

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序 ..... 郝郑平(477)

我国机动车排放VOCs及其大气环境影响 ..... 陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)

基于PMF量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例 ..... 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)

南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估 ..... 张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)

某工业园区VOCs臭氧生成潜势及优控物种 ..... 武蕾丹,王秀艳,杨文,郭凤艳,刘锦(511)

某石油化工园区秋季VOCs污染特征及来源解析 ..... 胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)

某典型石油化工园区冬季大气中VOCs污染特征 ..... 毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)

杭州市工业源VOCs排放清单及排放特征 ..... 卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)

秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征 ..... 虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)

浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数 ..... 杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)

汽车制造企业恶臭来源及影响分析 ..... 石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)

典型酿造业厂界无组织排放VOCs污染特征与风险评价 ..... 高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)

成都市大气环境VOCs污染特征及其健康风险评价 ..... 李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)

上海地区住宅儿童卧室甲醛和苯系物浓度的现场检测分析 ..... 蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)

江苏省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献 ..... 夏思佳,刘倩,赵秋月(592)

江门市人为源挥发性有机物排放清单 ..... 陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)

长江三角洲2014年天然源BVOCs排放、组成及时空分布 ..... 刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)

北京城市副中心(通州区)加油站VOCs排放清单 ..... 黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)

公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及VOCs成分谱 ..... 胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)

生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究 ..... 褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)

低温等离子体-生物耦合系统对复合CVOCs的降解 ..... 郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)

水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价 ..... 陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)

城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征 ..... 许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)

不同通勤模式暴露于VOCs的健康风险评价 ..... 佟瑞鹏,张磊(663)

家具制造过程中VOCs的来源分析及环境健康风险评价 ..... 佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)

研究报告

北京市PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其与PM<sub>10</sub>关系的时空变异特征 ..... 杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)

小型池塘水-气界面CH<sub>4</sub>冒泡通量的观测 ..... 张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)

中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 ..... 王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)

铁岭市河流氮素时空分布及源解析 ..... 杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)

基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体CDOM特征 ..... 刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)

宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价 ..... 徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)

巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价 ..... 吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)

广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性 ..... 蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)

内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制 ..... 郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周徽(758)

河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程 ..... 徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)

降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析 ..... 刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)

城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系 ..... 梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)

三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征 ..... 张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)

基于污染评价的地下水中优控污染物筛选 ..... 赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)

硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响 ..... 陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)

活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和Cu(II)的去除性能 ..... 孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)

三维网状HZO@SGH对水中氟离子的吸附作用和机制 ..... 马福臻,周少奇,刘泽璐,支亮亮,周璇(828)

MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制 ..... 许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)

污水厂二级出水中难降解有机物的臭氧化特性 ..... 侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)

染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测 ..... 孟晓荣,王隽,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)

污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试 ..... 李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(859)

间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响 ..... 刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)

好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响 ..... 李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)

处理垃圾渗滤液的SBR中微生物种群与污泥比阻 ..... 蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)

基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价 ..... 姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁垠涛,于晓华(889)

西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价 ..... 刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)

开封城市土壤磷素组成特征及流失风险 ..... 白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)

电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价 ..... 尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)

上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价 ..... 孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)

四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征 ..... 迟菘琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)

硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤As-Cd生物有效性及稻米累积阻控 ..... 李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)

电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例 ..... 严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799,908,934)

# 城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系

渠晓东<sup>1,2</sup>, 余杨<sup>2</sup>, 张敏<sup>2</sup>, 段龙飞<sup>3</sup>, 彭文启<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 海河水利委员会引滦工程管理局, 唐山 064300)

**摘要:** 城市河流渠道化造成河流生态系统普遍退化, 重建水生生物栖息地, 修复城市河流水生态系统成为近年来的研究热点. 针对水生植物修复对大型底栖动物群落演替影响的科学问题, 选择北京清河 4 个沉水植物修复河段为研究区域, 于 2012~2013 年期间开展河流大型水生植物与大型底栖动物的季节动态监测, 利用聚类分析、排序分析和方差分析比较水生植物修复区和对照区的大型底栖动物群落差异. 研究结果表明采用沉水植物修复对大型底栖动物的密度、生物多样性和群落结构的稳定恢复具有显著效果, 但不同叶片形态的沉水植物中底栖动物的密度、物种数、生物多样性和功能摄食类群的组间方差并不显著, 表明采用不同形态植被修复对大型底栖动物群落的恢复和次生演替的生态效应较为一致. 大型底栖动物以直接收集者为绝对优势类群, 表明沉水植物通过稳定局部微生境的底质和流速条件, 为大型底栖动物提供更为适宜的生境条件, 促进河流沉积物中的有机质转化.

**关键词:** 大型底栖动物; 水生植物种植; 生态修复; 城市河流; 微生境

中图分类号: X171; X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0783-09 DOI: 10.13227/j.hjx.201708082

## Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream

QU Xiao-dong<sup>1,2</sup>, YU Yang<sup>2</sup>, ZHANG Min<sup>2</sup>, DUAN Long-fei<sup>3</sup>, PENG Wen-qi<sup>1,2\*</sup>

(1. China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China; 3. Haihe River Water Conservancy Commission, Yinlun Project Management Bureau, Tangshan 064300, China)

