~S21)劣于城区水体(S22~S28)和劣于山区水体(S1~S2). Villegas等^[9]的研究发现,政府河湖管理策略对水体中浮游动物特征起到重要影响.城市发展过程中配套设施逐步完善,点源污染逐渐得到控制,非点源污染逐渐成为城市水体中主要污染源^[41~43].在城郊结合区河流中,由于监管盲区及水处理措施不到位,生活污水排放,导致其水体水质部分劣于水体功能区类别^[44~46].

3.3 浮游动物群落影响因素分析

水环境质量决定生物种群的群落结构特征,而生物密度和生物量变化客观反映出水质变化规律^[47].对浮游动物群落与水环境因子进行主成分分析(PCA)和典范对应分析(CCA)发现,北京市水体中浮游动物优势种与 NH_4^+-N 、COD和 BOD_5 等密切相关.水体氮、磷决定着浮游植物含量高低,也就间接决定着浮游动物数量的多寡^[48,49].28个水体中轮虫数量与 NH_4^+-N 浓度呈显著负相关,而桡足类与 NH_4^+-N 呈正相关关系,而 NH_4^+-N 含量指示水体营养盐水平^[50],由于过高的营养盐会抑制以浮游藻类为食的浮游动物物种及生物量^[51],轮虫主要以浮游藻类、细菌和腐殖质为食^[52],因此在城郊结合区优势种为桡足类.桡足类在能量和物质流动和生物地球化学循环中起重要作用^[53],能够应对各种环境变化^[54,55],这种能力使它们能够在各种极端环境中得以生存,因此在山区相对清洁的水体呈现原生动物和桡足类为优势种.研究发现,北京市河流营养盐含量呈现城郊结合区>城区>山区的分布特征,与浮游动物密度、生物量、多样性指数、综合水质标识指数分布特征一致.营养盐不仅能通过影响浮游植物生长来影响浮游动物,而且通过渗透和离子调节机制影响浮游动物生长繁殖^[56],这

一点在营养盐水平过高的中小河(S7)、月牙河(S11)水体中浮游动物特征及生物多样性分析结果得到体现.

CCA分析表明, BOD_5 和COD在一定程度上与城区的臂尾轮虫和龟甲轮虫优势群落呈负相关.COD可以间接反映水体富营养化程度^[57],研究中发现水体COD浓度呈现城郊结合区水体>城区水体>山区水体的分布特征. BOD_5 浓度较小,没有明显的分布特征.COD浓度整体上反映水体中有机质水平,而BOD则反映水体中有机质能被生物利用的部分^[58].Ning等^[59]对两条互不干扰河流,一条人为干扰河流,另一条自然河流研究后发现,受人为干扰的河流会因水体缺氧导致水体黑臭,浮游动物受到抑制.山区水体生境趋近自然,岸边基本被森林覆盖,林地通过过滤、吸收等作用将地表径流中的营养物截留,同时岸边大量植物根部的微生物通过矿化、转化等作用降低了水体离子及营养物浓度^[60,61],有效地保护了水体水质.如此同时,水体中营养物质缺乏也影响了水体中浮游动物的数量.城区及城郊结合区河流,河道边坡硬质化,切断了河流与河岸土壤中水分及营养物之间的交换^[62,63].同时,由于城市地表径流、污水管网泄漏,以及部分未经处理的城市污水携带污染物进入河道中,引起城市水体水质恶化,并对浮游动物产生影响^[64],这种影响在水体污染相对较轻时有利于浮游动物的生长繁殖,随着污染加重,变为不利于浮游生物生长繁殖,但具体的分界线或者说阈值是多少,目前仍不清楚,需要进一步研究.北京市河流水体水质大部分都能达到水体功能区要求,少量不符合水功能区要求的水体污染也相对较轻,因此城郊结合区河流水体浮游动物数量较高,而山区河流水体浮游动物数量较低.

