

百方知库
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.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM_{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 刘攀亮, 剧媛丽, 毛满萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO₂、HNO₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 王慎, 张思思, 许允, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO_x排放影响 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N₂O排放的影响及其微生物机制 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律

朱伊梦¹, 姜翠玲¹, 朱立琴^{2*}, 杜观超³, 高旭³, 陈红卫⁴, 李峰东³, 张海阔¹, 张雪¹, 秦文凯⁵, 李一平⁵

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学马克思主义学院, 南京 210098; 3. 盐城市盐龙湖饮用水源管理处, 盐城 224014; 4. 盐城市节约用水办公室, 盐城 224001; 5. 河海大学环境学院, 南京 210098)

摘要: 底泥在表面流人工湿地污染物迁移转化中起到非常重要的载体作用, 探究其营养盐的累积特征与释放规律对了解长期运行的表流湿地净化功能具有重要意义. 以运行了5 a的盐龙湖表面流人工湿地底泥为研究对象, 对不同位置底泥的总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)含量进行分析并开展柱状芯样静态释放实验. 结果表明, 盐龙湖表流湿地运行5 a后, 底泥整体属于中度污染范畴, 营养盐累积水平主要受进水条件、水深和植物作用等影响. ①顺着水流方向, 表流湿地底泥营养盐含量表现升高趋势; ②随着上覆水深增大, 底泥营养盐含量升高, 碳受影响程度较深; ③表流湿地植物的生长情况越好, 底泥中累积的营养盐含量也越高. 底泥营养盐释放趋势呈现为先升后降, 在20 d后基本达到平衡. 释放速率主要受湿地底泥营养盐累积水平影响, 其规律与轻度营养型水库底泥较为相似. 表流湿地底泥中包含的植物残体会使营养盐释放更强烈, 研究结果可为长期运行的表面流人工湿地提升净化能力提供科学依据.

关键词: 表面流人工湿地; 长期; 底泥; 营养盐; 累积; 释放

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2764-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201809147

Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation

ZHU Yi-meng¹, JIANG Cui-ling¹, ZHU Li-qin^{2*}, DU Guan-chao³, GAO Xu³, CHEN Hong-wei⁴, LI Feng-dong³, ZHANG Hai-kuo¹, ZHANG Xue¹, QIN Wen-kai⁵, LI Yi-ping⁵

(1. School of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Marxism, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yanlong Lake Drinking Water Sources Administrative Office, Yancheng 224014, China; 4. Water Conservation Office, Yancheng 224001, China; 5. School of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Sediments serve as an important carrier during the migration and transformation of pollutants in surface-flow constructed wetlands. Exploring the accumulation characteristics and release patterns of nutrients is of great significance for assessing the purification functions of constructed wetlands after long-term operation. The contents of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in sediments at various locations of the 5-year-old Yanlong Lake surface-flow constructed wetland were analyzed and static release experiments with cylindrical core samples were carried out. The results showed that after five years, sediments at this site have become moderately polluted and the nutrient accumulation level is mainly being affected by the influent flow, water depth, and plant effects. Additionally, ① nutrients in sediments were found to increase along the flow direction; ② they also increase as the depth of overlying water increases and are relatively affected by the carbon; ③ healthier growth of the wetland plants could lead to more nutrients being accumulated in sediments. The release trend of nutrients fell after a rise and basically reached equilibrium after 20 days, and the release rate was mainly affected by the accumulation level of nutrients, which is similar to the trend in light nutrient containing reservoirs. Plant residues contained in the sediments were associated with the stronger release of nutrients. These results can provide a scientific basis for solutions aimed at maintaining the purification capacity of long-running surface-flow constructed wetlands.

Key words: surface-flow constructed wetland; long-term; sediment; nutrient; accumulation; release

表面流人工湿地因其经济、美观、便于管理等优点, 成为广泛应用的一种污水处理技术^[1]. 然而随着运行年限的增长, 人工湿地出现污染物去除效果减弱的问题, 有研究表明其关键期在5~10 a^[2, 3]. 表面流人工湿地结构与自然湿地类似, 在其处理污水过程中, 底泥起到非常重要的载体作用, 在长期运行后易成为营养盐的重要蓄积库, 一定条件下可能向上覆水体释放, 导致表流湿地对污水的

净化效果减弱^[4-6]. 目前的研究大多将湿地作为黑箱模型通过对比进出水水质研究其净化效果, 缺乏深层次尤其是内源的角度探究影响净化效果导致净

收稿日期: 2018-09-18; 修订日期: 2018-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609060, 51879082); 江苏省自然科学基金项目(BK20150810); 中央高校基本科研业务费专项(2017B14614)

作者简介: 朱伊梦(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向是生态水文与水环境保护, E-mail: huafanyeluo@qq.com

* 通信作者, E-mail: lqzhu@hhu.edu.cn

化功能衰退的原因^[7]. 而关于内源的研究, 对象大多集中在河流、湖泊(水库), 探究其底泥中污染物的分布规律、来源及释放程度等^[8~10]. 表流湿地水力条件、植被条件等与自然水域存在较大差异, 各表流湿地的设计工况也有差别, 对底泥的累积造成了很大影响. 我国的人口密度大、污水处理需求量大, 人工湿地长期处于高负荷运行状态^[11, 12], 底泥营养盐累积问题可能更严峻. 因此, 探明在各影响因素下表流湿地经长期运行后底泥营养盐的累积特征与释放规律, 对于揭示表流湿地底泥状况, 指导表流湿地维持长期高效运行, 提高其可持续发展能力具有重要意义.