**Abstract:** The channelization has caused severe degradation of aquatic ecosystems during the past decades of rapid urbanization in metropolitan areas of China. The re-construction of the in-stream habitat of aquatic organisms and the restoration of aquatic ecosystems were more difficult in the urban stream than in the natural stream with the effluence of nutrient enrichment, water contamination, and in-stream habitat loss. Considering the ecological effects of the submerged macrophyte replantation on macroinvertebrate communities, one of the urban streams that used replantation restoration strategy was seasonally monitored from October 2012 to July 2013. There were four sampling sites, two located at the upper region and two in the middle region. Due to the relatively high levels of organic matter contamination, there are no sites in the downstream region of Qinghe River. Four types of submerged macrophyte were planted at each site to restore the in-stream habitat of two years ago, including *Potamogeton pectinatus*, *Potamogeton crispus*, *Hydrilla verticillate*, and *Ceratophyllum demersum*. Because of the unexpected development, *Myriophyllum spicatum* and *Acorus calamus* appeared at the upper reach of Qinghe River. Considering the average water depth of 30-40 cm, the revised Surber net with the enlarged net was used to collect macroinvertebrate samples. At each sampling site, three replicates of macroinvertebrates were carefully collected for each type of macrophyte. Three replicates were sampled for the comparison at the imperviously concrete sections of each site. The community composition of the macroinvertebrate was determined by cluster analysis and ordination analysis. The density, biodiversity, and community stability were higher in the sampling sections with the replantation of macrophyte than in impervious concrete sections. The occurrence of intermediate tolerant taxa such as *Ephemera* sp., *Caenis sinensis* Gui, *Ecnomus* sp., and *Hydropsyche* sp. indicated the recovery and restoration of macroinvertebrates in Qinghe River. However, the differences in the community structure, density, taxa richness, biodiversity index, and the composition of functional feeding groups of macroinvertebrates among different types of submerged macrophyte were not identified. Unlike providing extra habitats for macroinvertebrates in the vertical direction in natural streams and lakes, the submerged macrophyte provided more stable benthic habitats in urban streams. The stem and leaf of macrophytes could adjust the hydraulics and continually absorb, fix, and accumulate the suspended solids in the sediment and water interface. The root systems could stabilize the microhabitat of the sediment for macroinvertebrates, benthic algae, and microorganisms. Those aquatic organisms played an important role in the decomposition, transformation, and mineralization of nutrients and organic matter in urban streams. Following the recovery of stabilized microhabitats, community restoration and secondary succession of macroinvertebrates could

收稿日期: 2017-08-11; 修订日期: 2017-11-02

基金项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室项目(2015TS02); 国家自然科学基金项目(41671048); 北京市自然科学基金重点项目(Z160001)

作者简介: 渠晓东(1978~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为大型底栖动物生态学, E-mail: quxiaodong@iwhr.com

\* 通信作者, E-mail: pwq@iwhr.com

continually and slowly happen. This study improved the understanding of the ecological effects of macrophytes on the restoration of aquatic organisms and ecosystems in urban streams.

**Key words:** macroinvertebrate; macrophyte replantation; ecological restoration; urban stream; microhabitat

城市化过程造成的城市河流生态系统退化引起人们高度关注<sup>[1,2]</sup>. 近年来采用河道内水生植物群落重建或小型湿地重建的方法, 在有限的城市河流空间内最大限度地维持和改善河流生态功能, 成为水生态工程研究的重要内容受到关注<sup>[3,4]</sup>, 但城市河道沉水植物修复的生态效应研究较为缺乏<sup>[5,6]</sup>. 沉水植物通常应用于湖库生态系统修复<sup>[7]</sup>, 水生植物的茎、叶可以改变局部的水动力特征, 有效地降低水体中悬浮颗粒物的浓度, 可以有效吸附悬浮颗粒物上的重金属、磷和持久性有机物等, 提高水体的透明度改善水质<sup>[8,9]</sup>, 最新研究表明对于普通污水处理技术难以去除的新兴污染物, 水生植物能够达到很好的生物吸附和富集, 如多环芳烃和抗生素类等<sup>[10]</sup>. 沉水植物的茎叶, 增加了垂直方向上水生生物的栖息地面积, 植物根部可以稳定底质, 为攀爬类和营穴类底栖动物提供栖息地, 同时也为这类型底栖动物和小型鱼类躲避捕食者提供重要的避难所<sup>[11]</sup>, 因此水生植物对于维持河流、湖泊生态系统的功能和水生生物多样性具有重要作用<sup>[12]</sup>. 水生植物、底栖动物和微生物还可以协同降解沉积物中的营养盐和有机质, 提高城市河流的生态自净能力<sup>[13]</sup>. 本研究选取北京市清河上游-中游沉水植物修复河段开展大型沉水植物与大型底栖动物的年度生态监测, 分析沉水植物修复对大型底栖动物群落多样性恢复的生态效应, 探讨不同种类沉水植物对大型底栖动物群落演替的影响, 以期在城市河流河道内生态修复的机理研究奠定基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区

本研究选择清河沉水植物修复河段作为研究区. 清河位于北京市北部, 是连接京密引水渠和温榆河的一条城市河流, 同时连接圆明园、万泉河和奥林匹克公园的水系, 河流长度 23.6 km. 清河曾经是典型的城市黑臭河流, 河流渠道化造成原有的河道内微生物完全丧失, 长期缺乏自然水源补充且采用闸坝逐段调控, 河流水生态系统严重退化, 河流自净能力极低. 为恢复清河的河流生态系统, 针对河流自然生态系统的特征, 主要生态修复主要从 3 个方面开展: ①大规模开展排污口整治和清理,

截断污水直接排入清河, 提升污水处理工艺, 用再生水厂处理后的再生水补给清河, 保障清河水源; ②利用沿河的 9 座闸坝控制, 维持河道内的生态水文, 控制水流速度, 保障河道内沉水水生植被的生态需求; ③通过河道内水生植物的修复, 增加河道内的生境异质性, 为其他水生生物的修复提供栖息地. 监测区域主要分布有种植 2 年以上的水生植物 6 种, 分别为菹齿眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*)、菹草 (*Potamogeton crispus*)、轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 和金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 和菖蒲 (*Acorus calamus*). 其中菹齿眼子菜和菹草广泛分布于全部河段, 轮叶黑藻、金鱼藻、穗花狐尾藻和菖蒲仅分布于清河上游河段. 清河在治理前属于典型的黑臭河流, 排污口治理较为系统全面, 为后续水生态系统的修复提供了良好的基础, 闸坝的调度和控制适度, 绝大多数河段形成了较为稳定的流速条件, 增加了河流的自净能力, 种植的沉水植物目前已经形成了稳定的种群, 且密度适宜, 属于北京市城市河流治理中较为成功的案例, 具有较好的代表性, 开展清河沉水植物与底栖动物修复的研究, 可以为我国的城市河流治理提供重要的理论和数据支撑.