4 结论

(1)北京市28个采样点共鉴定出浮游动物4

类 68 种, 其中原生动物 17 种占 25%, 轮虫 36 种占 53%, 枝角类 13 种占 19%, 桡足类鉴定出桡足幼体和无节幼体, 15 种优势种主要来自于轮虫和桡足类, 在山区以原生动物和桡足类为主, 在城郊结合区以桡足类为主, 在城区以轮虫为主。 NH_4^+-N 、 BOD_5 和 COD 是影响浮游动物特征的主要水环境因子。

(2) 北京市大部分水体处于 β -中污染 ~ 轻度污染之间, 水环境质量呈现山区水体优于城区水体优于城郊结合区水体的分布特征, 影响北京市水体的主要污染因子为 TN。

参考文献:

- [1] Ger K A, Urrutia-Cordero P, Frost P C, *et al.* The interaction between cyanobacteria and zooplankton in a more eutrophic world [J]. *Harmful Algae*, 2016, **54**: 128-144.
- [2] Šorš M, Davidson T A, Brucet S, *et al.* Zooplankton response to climate warming: a mesocosm experiment at contrasting temperatures and nutrient levels [J]. *Hydrobiologia*, 2015, **742** (1): 185-203.
- [3] 王松波, 余俊爽, 曹艳敏, 等. 光照和营养盐对浮游动物和浮游植物生物量及其营养联系的影响 [J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(6): 1122-1127.
- Wang S B, Yu J S, Cao Y M, *et al.* Light and nutrients as determinants of zooplankton and phytoplankton biomass and their impacts on pelagic trophic linkage [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(6): 1122-1127.
- [4] Bonecker C C, Simões N R, Minte-Vera C V, *et al.* Temporal changes in zooplankton species diversity in response to environmental changes in an alluvial valley [J]. *Limnologia*, 2013, **43**(2): 114-121.
- [5] 刘歆璞, 王丽卿, 张宁, 等. 青草沙水库后生浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *生态学杂志*, 2013, **32** (5): 1238-1248.
- Liu X P, Wang L Q, Zhang N, *et al.* Community structure of metazoan zooplankton and its relationships with environmental factors in Qingcaosha Reservoir of Shanghai, East China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1238-1248.
- [6] 王文侠, 陈非洲, 谷孝鸿. 南京市 5 座中型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *湖泊科学*, 2017, **29** (1): 216-223.
- Wang W X, Chen F Z, Gu X H. Community structures of zooplankton and its relation to environmental factors in five medium reservoirs in Nanjing City [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(1): 216-223.
- [7] 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.
- [8] 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): 2576-2587.
- 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): 2576-2587.
- [9] Villegas P P, Caiola N, Ibáñez C. Water management alters phytoplankton and zooplankton communities in Ebro delta coastal lagoons [J]. *Limnologia*, 2017, **36**(1): 113-126.
- [10] 方艳红, 黄道明, 王文君, 等. 大渡河河口秋季浮游动物的群落结构特征 [J]. *水生态学杂志*, 2012, **33**(3): 34-40.
- Fang Y H, Huang D M, Wang W J, *et al.* Characteristics of community structure of zooplankton in autumn at estuary of Dadu River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(3): 34-40.
- [11] 高原, 赖子尼, 李捷, 等. 连江浮游动物多样性的空间分布 [J]. *生物多样性*, 2013, **21**(6): 699-708.