本文以盐龙湖表流湿地底泥为研究对象, 监测其在运行 5 a 后的总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的含量及分布, 对不同影响因素下的累积特征进行分析, 对其污染状况进行评价, 并采用柱状芯样静态释放实验方法, 对营养盐的释放规律进行了探究, 通过了解盐龙湖表流湿地在长期运行后的底泥营养盐累积情况及释放状况, 以期提升长期运行后的表流湿地的净化能力提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

盐龙湖工程位于江苏省盐城市龙冈镇境内蟒蛇河南岸, 于 2012 年 6 月建成通水, 至 2017 年底已稳定运行 5 a, 是目前我国规模最大的饮用水源地原水生态净化工程. 本文的研究对象为该工程的表面流人工湿地单元, 蟒蛇河原水经预处理后进入该单元, 多年平均进水的 COD、TN 和 TP 浓度分别为 6.1、1.7 和 0.2 mg·L⁻¹. 表流湿地占地规模为 4.2 × 10⁵ m², 平均进水流量为 30 万 m³·d⁻¹, 平均水力负荷约为 0.73 m·d⁻¹, 分为 A、B 和 C 这 3 个区块, 在常水位条件下, 水深分别为 30、40 和 50 cm. A 和 B 区种植的植物中优势种群有芦苇和茭草, 覆盖率约占总植被的 35% 和 50%, 密度约 80 株·m⁻², C 区的优势种群只有茭草且生长情况明显优于 A 和 B 区, 覆盖率高于 90%, 密度达到 110 株·m⁻² 以上, 根茎粗壮且出现较严重的倒伏情况.

1.2 底泥样品采集与分析

底泥样品采集时间在 2017 年 12 月, 此时盐龙湖表流湿地正在对挺水植物进行地面人工收割. 在表流湿地 A、B 和 C 区顺着水流方向(进水处、中部、出水处)选取不同植物类型(茭草、芦苇), 共设置 15 个样点, 分布如图 1 所示. 采用柱状采泥器采集底泥样品, 取柱状泥样的 0~30 cm, 装入密封袋, 每个采样点采集 3 个平行泥样, 运回实验室进

行化验分析. TN 采用半微量开氏法测定, TP 采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定, TOC 采用总有机碳分析仪(TOC-VCSH 型)测定.

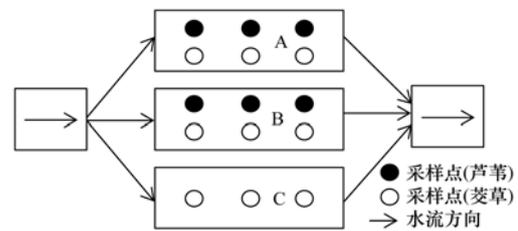


图 1 采样位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the sampling position

1.3 静态释放实验

盐龙湖表流湿地设计流速及实际运行流速范围在 0.38 ~ 1.67 cm·s⁻¹, 不足以引起底泥的再悬浮, 多数动态释放实验是由于扰动产生波, 波的能量产生的力引起了再悬浮现象而造成释放程度差异^[13~15], 因此采用静态释放模拟简单方便, 也能较好接近实际情况. 而柱状芯样可基本不破坏底泥性状, 保留底泥垂向分层特性. 因此, 本研究采用柱状芯样静态释放实验以探究底泥释放规律.

在 A、B 和 C 区选取不同植物类型(茭草、芦苇), 共设置 5 个样点, 用装有 $\Phi 9$ cm × 100 cm 有机玻璃管的柱状采泥器采集泥样, 厚度在 25 ~ 30 cm, 两端用橡皮塞塞紧, 垂直放置, 小心带回实验室进行柱状芯样静态释放实验(图 2). 实验在荫蔽通风处进行, 尽量保持与外界环境条件一致. 本实验开始时, 5 个柱样按对应上覆水深用虹吸法注入相应水量的表流湿地进水处原水, 于第 0、1、2、3、5、7、10、12、15、19、23、27 和 30 d 在水面下约 5 cm 处用虹吸法采集上覆水样 200 mL, 取完样后补充原水至原刻度. 水样采集后及时进行分析, COD 采用高锰酸钾氧化滴定法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, TP 采用钼酸铵分光光度法测定. 实验时间为 2017 年 12 月 23 日至 2018 年 1 月 22 日.



图 2 柱状芯样静态释放实验

Fig. 2 Column core sample static release experiment

底泥释放速率的计算公式如下所示^[16]：

$$R = [c_n V - c_{n-1}(V - V_s) - c_a V_s] / At$$

式中, R 为底泥释放速率, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; c_n 、 c_{n-1} 分别为第 n 次、 $n-1$ 次采样时上覆水中营养盐浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_a 为补给水中营养盐浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为反应器中上覆水体积, L; V_s 为每次采样体积, L; A 为反应器中上覆水-底泥接触面积, m^2 ; t 为底泥释放时间, d.

1.4 底泥营养盐污染状况评价方法

本研究采用有机指数及有机氮评价法对底泥的污染状况进行评价, 同时采用污染指数法对底泥中磷的污染状况进行评价.

有机指数 (Org-index) 通常用作评价水体底质环境状况的指标, 可用作衡量底泥受有机物污染程度, 有机氮 (Org-N) 常用来衡量底泥受氮污染程度. 计算公式如下, 评价标准见表 1.

$$\text{Org-index} = \text{Org-C}(\%) \times \text{Org-N}(\%)$$

$$\text{Org-N}(\%) = \text{TN}(\%) \times 0.95$$

表 1 底泥有机指数及有机氮评价标准^[17]

Table 1 Organic index and organic nitrogen evaluation criteria for sediments

等级	有机指数	有机氮/%	污染程度
I	<0.05	<0.033	清洁
II	0.05 ~ 0.20	0.033 ~ 0.066	轻度
III	0.20 ~ 0.50	0.066 ~ 0.133	中度
IV	≥ 0.05	≥ 0.133	重度

污染指数 (P_i) 的计算公式如下：

$$P_i = \frac{C_i}{C_{0i}}$$

式中, C_i 为第 i 种营养盐实测含量, C_{0i} 为第 i 种营养盐评价标准. 参照加拿大安全省环境和能源部 1992 年发布的沉积物的环境质量评价标准^[18] 确定 TP 的 C_{0i} 取 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这是其中指出的引起最低级别生态风险效应的总磷含量. 并确定分级标准为 I: $P_i < 0.5$ 为清洁; II: $0.5 \leq P_i < 1.0$ 为轻度污染; III: $1.0 \leq P_i < 1.5$ 为中度污染; IV: $P_i \geq 1.5$ 为重度污染^[17].