### 1.2 实验设计

在 2012 ~ 2013 年度, 分别选择秋季 (2012 年 10 月)、冬季 (2012 年 12 月)、春季 (2013 年 4 月) 和夏季 (2013 年 7 月) 4 个季节, 选择清河的中、上游设置 4 个监测断面 (Q1 ~ Q4 号点见图 1) 开展大型水生植物和大型底栖动物的监测. 监测河段截污工程较为完善, 水质较好且具有发育良好的水生植物群落. 每个监测样点选择具有相似水深和流速的区域, 以具有较适宜种群面积的水生植物种群为监测区, 以无水生植物生长的硬质化河道作为对照区, 比较水生植物种群对底栖动物群落结构的影响, 对比不同水生植物种群对底栖动物群落是否具有差异性影响.

采用沉水植物进行河道内水生植物群落重建, 主要选择对污染物具有一定耐受性的沉水植物种群: 菹齿眼子菜 (*P. pectinatus*)、菹草 (*P. crispus*)、轮叶黑藻 (*H. verticillata*) 和金鱼藻 (*C. demersum*) 种群, 同时监测区域内出现了具有一定种群面积的



计算物种数和香农-维纳生物多样性指数. 大型底栖动物和大型水生植物的关系采用线性回归法分析, 不同类型水生植物对底栖动物群落组成的影响研究采用 Kruskal-Wallis 方差 (KW) 检验 (STATISTICA7.0) 进行对比分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水环境和水生植物状况

清河 4 个监测样点的大型水生植物物种数和覆盖度监测数据表明, 上游河道 1 号样点的物种数最高, 4 号样点最低, 从上游向下游河道有明显的减少趋势. 不同季节 4 个监测点的 9 项水环境数据监测结果表明, 4 个监测样点的水环境状况与天然水体比较, pH 和溶解氧已经较为接近天然水体, 但电导率和总溶解态颗粒物较高, 基本符合城市河流的特点, 电导率基本超过或接近  $1\ 000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 总溶解态颗粒物的浓度介于  $320\sim 534\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间. 清河截污工程和污水处理厂的提标工程实施, 高锰酸盐指数和  $\text{BOD}_5$  的浓度也明显降低, 有机污染物的指标低于地表 IV 类水的限值. 但河流的营养盐浓度依然极高, 总氮的浓度基本在  $20\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,

总磷的浓度也基本超过 V 类水的限值, 尤其是河流上游的 TN: TP 比达到 198 倍 (表 1). 从清河 4 个样点的主要水环境指标来看, 从清河上游向清河下游, 水质状况有逐渐恶化的趋势, 在不考虑氮磷的情况下, 有机污染物和氨氮在上游 2 个点基本维持地表水 III 类水的状况, 下游 Q3 点基本维持地表水 IV 类的状况, 而 Q4 点的有机污染物浓度为 IV 类状况, 但氨氮浓度则为劣 V 类的状况. 在考虑氮磷污染物浓度的情况下, 则所有样点的总氮和总磷浓度均超过劣 V 类的标准, 表明清河尚存在较为普遍的富营养化状况, 从上游向下游氮磷比明显下降, 但总氮的浓度基本维持在  $20\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的水平, 总磷的浓度下游有增加的趋势. Q4 样点的氨氮浓度显著升高, 表明该区域内应该还有一定的污染物直排入河, 造成河流水体的溶解氧显著降低. 同时不同样点之间的水生植物种类也有一定的差异, 1 号样点的水生植物种类最多, 植被的覆盖度最高, 而相对来说 Q4 样点的植物种类数最少, 覆盖度也最低. 水质状况和水生植物的状况, 可能会直接影响清河上下游河道内大型底栖动物的生物多样性和群落结构 (表 1).

表 1 各样点水环境和水生植物状况

Table 1 Basic conditions of water quality and macrophyte recovery at each sampling station

监测类型	监测项目	缩写	站点			
			1	2	3	4
水环境	pH	pH	7.1	7.5	7.5	7.2
	溶解氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DO	8.84	10.20	8.36	4.03
	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Cond	1 012	1 014	985	1 031
	总溶解态颗粒物/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TDS	461	509	484	503
	总氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN	23.2	21.5	20.1	20.0
	总磷/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP	0.55	0.69	0.53	0.91
	总氮: 总磷	N: P	198	66	67	32
	高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		4.7	5.9	6.1	8.3
	5 日生化需氧量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{BOD}_5$	1.9	2.5	2.6	4.2
水生植物	氨氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	0.64	0.64	1.10	7.42
	水生植物物种数	SR	5.8	3.3	3.5	2.0
	水生植物盖度/%	C	77.5	63.8	65.0	27.3