- Gao Y, Lai Z N, Li J, *et al.* Spatial pattern of zooplankton diversity in Lianjiang River, Guangdong Province, China [J]. *Biodiversity Science*, 2013, **21**(6): 699-708.
- [12] 高原, 赖子尼, 杨婉玲, 等. 2014 ~ 2015 年珠江春季禁渔前后浮游动物群落变化 [J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(9): 1562-1569.
- Gao Y, Lai Z N, Yang W L, *et al.* Changes of zooplankton community before and after the spring closed season in the Pearl River in 2014-2015 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(9): 1562-1569.
- [13] 鞠永富, 于洪贤, 于婷, 等. 松花江哈尔滨段浮游动物群落结构特征与水质评价 [J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(3): 646-653.
- Ju Y F, Yu H X, Yu T, *et al.* Zooplankton community structure characters and water quality assessment in Harbin section of Songhua River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(3): 646-653.
- [14] 彭秋志, 廖剑宇, 伍凯, 等. 东江支流夏季小型浮游动物群落特征研究 [J]. *资源科学*, 2013, **35**(3): 481-487.
- Peng Q Z, Liao J Y, Wu K, *et al.* Aestival characteristics of small zooplankton communities in the main tributaries of the Dongjiang River [J]. *Resources Science*, 2013, **35**(3): 481-487.
- [15] 王璐璐, 董芳, 李芳芳, 等. 大辽河水系夏季后生浮游动物群落结构及水生态评价 [J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(2): 389-395.
- Wang L L, Dong F, Li F F, *et al.* Metazoan zooplankton community structure and aquatic ecology of Daliaohe River, North China in summer [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32** (2): 389-395.
- [16] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征 [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 932-940.
- Wu L, Li Y L, Chen Y S. Characteristics of community structures of zooplankton in the mainstream of Huaihe River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 932-940.
- [17] 叶又茵, 王雨, 林茂. 九龙江河口浮游动物的群落结构和时空变动 [J]. *生态科学*, 2013, **32**(4): 408-419.
- Ye Y Y, Wang Y, Lin M. Community structure and spatial-temporal variation of zooplankton in Jiulongjiang Estuary of Xiamen, China [J]. *Ecological Science*, 2013, **32**(4): 408-419.
- [18] 郑金秀, 池仕运, 李聃, 等. 三峡水库运行期间原生动物群落的时空异质性 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(11): 3569-3579.
- Zheng J X, Chi S Y, Li D, *et al.* Spatio-temporal heterogeneity of protozoan communities during the period of Three Gorges Reservoir operation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(11): 3569-3579.
- [19] 曾阳, 苗明升, 付秀娥, 等. 温榆河浮游动物多样性及水质改善效果评价 [J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(3): 200-205.
- Zeng Y, Miao M S, Fu X E, *et al.* Evaluation of water quality improvement in Wenyuhe River based on the analysis of diversity of macro-zooplankton [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(3): 200-205.
- [20] 李莉娜, 陈卫, 高思佳, 等. 北京白河与温榆河浮游动物调