所有数据采用 Microsoft Excel 2010 及 IBM SPSS 19 进行处理, 采用 Origin 2016 绘图.

2 结果与分析

2.1 长期运行后表面流人工湿地底泥营养盐累积特征

2.1.1 同一区域顺水流方向的底泥营养盐分布特征

同一区域顺着水流方向, 底泥营养盐含量表现出增加的趋势, 各区底泥中营养盐含量的最大值总是在中部和出水处取得 (见图 3). 从平均值来看

(见表 2), TOC 含量在出水处最高, 分别比进水处和中部高 58.88% 和 89.64%; TN 含量在出水处最高, 分别比进水处和中部高 37.00% 和 1.07%, 中部与出水处差距较小; TP 含量在中部最高, 分别比进水和出水处高 24.68% 和 8.71%.

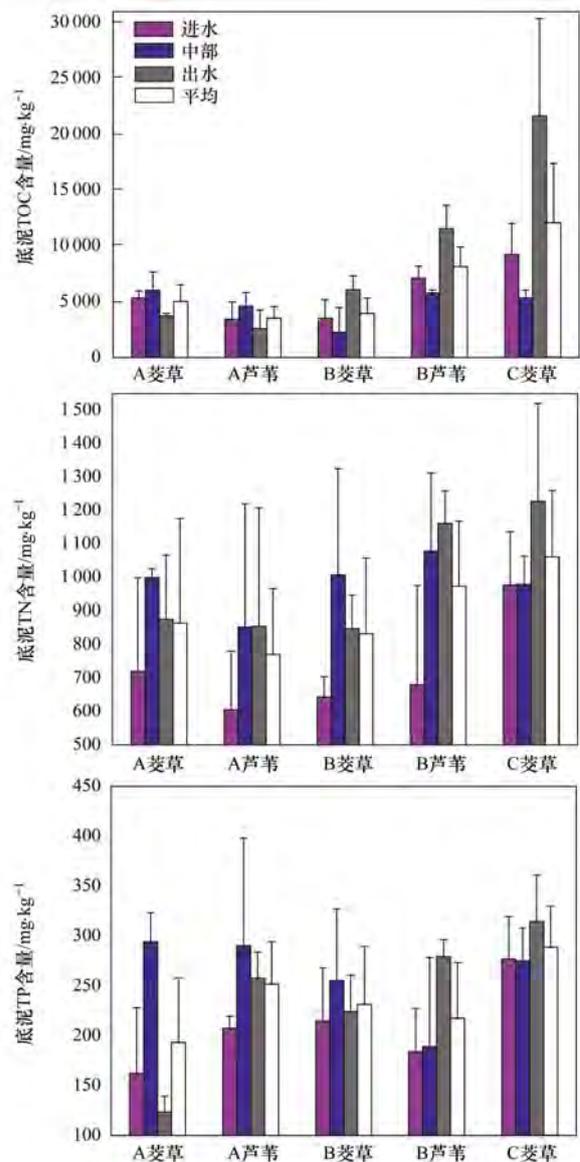


图 3 底泥中 TOC、TN 和 TP 含量

Fig. 3 TOC, TN, and TP contents of sediments

表 2 顺水流方向底泥 TOC、TN 和 TP 的含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Contents of TOC, TN, and TP in the downstream flow direction/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

位置	TOC	TN	TP
进水处	5 734.60 ± 1 690.07	725.37 ± 212.10	209.22 ± 46.84
中部	4 804.30 ± 1 389.81	983.27 ± 244.37	260.87 ± 73.07
出水处	9 111.00 ± 4 122.09	993.77 ± 230.60	239.96 ± 30.67

2.1.2 不同水深区域的底泥营养盐分布特征

不同水深区域的底泥营养盐分布规律呈现出随着上覆水深增大, 底泥营养盐含量升高. A 和 B 两

个区之间除水深外其它条件相似, B 区底泥的 TOC、TN 和 TP 含量分别比 A 区高 41.24%、

10.40% 和 0.85% (见表 3), 其中 TOC 在两个区之间存在显著差异 ($P < 0.05$).

表 3 不同水深区域底泥 TOC、TN 和 TP 的含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Contents of TOC, TN, and TP in sediments from different water depth areas/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

区域	水深/cm	TOC	TN	TP
A	30	4 283.75 ± 1 279.11	818.10 ± 259.66	222.68 ± 54.58
B	40	6 050.32 ± 1 569.78	903.21 ± 210.69	224.56 ± 56.92
C	50	1 2081.71 ± 5 300.81	1 061.40 ± 198.77	288.93 ± 41.05

2.1.3 不同植物区域的底泥营养盐分布特征

不同植物区域的底泥营养盐含量差异主要体现在不同的植物长势之间. 植物在 3 个区块的长势存在差异, 其中 C 区植物的生长最旺盛, 对 3 个区块的茭草区底泥营养盐含量进行对比, C 区茭草的 TOC、TN 和 TP 含量皆明显高于其它区, 分别比 A 区茭草高 140.36%、22.69% 和 49.34%, 比 B 区茭草高 205.73%、27.39% 和 24.79%, 其中 TOC 均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 而 A 和 B 区不同植物种类之间的底泥营养盐含量差异没有明显规律 (见图 3).

2.1.4 底泥营养盐污染状况评价

各采样位置底泥营养盐污染状况评价结果如表 4 所示. 从中可见, 各采样位置底泥有机指数为 0.02 ~ 0.25, 平均为 0.06, 底质环境为轻度有机污染, 只有 C 区出水处达到了中度污染. 底泥有机氮为 0.06% ~ 0.12%, 平均为 0.09%, 氮污染属中度污染, 仅 A 和 B 区进水处表现轻度污染. 底泥总磷的污染指数为 0.21 ~ 0.52, 平均为 0.39, 属清洁状态, 只有 C 区出水处出现轻度污染. 盐龙湖表流湿地的 C 区底泥污染程度较严重, 特别是其出口处.