### 2.2 大型底栖动物群落结构特征分析

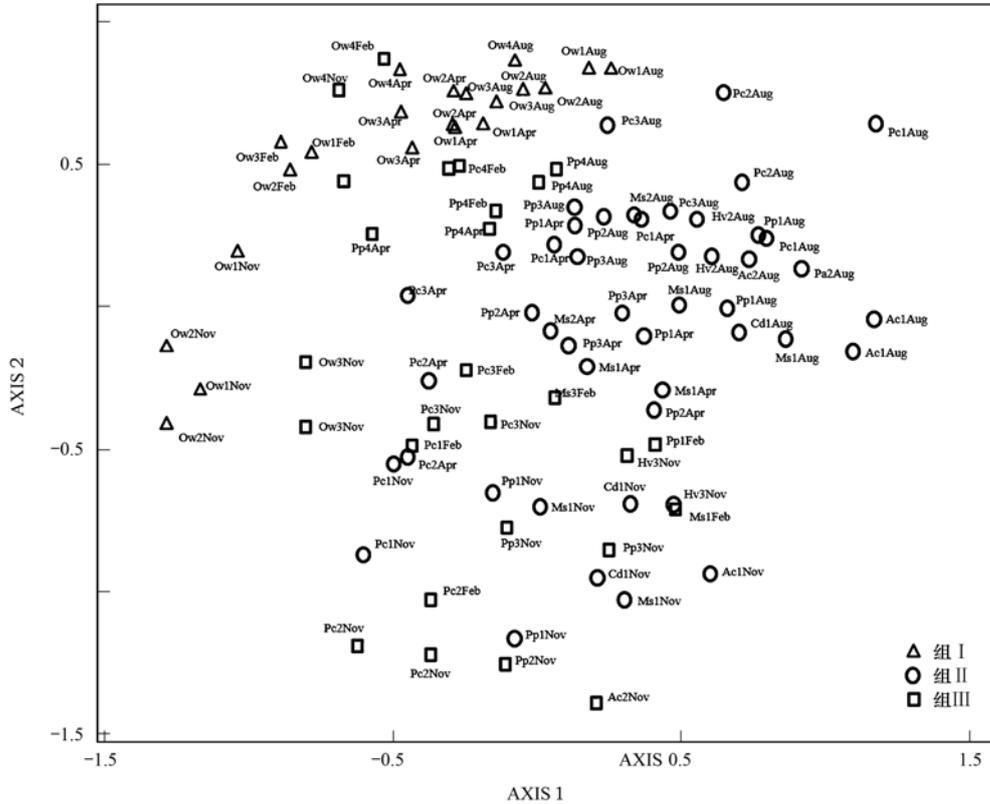
不同监测样点和监测时间、同一个监测点位的不同植物类群、同一型植物类群的不同重复样之间, 均采用聚类分析和 NMS 排序分析对大型底栖动物群落相似性进行了研究. 聚类结果表明, 大型底栖动物的群落按结构组成的相似性分为 3 个类群: 未进行水生植物修复的样点较为统一的聚为第一组 (组 I), 采取了水生植物修复的监测区按照季节又分为两类, 其中 4 月和 8 月的样品聚为第二组 (组 II), 2 月和 11 月的样品聚为第三组 (组 III).

Q4 点则未表现出明显的季节变化, 不同季节的大型底栖动物全部聚入第三组 (组 III), 这与该样点水污染状况较重, 底栖动物以耐污类群为主有密切关系 (图 2).

NMS 排序分析可进一步研究底栖动物类群相似性的拓扑结构, 从大型底栖动物的群落的拓扑变化关系来看, 横轴上主要指示了季节变化的趋势, 排序轴横轴左边分布的样点, 主要为秋季和冬季的监测样点, 排序轴纵轴右侧的样点则主要代表了春季和夏季的样点, 分析表明秋季和冬季的底栖动物

类群组成相似度更高，春季和夏季的底栖动物类群组成相似度更高。纵轴方向则主要指示了城市河道中大型水生植物的有无对底栖动物群落的影响，纵

轴上部绝大多数为无水生植物修复的区域，大型底栖动物群落结构在水生植物修复区的组成较为一致，但同时受到季节的影响(图2)。



以“Pc2Nov”为例，Pc 是代表沉水植物物种，中间的数字 2 代表监测样点(图 1 中的 1~4 号点)，Nov 代表月份(11 月)，以此类推；Ow: open water 敞水区，Pc: *Potamogeton crispus* 菹草，Pp: *Potamogeton pectinatus* 篦齿眼子菜，Ms: *Myriophyllum spicatum* 穗花狐尾藻，Cd: *Ceratophyllum demersum* 金鱼藻，Ac: *Acorus calamus* 菖蒲，Hv: *Hydrilla verticillate* 轮叶黑藻，下同

图 2 不同样点、监测时间和植被类型的大型底栖动物群落相似性排序

Fig. 2 Similarity ordination map of macroinvertebrates at different sampling stations, different sampling times, and different types of macrophyte

大型水生植物的覆盖度和大型底栖动物物种数和香农-维纳生物多样性的回归分析表明，大型底栖动物的物种数与水生植物的覆盖度、大型底栖动物的生物多样性与水生植物的覆盖度均呈显著的线性正相关关系( $P < 0.05$ )，线性拟合的结果表

明水生植物的覆盖度对大型底栖动物的物种数的恢复具有较好的作用，线性拟合的解释率达到 50.95% [图 3(a)]，对大型底栖动物的生物多样性恢复具有较好的作用，线性拟合的解释率达到 49.62% [图 3(b)]。