- 查[J]. 四川动物, 2008, **27**(5): 802-804.
- Li L N, Chen W, Gao S J, *et al.* Zooplankton investigation in Baihe River and Wenyuhe River of Beijing[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2008, **27**(5): 802-804.
- [21] 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]. 生态学报, 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.
- [22] 孟伟, 张远, 渠晓东, 等. 河流生态调查技术方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [23] 韩茂森. 淡水浮游生物图谱[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
- [24] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [25] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [26] 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.
- [27] 李共国, 包薇红, 徐石林, 等. 甬江干流浮游动物群落结构季节动态与水环境的关系[J]. 水生生物学报, 2015, **39**(1): 1-12.
- Li G G, Bao W H, Xu S L, *et al.* Seasonal change of zooplankton communities and its relationship with aquatic environments in the Yongjiang River, Ningbo [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, **39**(1): 1-12.
- [28] 胡成, 苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(1): 186-192.
- Hu C, Su D. Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hun River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(1): 186-192.
- [29] 李名升, 张建辉, 梁念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展, 2012, **31**(5): 617-624.
- Li M S, Zhang J H, Liang N, *et al.* Comparisons of some common methods for water environmental quality assessment[J]. Progress in Geography, 2012, **31**(5): 617-624.
- [30] 张欢, 纪桂霞. 综合水质标识指数法在公园湖泊水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, **23**(2): 146-150.
- Zhang H, Ji G X. Application of comprehensive water quality identification index method to water quality assessment of park lakes[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, **23**(2): 146-150.
- [31] 李志伟, 崔力拓. 环境因子对唐山湾海域浮游动物群落结构的驱动作用[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(11): 3797-3804.
- Li Z W, Cui L T. Environmental control of zooplankton community structure in Tangshan Bay, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(11): 3797-3804.
- [32] 徐杭英, 于海燕, 韩明春, 等. 浙江饮用水源地浮游动物群落特征及环境响应[J]. 生态学报, 2015, **35**(21): 7219-7228.
- Xu H Y, Yu H Y, Han M C, *et al.* Characteristics of the zooplankton community and their association with environmental factors in drinking water sources, Zhejiang Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(21): 7219-7228.
- [33] 吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 619-625.
- Wu L, Feng W S, Zhang T L, *et al.* The annual fluctuation of zooplankton community and its relation with environmental factors in Lake Xiliang, Hubei Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(4): 619-625.
- [34] Gabaldón C, Devetter M, Hejzlar J, *et al.* Repeated flood disturbance enhances rotifer dominance and diversity in a zooplankton community of a small dammed mountain pond[J]. Journal of Limnology, 2017, **76**(2): 292-304.
- [35] 许宝红, 肖调义, 金红春, 等. 利用浮游动物评价不同类型养殖水体营养状况[J]. 淡水渔业, 2011, **41**(1): 10-15.
- Xu B H, Xiao T Y, Jin H C, *et al.* Nutrition evaluation of different aquatic water by zooplankton[J]. Freshwater Fisheries, 2011, **41**(1): 10-15.
- [36] 罗梅, 赵龙飞, 郑月, 等. 城市景观河道营养状况与轮虫群落结构[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(9): 4994-5000.
- Luo M, Zhao L F, Zheng Y, *et al.* Nutritional status and community structure of rotifer in the riverway of urban landscape [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(9): 4994-5000.
- [37] Lopes P M, Bozelli R, Bini L M, *et al.* Contributions of airborne dispersal and dormant propagule recruitment to the assembly of rotifer and crustacean zooplankton communities in temporary ponds[J]. Freshwater Biology, 2016, **61**(5): 658-669.
- [38] Khemakhem H, Elloumi J, Moussa M, *et al.* The concept of ecological succession applied to phytoplankton over four consecutive years in five ponds featuring a salinity gradient [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, **88**(1): 33-44.
- [39] Horváth Z, Vad C F, Tóth A, *et al.* Opposing patterns of zooplankton diversity and functioning along a natural stress gradient: when the going gets tough, the tough get going [J]. Oikos, 2014, **123**(4): 461-471.
- [40] 陈向, 周伟奇, 李伟峰. 北京河流底栖硅藻沿城乡梯度带空间分布及其季节变化[J]. 生态学报, 2017, **37**(10): 3586-3595.
- Chen X, Zhou W Q, Li W F. Benthic diatom assemblages and their seasonal variation in streams along an urban-rural gradient in the Beijing metropolitan area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(10): 3586-3595.
- [41] Shen Z Y, Zhong Y C, Huang Q, *et al.* Identifying non-point source priority management areas in watersheds with multiple functional zones[J]. Water Research, 2015, **68**: 563-571.
- [42] Stefanakis A, Akrotos C S, Tsihrintzis V A. Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [43] 李延, 单保庆, 唐文忠, 等. 北京市典型城市河流(凉水河)沉积物耗氧污染特征[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(9): 5065-5070.
- Li Y, Shan B Q, Tang W Z, *et al.* Pollution characteristic of sediment oxygen demand in typical urban river (Liangshui River) of Beijing city, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(9): 5065-5070.
- [44] 王洪涛, 张俊华, 丁少峰, 等. 开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估[J]. 环境科学学报, 2016, **12**(12): 4520-4530.
- Wang H T, Zhang J H, Ding S F, *et al.* Distribution characteristics, sources identification and risk assessment of heavy metals in surface sediments of urban rivers in Kaifeng[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(12): 4520-4530.
- [45] 孟祥巍, 许学工. 平原城市河流面源污染研究范围及方法的选择与效果比较[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(1): 145-150.
- Meng X W, Xu X G. The studied area selection and result comparison of river non-point source pollution in plain urban area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(1): 145-150.
- [46] 丁劲, 李怀恩, 刘铁龙, 等. 河流上下游控制断面非点源污染特征的分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(6): 26-29.
- Ding J, Li H N, Liu T L, *et al.* Analysis of non-point source