表 4 底泥污染程度评价结果

Table 4 Evaluation results for the sediment pollution degree

采样位置	有机指数评价结果			有机氮评价结果			TP 评价结果			
	Org-index	类型	程度	Org-N/%	类型	程度	P_i	类型	程度	
A 进水	茭草	0.04	I	清洁	0.07	III	中度	0.27	I	清洁
	芦苇	0.02	I	清洁	0.06	II	轻度	0.35	I	清洁
A 中部	茭草	0.06	II	轻度	0.09	III	中度	0.49	I	清洁
	芦苇	0.04	I	清洁	0.08	III	中度	0.48	I	清洁
A 出水	茭草	0.03	I	清洁	0.08	III	中度	0.21	I	清洁
	芦苇	0.02	I	清洁	0.08	III	中度	0.43	I	清洁
B 进水	茭草	0.02	I	清洁	0.06	II	轻度	0.36	I	清洁
	芦苇	0.05	II	轻度	0.06	II	轻度	0.31	I	清洁
B 中部	茭草	0.02	I	清洁	0.10	III	中度	0.43	I	清洁
	芦苇	0.06	II	轻度	0.10	III	中度	0.32	I	清洁
B 出水	茭草	0.05	II	轻度	0.08	III	中度	0.37	I	清洁
	芦苇	0.13	II	轻度	0.11	III	中度	0.47	I	清洁
C 进水	茭草	0.09	II	轻度	0.09	III	中度	0.46	I	清洁
C 中部	茭草	0.05	II	轻度	0.09	III	中度	0.46	I	清洁
C 出水	茭草	0.25	III	中度	0.12	III	中度	0.52	II	轻度
平均		0.06	II	轻度	0.09	III	中度	0.39	I	清洁

2.2 长期运行后表面流人工湿地底泥营养盐释放规律

图 4 是柱状芯样静态释放实验不同采样位置 COD、TN 和 TP 的释放浓度趋势. 5 个柱样 COD 的释放浓度处于波动下降的状态, 在第 20 d 后, 释放过程趋于平稳. C 茭草的上覆水 COD 浓度整体高于其他 4 个柱样, 与其它 4 个柱样均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 其最大值在第 7 d 取得, 为 $52.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, A 茭草、A 芦苇、B 茭草和 B 芦苇则在第 1 ~ 2 d 达到最大值, 约为 $5.69 \sim 6.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 5 个柱样 TN 的释放浓度都表现出前 10 d 上覆水 TN 浓

度波动幅度很大, 10 d 之后上覆水-底泥体系逐渐达到平衡. C 茭草的上覆水 TN 浓度与其它 4 个差距较大, 与其它 4 个柱样均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 其上覆水浓度在第 2 d 就达到 $9.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 一直到第 7 d 都维持在一个较高的水平, 最高值为 $9.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其它柱样的上覆水浓度最高值也在第 7 d 取得, 约为 $3.34 \sim 3.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 5 个柱样 TP 的释放浓度变化趋势与 TN 类似, 0 ~ 10 d 为波动阶段, 10 d 之后逐渐稳定. 浓度最大值都在第 7 d 取得, 约为 $0.20 \sim 0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 A 茭草最高.

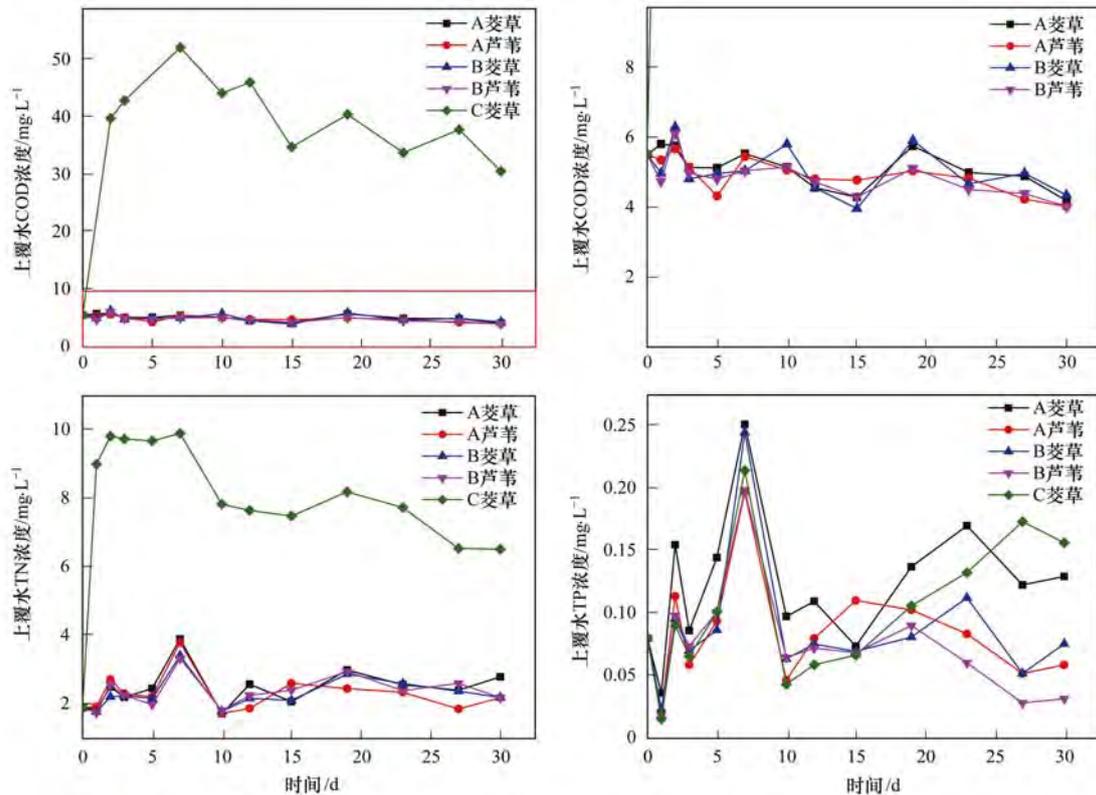


图4 COD、TN和TP的释放浓度趋势

Fig. 4 Trends in release concentrations of COD, TN, and TP

底泥 COD、TN 和 TP 的平衡释放速率如表 5 所示. 5 个柱样 COD 的平衡释放速率范围为 $-57.05 \sim 66.68 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 除了 C 茭草为释放状态且释放速率较高, 其它 4 个柱样都为吸附状态. TN 的平衡释放速率约为 $-9.03 \sim 15.53 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 其中 A 茭草和 C 茭草为释放状态且 C 茭草的释放速率最高, 其余 3 个柱样为吸附状态. TP 的平衡释放速率范围为 $-3.30 \sim 0.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 除了 C 茭草为释放状态外, 其它 4 个柱样都为吸附状态.