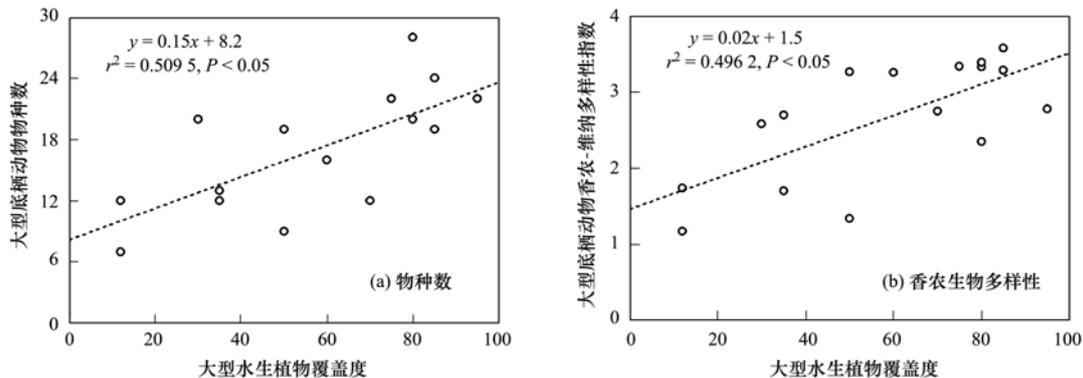


图 3 水生植物覆盖度与大型底栖动物物种数和香农生物多样性的线性拟合

Fig. 3 Linear regression between macrophyte cover and taxa richness and Shannon-Wiener biodiversity index of macroinvertebrates

### 2.3 水生植物修复对大型底栖动物群落复杂性的关系

不同水生植物之间对大型底栖动物的密度和物种数的增加有一定的作用,从箱线图的分布可以看出,菹草和篔齿眼子菜中的底栖动物密度和物种数均有增加, KW 方差检验表明,菹草中的密度显著高于未进行水生植物修复的硬质河底 [图 4 (a)], 而菹草和篔齿眼子菜中的物种数显著高于未进行水生植物修复的硬质河底 [ $P < 0.05$ , 图 4 (b)]. 尽管菹草和菖蒲中的底栖动物密度、菹草和篔齿眼子菜中的底栖动物物种数高于其他类型的水

生植物,但均未达到显著性水平. 而从 Berger-Parker 优势度指数的分布范围来看, BP 指数的分布范围基本介于 0.4 ~ 0.6 之间,表明单一优势类群在多数样点的优势度还是较高的,这也表明底栖动物类群的生物多样性相对较低 [图 4(c)].

清河大型底栖动物的功能摄食类群以直接收集者为主,这与清河的河道底质特征和植被修复后的河道底质类型以沉积型的有机质为主有密切的关系,水生植物的存在同时促进了营养层级关系的建立,同时促进了底栖动物不同类群生态位的分化(图 5). 不同水生植物间存在一定的差异,菖蒲中的收集者比例最高,表明挺水植物能够维持更为稳

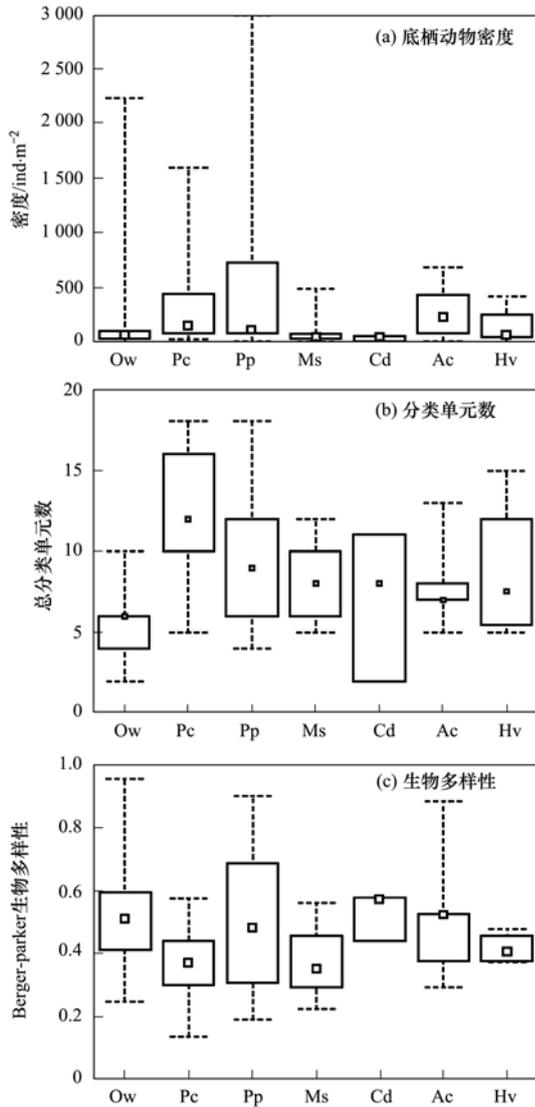


图 4 不同类型水生植物对底栖动物密度、分类单元数和生物多样性的影响

Fig. 4 Ecological effects on density, taxa richness, and berger-parker index of macroinvertebrates