- pollution characteristics in control sections of upstream and downstream river [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, **26**(6): 26-29.
- [47] Lin Q Q, Xu L, Hou J Z, *et al.* Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in Tibetan lakes; implication for the effect of climate warming [J]. *Water Research*, 2017, **124**: 618-629.
- [48] Ka S, Mendoza-Vera J M, Bouvy M, *et al.* Can tropical freshwater zooplankton graze efficiently on cyanobacteria? [J]. *Hydrobiologia*, 2012, **679**(1): 119-138.
- [49] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [50] 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 等. 于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2154-2164.
- Wen S L, Gong W Q, Wu T, *et al.* Distribution characteristics and fluxes of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface of Yuqiao Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2154-2164.
- [51] Kozak A, Goldyn R, Dondajewska R, *et al.* Changes in phytoplankton and water quality during sustainable restoration of an Urban lake used for recreation and water supply [J]. *Water*, 2017, **9**(9): 713.
- [52] Virro T, Haberman J, Haldna M, *et al.* Diversity and structure of the winter rotifer assemblage in a shallow eutrophic northern temperate Lake Võrtsjärv [J]. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(3): 755-764.
- [53] Lorda J F, Fowler S W, Miquel J C, *et al.* ^{210}Po / ^{210}Pb dynamics in relation to zooplankton biomass and trophic conditions during an annual cycle in northwestern Mediterranean coastal waters [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, **115**: 43-52.
- [54] Marques S C, Pardal M A, Mendes S, *et al.* Using multitable techniques for assessing the temporal variability of species-environment relationship in a copepod community from a temperate estuarine ecosystem [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, **405**(1-2): 59-67.
- [55] Ladhar C, Tastard E, Casse N, *et al.* Strong and stable environmental structuring of the zooplankton communities in interconnected salt ponds [J]. *Hydrobiologia*, 2015, **743**(1): 1-13.
- [56] Kuczyńska-Kippen N, Joniak T. Zooplankton diversity and macrophyte biometry in shallow water bodies of various trophic state [J]. *Hydrobiologia*, 2016, **774**(1): 39-51.
- [57] 杨斌, 钟秋平, 张晨晓, 等. 钦州湾海水中石油烃时空变化特征及其影响因素 [J]. *海洋科学*, 2016, **40**(1): 76-84.
- Yang B, Zhong Q P, Zhang C X, *et al.* Spatiotemporal variations of petroleum hydrocarbon and its influencing factors in seawater of Qinzhou Bay [J]. *Marine Sciences*, 2016, **40**(1): 76-84.
- [58] 何琦, 雷腊梅, 韩博平, 等. 城市有机污染河流后生浮游动物分布特征 [J]. *水文*, 2009, **29**(S1): 168-173.
- He Q, Lei L M, Han B P, *et al.* Metazooplankton distribution in urban organic pollution rivers [J]. *Journal of China Hydrology*, 2009, **29**(S1): 168-173.
- [59] Ning N S P, Gawne B, Cook R A, *et al.* Zooplankton dynamics in response to the transition from drought to flooding in four Murray-darling basin rivers affected by differing levels of flow regulation [J]. *Hydrobiologia*, 2013, **702**(1): 45-62.
- [60] Dosskey M G, Vidon P, Gurwick N P, *et al.* The Role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in streams [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010, **46**(2): 261-277.
- [61] Groffman P M, Boulware N J, Zipperer W C, *et al.* Soil nitrogen cycle processes in urban riparian zones [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(21): 4547-4552.
- [62] Hopkins K G, Morse N B, Bain D J, *et al.* Assessment of regional variation in streamflow responses to urbanization and the persistence of physiography [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(5): 2724-2732.
- [63] 陈利顶, 齐鑫, 李芬, 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.
- [64] 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.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)