表 5 底泥 COD、TN 和 TP 的平衡释放速率/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ Table 5 Equilibrium release rates of COD, TN, and TP in sediments/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

采样位置	COD	TN	TP
A 区茭草	-30.18	5.70	-1.78
A 区芦苇	-25.79	-9.03	-2.01
B 区茭草	-57.05	-7.07	-2.25
B 区芦苇	-39.60	-5.86	-3.30
C 区茭草	66.68	15.53	0.11

3 讨论

3.1 表面流人工湿地底泥营养盐长期累积特征及影响因素

顺着水流方向, 表流湿地底泥营养盐含量表现升高趋势. 联系底泥的颗粒粒径 (见图 5), 底泥中细颗粒的占比顺着水流方向逐渐增大, 粗颗粒的占

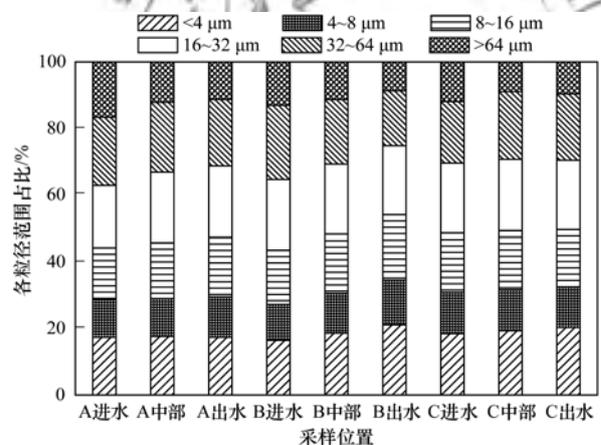


图 5 底泥的粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution of sediments

比逐渐减小, 分析营养盐含量与粒径之间的相关性 (见表 6), 发现底泥中 TOC、TN 和 TP 含量与粒径小于 $4 \mu\text{m}$ 的细颗粒都呈正相关关系, 而与粒径大于 $64 \mu\text{m}$ 的颗粒基本呈负相关关系. 细颗粒所占比例较高的沉积物, 污染程度也较高, 底泥中较细的黏粒部分对污染物有较强的吸附能力, 这与李青芹等^[19]的研究结果一致. Di Luca 等^[20]在分析位于阿根廷的两处人工湿地底泥中总磷含量时发现, 其出水处的总磷累积高于进水处. 这与盐龙湖的结果存在差别, 分析其原因主要是水力负荷的不同造成的, 这两处阿根廷人工湿地水力负荷约 $0.05 \sim 0.07$

$\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$, 远小于盐龙湖, 因此污水能在湿地中停留较长时间得到充分净化, 使得在出口处底泥的磷累

积较少. 盐龙湖 A 和 B 区也出现了相同的特征, 侧面反映出其在长期运行后仍有较良好的除污能力.

表 6 底泥各营养盐含量与粒径的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between the nutrient salt content and grain size of sediment

采样位置	TOC		TN		TP	
	<4 μm	>64 μm	<4 μm	>64 μm	<4 μm	>64 μm
A 区茭草	0.741	0.379	0.818	-0.820	0.980	-0.149
A 区芦苇	0.917	0.063	0.475	-0.989	0.784	-0.851
B 区茭草	0.680	-0.745	0.534	-0.453	0.186	-0.095
B 区芦苇	0.753	-0.811	0.923	-0.884	0.903	-0.938
C 区茭草	0.756	-0.088	0.888	-0.318	0.866	-0.276

对于不同水深区域, 底泥营养盐含量随着水深增大而升高, 且碳受影响程度更深. 一般来说, 表流湿地主要依靠水面传递复氧, 各区块的溶解氧是随水深的增加而降低的. 底泥中氧含量高, 有利于有机碳的矿化作用, 因此在水深较浅的区域, 有机碳的降解情况更好, 所以随着水深减小 TOC 含量明显减小.

对于不同种类的植物, 就芦苇和茭草而言, 两种不同的植物种类对表流湿地底泥的营养盐累积的影响较小. 而对于不同长势的植物, 生长最旺盛的 C 区底泥的营养盐含量明显高于 A 和 B 区, C 区种植植物中茭草占据主要优势, 密度大, 根茎粗壮, 收割后的植物残体遗留的营养物质含量更多, 同时该区还出现了严重的植物倒伏情况, 多年累积下底泥营养盐含量较高. 关秀婷^[21]的研究中, 石佛寺人工湿地运行 4 a 后底泥污染较盐龙湖略轻, 主要是由于其种植植物种类多, 优势种群有芦苇、蒲草和荷花等, 密度适宜. 张金勇等^[22]的研究发现水深 50 cm 时湿地植物生理活动最为旺盛. 这与盐龙湖表流湿地 C 区植物生长旺盛的情况相符, 但其过度生长后残体腐解对底泥的污染甚至超过其吸收净化产生的正效应. 另一方面, 本次调查正处于植物的死亡枯萎期也是 C 区底泥污染最严重的重要原因, 底泥中营养盐受到植物腐解因素的影响很大, 其含量呈增长趋势^[23], 因此 C 区过度生长的植物加重底泥污染的情况凸显出来. 盐龙湖表流湿地底泥的氮污染及有机污染相对磷污染更严重也可说明植物残体是底泥中营养盐累积的重要来源, 碳和氮都是生物体的有机组成元素, 在底泥中的累积具有同源性.