using different types of macrophytes as restoration strategies

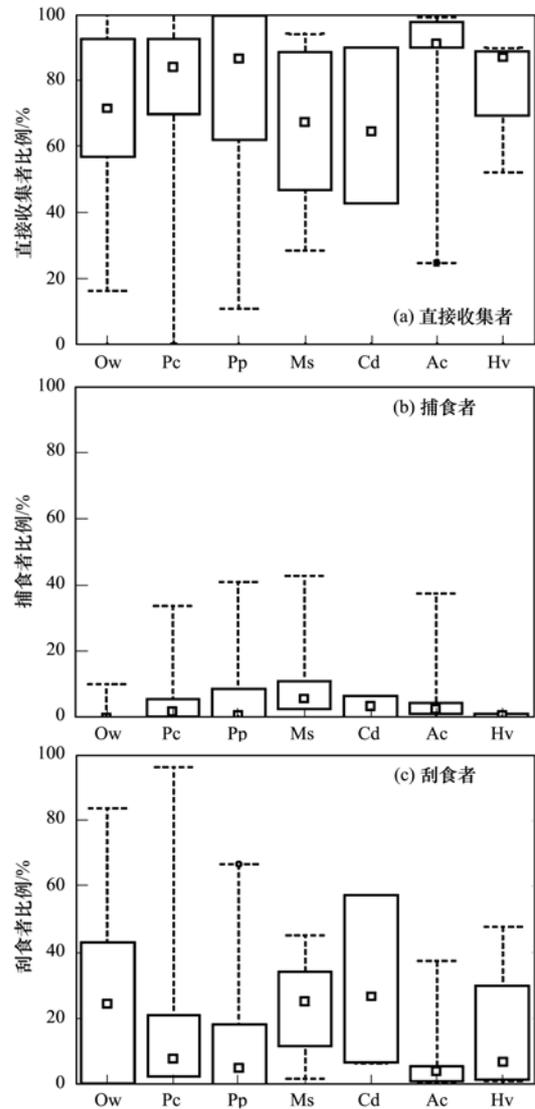


图 5 不同类型水生植物对大型底栖动物直接收集者、捕食者和刮食者相对丰度的影响

Fig. 5 Ecological effects on the relative abundance of gather-collector, predator and scraper of macroinvertebrates using different types of macrophytes as restoration strategies

定的沉积物,利于底栖动物群落尤其是摇蚊和寡毛类的繁殖[图 5(a)].捕食者的比例在菹草、篦齿眼子菜和狐尾藻中的比例显著增加,这主要与捕食者的类型有密切关系[图 5(b)],清河本次调查中主要捕食者为碧伟蜓(*Anax parthenope julius*)、灰蜓(*Qrthetum* sp.)和小螳(*Agriocnemis* sp.),这 3 个物种都属于典型的攀爬型,因此其必须借助沉水植物完成生活史,因而其密度相对较高,而且捕食者在金鱼藻和菹草中的比例也有所增加,但黑藻中的捕食者相对较少,这可能与黑藻分布范围相对较少,因此采集的样本较少有关.刮食者的比例在不同类群间差异不显著,但在硬质底、狐尾藻和金鱼藻中的比例稍高[图 5(c)].

### 3 讨论

#### 3.1 水生植物修复措施显著恢复大型底栖动物群落的多样性和稳定性

聚类分析结果和排序分析的结果表明,城市河流中受闸坝调控的水体中,大型底栖动物的群落结构的季节演替较为复杂.大型底栖动物的群落结构在采用水生植物进行修复的区域与非修复区域具有明显差异,这与水生植物促进大型底栖动物群落多样性的研究完全一致<sup>[17]</sup>.大型水生植物作为城市河流中一种重要的修复手段,不但可以改变局部河道内物理微生境生境的状况(如水温、避难所),而且可以显著改变沉积物中各形态氮<sup>[18]</sup>、磷<sup>[19]</sup>元素的结构,甚至水生植物的根部还能有效改善根际细菌的构成<sup>[20]</sup>,都对大型底栖动物的生物多样性和群落结构复杂性的恢复具有关系密切.研究还发现,清河大型底栖动物群落结构的变化还受到季节影响和污染强度的影响,水生植被修复区底栖动物的群落表现出较为明显的季节差异和空间差异,而未进行植被修复区的底栖动物群落变异程度明显较小(图 3),李婉等<sup>[21]</sup>的研究发现,北京市城市河流修复河段中的水生植物覆盖度与 TP 呈负相关,与 DO 呈正相关,这些重要的环境因子均直接影响大型底栖动物群落的演替<sup>[22]</sup>.尽管城市河流的水污染造成大型底栖动物敏感物种极度减少,耐污物种的大量滋生造成群落演替过程的差异性降低,但北京市温榆河的底栖动物年际变化研究表明,尽管耐污物种占据绝对优势,但春季和冬季的底栖动物群落结构相似度更高,而夏季和秋季的底栖动物相似度更高<sup>[23]</sup>,这与本次研究中底栖动物群落结构的空间相似性具有极高的一致性.但相比于温榆河的

研究成果,清河上游 Q1 号和 Q2 号点水生植物修复区的底栖动物优势类群还出现了中度耐污的物种,这与上游水环境质量的改善密切相关.清河依然维持了较高的富营养化水平,各种污染物普遍存在<sup>[24]</sup>,通过采取河道内种植水生植物,利用水生植物有效降低河流中的颗粒态的悬浮物<sup>[25]</sup>和改善河道内微生境物理稳定性的特征<sup>[26]</sup>,促进大型底栖动物群落的恢复,提高城市河流水生生物的多样性.但同时研究也发现,清河 Q4 号点在所有监测断面中富营养化程度最高,对大型底栖动物群落的恢复具有较强的限制作用.

#### 3.2 水生植物修复促进了城市河流大型底栖动物群落的次生演替

静水生境中,优势水生植物类群通常决定了底栖动物群落的结构和组成<sup>[27]</sup>,清河中的大型水生植物类群是采用人工种植的方式进行的修复,因此具有典型的集群分布特征,尽管不同类型的水生植物如菹草、篦齿眼子菜、狐尾藻和金鱼藻等具有不同特性的异质性结构,但底栖动物的密度和物种数并未产生显著差异,这与不同植物形态对大型底栖动物群落多样性影响的研究结果并不完全吻合<sup>[28,29]</sup>,分析其原因可能与城市河道内水生植物的存在特性及水环境状况密切相关.首先,城市河道内水质相对较差,从基本水质状况来看总氮基本在  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,总磷基本高于  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,属于典型的富营养化水体,较为敏感的底栖动物类群难以存活.其次,清河各监测点均属于各级闸坝的调控影响区域内,水生植物受到闸坝调控的水流速度影响极大,能够提供极高异质性生境的植物叶片受到水力冲刷后在河道中的稳定性降低,对栖息于水生植物叶片部分的底栖动物类群影响较大.最后,未进行修复的水体中底栖动物物种数的中位数最低,这与 Walker 等的研究较为一致<sup>[11]</sup>.但除了与篦齿眼子菜和菹草有显著性差异外,与其他类群的水生植物差异不大.篦齿眼子菜和菹草是清河水体修复主要选用的水生植物类群,经过长期的发育后,目前已经形成了较为稳定的种群规模,而狐尾藻、金鱼藻和黑藻的种群规模相对较小,因此在野外监测时从样方框内水生植物的密度来讲,这 3 种植物的密度显著小于菹草和篦齿眼子菜,水生植物的密度越高,其内部固定的有机质通常越丰富,底质的稳定性越高,因而形成了更适于大型底栖动物群落的生境.总体来看,水生植物的增加为捕食者提供了更为有利的捕食环境,不仅增加了水生生物的多样

性,而且改善了城市河流中底栖动物的营养层级关系<sup>[12, 27]</sup>,这对于城市河流中底栖动物群落的重建具有重要的促进作用。

#### 4 结论

(1)清河采用大型沉水植物修复的河段,大型底栖动物的物种数和香农生物多样性指数随植物覆盖度的增加而显著增加,二者表现出显著的线性关系。

(2)采用不同沉水植物修复对大型底栖动物群落结构的影响相对较小,植物修复区的底栖动物更多表现为季节差异;不同沉水植物对底栖动物的密度、总分类单元数、Berger-Parker 优势度指数的影响不大,但对大型底栖动物功能摄食类群的分化有一定影响。

致谢:感谢中国环境科学研究院何萍研究员、徐杰提供的野外水环境监测数据,感谢高欣副研究员、朱琳、Kate Bentsen 等给予的野外监测工作协助。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Paul M J, Meyer J L. Streams in the urban landscape [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, **32**: 333-365.
- [ 2 ] 宋庆辉, 杨志峰. 对我国城市河流综合管理的思考 [J]. *水科学进展*, 2002, **13**(3): 377-382.  
Song Q H, Yang Z F. Thinking of integrated management of urban rivers in China [J]. *Advances in Water Science*, 2002, **13**(3): 377-382.
- [ 3 ] Suren A M. Using macrophytes in urban stream rehabilitation: a cautionary tale [J]. *Restoration Ecology*, 2009, **17**(6): 873-883.
- [ 4 ] Larned S T, Suren A M, Flanagan M, *et al.* Macrophytes in urban stream rehabilitation: establishment, ecological effects, and public perception [J]. *Restoration Ecology*, 2006, **14**(3): 429-440.
- [ 5 ] 董哲仁. 城市河流的渠道化园林化问题与自然化要求 [J]. *中国水利*, 2008, (22): 12-15.  
Dong Z R. Issues related to canalization and gardenization and natural requirement of rivers [J]. *China Water Resources*, 2008, (22): 12-15.
- [ 6 ] Davies P J, Wright I A, Findlay S J, *et al.* Impact of urban development on aquatic macroinvertebrates in south eastern Australia: degradation of in-stream habitats and comparison with non-urban streams [J]. *Aquatic Ecology*, 2010, **44**(4): 685-700.
- [ 7 ] Diehl S K, Kornijów R. Influence of submerged macrophytes on trophic interactions among fish and macroinvertebrates [A]. In: Jeppesen E, Søndergaard M, Søndergaard M, *et al.* (Eds.). *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes* [M]. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [ 8 ] Caraco N F, Cole J J. Contrasting impacts of a native and alien macrophyte on dissolved oxygen in a large river [J]. *Ecological Applications*, 2002, **12**(5): 1496-1509.
- [ 9 ] James C S, Eaton J W, Hardwick K. Competition between three submerged macrophytes, *Elodea canadensis* Michx, *Elodea nuttallii* (Planch.) St John and *Lagarosiphon major* (Ridl.) Moss [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **415**: 35-40.
- [ 10 ] 朱琳, 张远, 渠晓东, 等. 北京清河水体及水生生物体内抗生素污染特征 [J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(2): 139-146.  
Zhu L, Zhang Y, Qu X D, *et al.* Occurrence of antibiotics in aquatic plants and organisms from Qing River, Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(2): 139-146.
- [ 11 ] Walker P D, Wijnhoven S, van der Velde G. Macrophyte presence and growth form influence macroinvertebrate community structure [J]. *Aquatic Botany*, 2013, **104**: 80-87.
- [ 12 ] Warfe D M, Barmuta L A. Habitat structural complexity mediates the foraging success of multiple predator species [J]. *Oecologia*, 2004, **141**(1): 171-178.
- [ 13 ] Fritz K M, Feminella J W. Substratum stability associated with the riverine macrophyte *Justicia americana* [J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(9): 1630-1639.
- [ 14 ] Metropolis N, Ulam S. The Monte Carlo Method [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, **44**(247): 335-341.
- [ 15 ] Zimmerman G M, Goetz H, Mielke Jr P W. Use of an improved statistical method for group comparisons to study effects of prairie fire [J]. *Ecology*, 1985, **66**(2): 606-611.
- [ 16 ] McCune B, Mefford M J. PC-ORD: multivariate analysis of ecological data (4th ed.) [M]. Oregon: MjM Software Design, 1999.
- [ 17 ] 张明娟, 李俊杰, 陈奋飞, 等. 瓯江生态修复示范段大型底栖动物类群与微生境的关系 [J]. *水生态学杂志*, 2012, **33**(2): 48-54.  
Zhang M J, Li J J, Chen F F, *et al.* The relationships between macrobenthos and micro-habitat factors in the exemplary sections of Oujiang ecological restoration project [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(2): 48-54.
- [ 18 ] 马久远, 王国祥, 李振国, 等. 太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4240-4250.  
Ma J Y, Wang G X, Li Z G, *et al.* Influence of two different species of aquatic plant communities on the concentration of various nitrogen forms in sediment of lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4240-4250.
- [ 19 ] 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 等. 滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3828-3834.  
Ding S, Wang S R, Zhang R, *et al.* Concentration of phosphorus in sediments interstitial water as affected by distribution of aquatic plants in Dianchi Lake [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3828-3834.
- [ 20 ] 邢鹏, 孔繁翔, 陈开宁, 等. 生态修复水生植物根际氨氧化细菌的研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2154-2159.  
Xing P, Kong F X, Chen K N, *et al.* Ammonia-oxidizing bacteria community composition at the root zones of aquatic plants after ecological restoration [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2154-2159.
- [ 21 ] 李婉, 张娜, 吴芳芳. 北京转河河岸带生态修复对河流水质的影响 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 80-87.  
Li W, Zhang N, Wu F F. Influence of ecological restoration of