与其它研究区对比分析后发现, 表流湿地底泥营养盐的累积水平受进水水质的影响也较大. Vergeles 等^[24]对乌克兰一处人工湿地运行 8 a 后的沉积物分析得 TOC、TN 和 TP 含量分别为 21 900、4 100 和 1 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别比盐龙湖高 533.76%、355.15% 和 234.35%, 该湿地处理的是生活污水,

多年平均进水的 COD、TN 和 TP 浓度分别为 209.2、2.7 和 6.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而盐龙湖表流湿地的分别为 6.1、1.7 和 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 进水水质较好是盐龙湖底泥污染程度相对较轻的重要原因.

3.2 表面流人工湿地底泥营养盐释放机制

在前人关于河湖底泥释放的研究中, 静态释放实验的上覆水浓度大多表现为快速升高之后稳定^[25, 26], 而盐龙湖表流湿地底泥释放过程中, A 和 B 区底泥释放趋势基本表现为波动上升再下降之后趋于平稳, 较其它研究区的情况略有不同, 主要是因为湿地上覆水水质较好且底泥污染程度相对较轻. 在自然条件下, 底泥营养盐的吸附与释放同时发生, 当上覆水营养盐浓度低于底泥营养盐释放临界浓度值时, 底泥中的营养盐释放表现更强, 反之则吸附表现更强. 而底泥营养盐释放临界浓度值与底泥营养盐含量呈正相关关系, 底泥营养盐含量越高, 临界浓度值越大^[27]. 本实验中上覆水中 COD、TN 和 TP 浓度分别为 5.52、1.90 和 0.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 除了 TN 为地表水 IV 类标准外, 其它都达到了 II 类标准, 而底泥间隙水浓度较高, 营养盐向上覆水中扩散, 上覆水营养盐浓度升高. 又由于盐龙湖的底泥情况较好, 底泥营养盐释放临界浓度值较低, 上覆水浓度升高后, 底泥的吸附表现逐渐明显, 吸附与释放交替发生, 上覆水浓度波动是该过程的综合表现. 随着时间推移, 底泥的吸附能力大于释放能力, 上覆水营养盐浓度逐渐降低之后趋于稳定.

盐龙湖表流湿地底泥的释放速率与其它研究区相比(见表 7), COD 的释放速率在 3 个区块间差异大, C 区底泥 COD 的释放速率较高. TN 和 TP 的释放速率都与轻度营养型的尹府水库的情况相近, 处于一个较低的水平, 仅高于博斯腾湖. 总体来说盐龙湖表流湿地底泥经过 5 年累积后的释放情况具有空间差异性, 其中 A 和 B 区释放程度较低, 而 C 区底泥释放程度较高. 底泥 TOC、TN 和 TP 含量与其 COD、TN 和 TP 的平衡释放速率之间的相关系数分别为 0.833、0.724 和 0.708, 表现出强相关关系,

湿地底泥吸附释放情况与其本底值密切相关。

但综合底泥污染状况和释放规律来看,盐龙湖 C 区底泥的有机污染及氮污染为轻度至中度,其 COD 和 TN 释放浓度、释放速率却过高. C 区底泥中 TOC 的含量为 A 和 B 区的 2~3 倍,而其释放实验中上覆水 COD 的浓度却是 A 和 B 区的 8 倍左右, C 区的 TN 也出现了同样的释放浓度极高的情况. 原因主要是 C 区的茭草生长过于旺盛,其须根粗壮,且茎基部的节上有大量不定根,在采集底泥柱状芯样时无法避免地携带了较多植物残体,这对上覆水水质会产生较大影响. 亓鹏玉等^[28]研究了挺水植物腐解对水体水质的影响,发现含有植物残体的底泥 TN 释放浓度在 66 d 实验期内皆高于对照,而 TP 的释放浓度在第 30d 时就基本与对照的情况一致. 林志军^[29]也发现挺水植物腐解会使水体中 COD 浓度在较长时间保持在一个很高的水平. 本实验开始时距植物的收割已有约 25 d,生物体内的碳和氮较磷分解所需时间更长,因此出现释放实验中 C 区上覆水 COD 和 TN 浓度极高的情况. 在静态释放实验进行 80 d 后,又进行了补测,发现 A 和 B 区上覆水营养盐浓度以及 C 区 TP 浓度的与实验期末时较接近,而 C 区上覆水的 COD 和 TN 浓度出现了一定程度的下降,分别为 $8.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 碳的释放基本保持了与底泥含量一致的倍比关系,而氮还受到硝化反硝化的条件限制. 表流湿地的底泥营养盐释放与其它河湖相比最大的特点在于种植的植物,底泥中包含的植物残体会导致营养盐释放更强烈,特别是作为生物体有机组成元素的碳和氮.

表 7 其他研究区底泥营养盐的释放速率情况/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

研究区	Table 7 Release rate of nutrients in sediments of other study areas/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$		
	COD	TN	TP
博斯腾湖 ^[30]	—	0.25	0.003 6
喻家湖 ^[31]	—	80~83	-2~5
太湖 ^[32]	—	—	2.80~7.03
红枫湖 ^[33]	—	—	0.59~1.25
里运河 ^[34]	7~20	—	—
尹府水库 ^[35]	—	7.28~20.02	-0.62~-0.25
大河口水库 ^[36]	—	—	0.33~1.67
山仔水库 ^[37]	—	72.52~128.37	—

4 结论

(1) 盐龙湖表流湿地底泥整体属于中度污染范畴,其中总磷属清洁状态,有机污染属轻度污染,氮污染属中度污染. 表流湿地底泥营养盐累积水平主要受进水条件、水深和植物作用等影响. 顺着水流方向,表流湿地底泥营养盐含量表现升高趋势;

随着表流湿地上覆水水深增大,底泥营养盐含量升高,其中碳受影响程度更深;表流湿地植物的生长情况过好,在长期运行后底泥中累积的营养盐含量越高,在植物的死亡枯萎期该现象更明显.