- riparian zone on water quality of Zhuanhe River in Beijing[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 80-87.
- [22] Robinson C T, Blaser S, Jolidon C, *et al.* Scales of patchiness in the response of lotic macroinvertebrates to disturbance in a regulated river[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2011, **30**(2): 374-385.
- [23] 李爱仙, 汪祖茂, 杨柳, 等. 温榆河大型底栖动物季节分布特征的研究[J]. 生物学杂志, 2013, **30**(4): 1-4, 14.  
Li A X, Wang Z M, Yang L, *et al.* Characteristics of macrobenthos communities in Wenyu River at four seasons[J]. Journal of Biology, 2013, **30**(4): 1-4, 14.
- [24] Zhang Y, Zhang T T, Guo C S, *et al.* Drugs of abuse and their metabolites in the urban rivers of Beijing, China: occurrence, distribution, and potential environmental risk[J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 305-313.
- [25] Filoso S, Smith S M C, Williams M R, *et al.* The efficacy of constructed stream-wetland complexes at reducing the flux of suspended solids to Chesapeake Bay[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(15): 8986-8994.
- [26] Kumwimba M N, Zhu B, Suanon F, *et al.* Long-term impact of primary domestic sewage on metal/loid accumulation in drainage ditch sediments, plants and water: implications for phytoremediation and restoration [J]. Science of the Total Environment, 2017, **581-582**: 773-781.
- [27] Gallardo L I, Carnevali R P, Porcel E A, *et al.* Does the effect of aquatic plant types on invertebrate assemblages change across seasons in a subtropical wetland? [J]. Limnetica, 2017, **36**(1): 87-98.
- [28] Rooke B. Macroinvertebrates associated with macrophytes and plastic imitations in the Eramosa River, Ontario, Canada [J]. Archiv für Hydrobiologie, 1986, **106**(3): 307-325.
- [29] Jeffries M. Invertebrate colonization of artificial pondweeds of differing fractal dimension [J]. Oikos, 1993, **67**(1): 142-148.



## CONTENTS

Preface .....	HAO Zheng-ping ( 477 )
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment .....	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> ( 478 )
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing .....	..... HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> ( 493 )
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> ( 502 )
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park .....	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> ( 511 )
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China .....	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> ( 517 )
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park .....	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> ( 525 )
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China .....	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> ( 533 )
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao .....	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> ( 543 )
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province .....	..... YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> ( 551 )
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making .....	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> ( 557 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers .....	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> ( 567 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu .....	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> ( 576 )
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors .....	..... JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> ( 585 )
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province .....	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue ( 592 )
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City .....	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> ( 600 )
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014 .....	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> ( 608 )
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing .....	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> ( 618 )
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel .....	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> ( 626 )
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter .....	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> ( 633 )
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter .....	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> ( 640 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event .....	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> ( 648 )
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems .....	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> ( 655 )
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes .....	..... TONG Rui-peng, ZHANG Lei ( 663 )
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing .....	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> ( 672 )
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Beijing .....	..... YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> ( 684 )
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method .....	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> ( 691 )
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China .....	..... WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> ( 703 )
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling .....	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> ( 711 )
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis .....	..... LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> ( 720 )
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China .....	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> ( 729 )
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake .....	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> ( 738 )
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China .....	..... LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> ( 748 )
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter .....	..... ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> ( 758 )
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir .....	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> ( 765 )
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis .....	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> ( 774 )
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream .....	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> ( 783 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> ( 792 )
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment .....	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> ( 800 )
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors .....	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> ( 811 )
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel .....	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> ( 819 )
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution .....	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> ( 828 )
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds .....	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> ( 838 )
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 844 )
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology .....	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> ( 852 )
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant .....	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> ( 859 )
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode .....	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> ( 865 )
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge .....	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> ( 872 )
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate .....	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> ( 880 )
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil .....	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> ( 889 )
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin .....	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> ( 899 )
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss .....	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> ( 909 )
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area .....	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> ( 916 )
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai .....	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> ( 927 )
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables .....	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> ( 935 )
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils .....	..... LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> ( 944 )
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors .....	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> ( 953 )