(2) 盐龙湖表流湿地底泥释放趋势基本表现为先升后降,在 20 d 后基本达到平稳,其趋势变化是底泥吸附与释放的综合表现,主要受底泥营养盐的累积水平和上覆水水质的影响. 底泥的平衡释放速率具有空间差异性,主要受湿地底泥本底值影响. 表流湿地底泥中存在的植物残体,会加剧营养盐的释放程度.

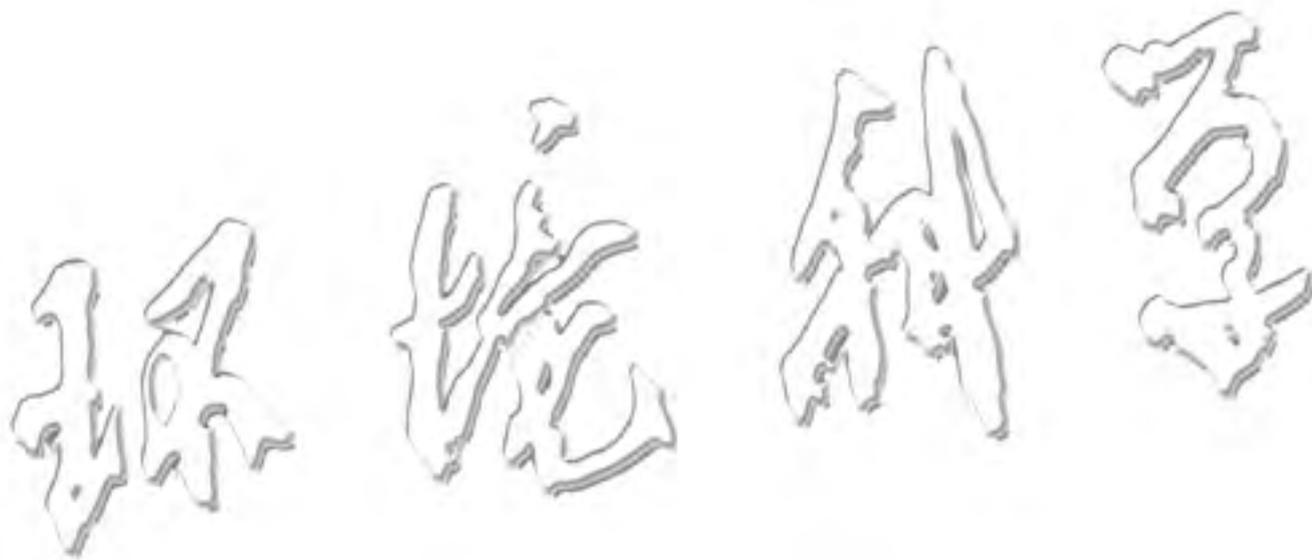
(3) 盐龙湖湿地处理的是微污染河道水,所以在运行 5 a 后的底泥状况较其它处理污水的研究区更好,而过度生长的植物加重了底泥的负担. 湿地植物种植需适宜,密度不应高于 $90 \text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$,湿地水深约 30 cm 时有利于底泥维持较好的状态.

参考文献:

- [1] Wu H M, Zhang J, Ngo H H, *et al.* A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **175**: 594-601.
- [2] Lv J J, Hou L A, Zhang L Y, *et al.* Long-term performance of aerated and planted constructed wetland treatment on domestic wastewater[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2017, **64**: 64-71.
- [3] Mucha Z, Wójcik W, Józwiakowski K, *et al.* Long-term operation of Kickuth-type constructed wetland applied to municipal wastewater treatment in temperate climate [J]. *Environmental Technology*, 2018, **39**(9): 1133-1143.
- [4] 王琦. 不同环境条件下辽河干流表层沉积物氮磷释放规律研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2018.
Wang Q. Study on the release of nitrogen and phosphorus in the surface sediments of Liaohe River under different environmental conditions[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2018.
- [5] Qualls R G, Heyvaert A C. Accretion of nutrients and sediment by a constructed stormwater treatment wetland in the Lake Tahoe Basin[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2017, **53**(6): 1495-1512.
- [6] He J, Deng W M, Chen C Y, *et al.* Ammonia nitrogen adsorption and release characteristics of surface sediments in Dianchi Lake, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(5): 3917-3927.
- [7] Al-Rubaei A M, Engström M, Viklander M, *et al.* Long-term hydraulic and treatment performance of a 19-year old constructed stormwater wetland-Finally matured or in need of maintenance? [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 73-82.
- [8] 黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 166-172.
Huang T L, Liu F, Shi J C. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 166-172.
- [9] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.
Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions,

- sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [10] Zhang Y, He F, Liu Z S, *et al.* Release characteristics of sediment phosphorus in all fractions of West Lake, Hang Zhou, China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 645-651.
- [11] 苏鸿洋. 中国村镇分散生活污水处理技术现状[J]. *给水排水*, 2015, **41**(S1): 197-201.
- [12] 黄训强. 晋安区人工湿地设计负荷与处理能力关系的研究[J]. *环境与发展*, 2017, (4): 11-13.
- Huang X Q. Study on the relationship between design load and processing capacity of constructed wetland in Jin'an District[J]. *Environment and Development*, 2017, (4): 11-13.
- [13] 钟小燕, 王船海, 庾从蓉, 等. 流速对太湖河道底泥泥沙、营养盐释放规律影响实验研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(8): 2862-2869.
- Zhong X Y, Wang C H, Yu C R, *et al.* Characteristics of sediments and nutrient release under different flow velocity[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8): 2862-2869.
- [14] Ding Y Q, Sun L M, Qin B Q, *et al.* Characteristics of sediment resuspension in Lake Taihu, China; a wave flume study[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **561**: 702-710.
- [15] Yu Z B, Zhong X Y, Yu C R, *et al.* Characteristics of nutrient release from sediments under different flow conditions [J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2017, **29**(1): 70-77.
- [16] 李传红, 谭镇, 刘正文, 等. 惠州西湖沉积物营养盐的释放[J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 537-541.
- Li C H, Tan Z, Liu Z W, *et al.* Nutrient release in the sediments of Huizhou West Lake[J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(2): 537-541.
- [17] 王莉君, 吴思麟. 南京黑臭河道底泥污染特征及评价[J]. *科学技术与工程*, 2018, **18**(3): 117-122.
- Wang L J, Wu S L. Pollution characteristics and contamination assessment of sediment from black-odor rivers in Nanjing city [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(3): 117-122.
- [18] Mudroch A, Azcue J M. *Manual of aquatic sediment sampling* [M]. Boca Raton, Florida; Lewis Publishers, 1995.
- [19] 李青芹, 霍守亮, 咎逢宇, 等. 我国湖泊沉积物营养盐和粒度分布及其关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(12): 2390-2397.
- Li Q Q, Huo S L, Zan F Y, *et al.* The distribution of nutrients and particle size, their correlations in surface sediments of different lakes, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(12): 2390-2397.
- [20] Di Luca G A, Maine M A, Mufarrije M M, *et al.* Phosphorus distribution pattern in sediments of natural and constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2017, **108**: 227-233.
- [21] 关秀婷. 水生植物对石佛寺人工湿地营养物质含量影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- Guan X T. Research for the influence of aquatic plants to nutritions in Shifosi constructed wetland [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [22] 张金勇, 张建, 刘建, 等. 水深对表面流人工湿地污染河水处理系统运行效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(3): 799-803.
- Zhang J Y, Zhang J, Liu J, *et al.* Influence of depth on running effect of surface-flow constructed wetland treating polluted river water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(3): 799-803.
- [23] 周林飞, 关秀婷, 王铁良. 几种水生植物对湿地底泥中营养物质含量变化的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(1): 278-284.
- Zhou L F, Guan X T, Wang T L. Influence of several aquatic plants on nutrient content in bottom mud of wetland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(1): 278-284.
- [24] Vergeles Y, Butenko N, Ishchenko A, *et al.* Formation and properties of sediments in constructed wetlands for treatment of domestic wastewater[J]. *Urban Water Journal*, 2016, **13**(3): 293-301.
- [25] 郭红兵, 陈荣, 王晓昌. 不同补水方式下翠湖沉积物氮磷释放特性研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(2): 18-23.
- Guo H B, Chen R, Wang X C. Characteristics of nitrogen and phosphorus release from urban water sediment of Cuihu Lake regarding different water replenishment approaches [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(2): 18-23.
- [26] 周成. 湖泊受污底泥营养物释放机理及水质影响试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- Zhou C. Experimental study on mechanism of nutrient release from lake polluted sediment and impact on water quality [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [27] 雷沛, 张洪, 王超, 等. 沉积物-水界面污染物迁移扩散的研究进展[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1489-1508.
- Lei P, Zhang H, Wang C, *et al.* Migration and diffusion for pollutants across the sediment-water interface in lakes: a review [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1489-1508.
- [28] 亓鹏玉, 刘金明. 挺水植物芦苇的腐解对水体水质的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2016, **6**(6): 591-599.
- Qi P Y, Liu J M. The influence of bulrush litter decomposition on water quality [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, **6**(6): 591-599.
- [29] 林志军. 三种挺水植物腐烂分解及其污染物释放规律的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- Lin Z J. A study on the decomposition of three kinds of emerged plants and the release of pollutants [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [30] 高湘, 刘海滨, 赵欣悦, 等. 博斯腾湖底泥污染物释放的模拟实验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2013, **45**(1): 121-125.
- Gao X, Liu H B, Zhao X Y, *et al.* Simulation test of pollutants release from sediments of the Bosten Lake[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2013, **45**(1): 121-125.
- [31] 李鹏飞. 喻家湖底泥氮磷形态及释放规律研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- Li P F. Study of the form and release law of nitrogen and phosphorus in the sediment of Yujia Lake [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [32] 章磊. 太湖草、藻型湖泊沉积物磷的赋存形态特征、埋藏规律及内源负荷风险比较研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- Zhang L. Characteristics of phosphorus speciation, burial patterns and endogenous load in sediment of phytoplankton and macrophyte dominated zones in Taihu Lake [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2016.
- [33] 张红, 陈敬安, 王敬富, 等. 贵州红枫湖底泥磷释放的模拟实验研究[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(2): 243-251.
- Zhang H, Chen J A, Wang J F, *et al.* A simulation study on the release of phosphorus from sediments in Lake Hongfeng, Guizhou Province, China [J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(2): 243-251.

- [34] 王宁新, 李勇. 里运河底泥 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放对水质的影响实验[J]. 南水北调与水利科技, 2007, **5**(6): 84-86.
Wang N X, Li Y. Influence experiment of release of COD_{Cr} and $\text{NH}_3\text{-N}$ in sediment on water quality of the Liyun River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, **5**(6): 84-86.
- [35] 周骏, 陈小兰, 李松, 等. 典型山区轻度营养型水库底泥氮磷释放规律[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2018, **39**(1): 65-72.
Zhou J, Chen X L, Li S, *et al.* Release mechanism of nitrogen and phosphorous form sediments of the light eutrophication reservoir in the typical mountainous area[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, **39**(1): 65-72.
- [36] 卢俊平, 马太玲, 刘廷玺, 等. 大河口水库底泥释磷强度环境影响机理研究[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(7): 72-78.
Lu J P, Ma T L, Liu T X, *et al.* Study on sediment phosphorus release mechanism of the environmental impact in Dahekou Reservoir[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(7): 72-78.
- [37] 刘怡靖. 山仔水库表层沉积物氮负荷与释放研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2015, **10**(2): 49-55.
Liu Y J. Internal loadings and fluxes of surface sediment nitrogen in Shanzi Reservoir [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2015, **10**(2): 49-55.



CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹⁵ N-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)