ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 10 期
2018 年 10 月 15 日

目 次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值 …… 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏(4393)
2015 年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征 …… 张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟(4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用 …… 邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊(4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物(VOCs)含量水平及组分特征 …… 高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓(4414)
2014～2016 年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析 …… 王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军(4422)
北京市大气环境 $PM_{2.5}$ 和 PM_1 及其碳质组分季节变化特征及来源分析 …… 樊啸辰, 郎建垒, 程水源, 王晓琦, 吕喆(4430)
南京春季北郊地区大气 $PM_{2.5}$ 中主要化学组分及碳同位素特征 …… 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰(4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物 …… 马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉(4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系 …… 王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧(4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO_x 排放特征 …… 杨强, 胡磬遥,黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟(4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选 …… 李奇锋, 吕永龙, 王佩, 张悦清(4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析 …… 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福(4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征 …… 宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽(4490)
脱甲河水系 N_2O 关键产生过程及氮素来源探讨 …… 赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵(4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响 …… 王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成(4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复 …… 史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林(4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析 …… 丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华(4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化 …… 范诗雨,秦纪洪,刘堰杨,孙辉(4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征 …… 林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成(4539)
基于 $\delta^{15}N$ 和 $\delta^{18}O$ 的农业区地下河硝酸盐污染来源 …… 盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇(4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征 …… 彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏(4556)
锆负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为 …… 梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强(4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制 …… 张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥(4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性 …… 李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪(4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除 …… 李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉(4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响 …… 刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉(4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能 …… 杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉(4612)
低温下 A^2/O-BAF 反硝化除磷脱氮特性 …… 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志(4621)
O_3-BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析 … 张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅(4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析 …… 吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中(4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响 …… 温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博(4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制 …… 张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧(4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析 …… 杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星(4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析 …… 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红(4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价 …… 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐(4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响 …… 黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅(4694)
不同肥料施用对设施菠菜地 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响 …… 山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎(4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响 …… 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠(4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响 …… 王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军(4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征 …… 陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶(4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制 …… 陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛(4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果 …… 刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏(4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响 …… 万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉(4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌 …… 杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健(4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合As(Ⅲ)的氧化作用 …… 李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞(4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制 …… 杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖(4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 *Zobellella* sp. B307 的分离及脱氮特性 …… 白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岿然(4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17β-雌二醇的降解特性 …… 吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如(4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响 …… 李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提(4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析 …… 任省涛, 郭夏丽, 芦阿虔, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩,王连忠, 张宝宝(4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤 …… 平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军(4825)
生活垃圾焚烧飞灰矿物学特性及重金属分布 …… 李建陶, 曾鸣(4834)
《环境科学》征订启事(4429) 《环境科学》征稿简则(4471) 信息(4529, 4777, 4816)

防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征

林修咏[1,2], 王书敏[1,2*], 李强[1], 谢云成[1]

(1. 重庆市环境材料与修复技术重点实验室, 永川 402160; 2. 福州大学土木工程学院, 福州 350116)

摘要: 构建了两套防渗型生物滞留中试系统, 在 2017 年 3 ~ 4 月期间, 跟踪监测了系统在低温小强度降雨条件下的径流水质特点, 并同步分析了降雨径流的三维荧光光谱特征. 系统降雨径流水质监测结果表明, 经系统净化后, 出水污染物浓度波动较小, 对NH_4^+-N和 TP 均有相对稳定的去除效率, 可分别达到 78.38% ~95.03% 和 72.04% ~76.04%. 荧光光谱特征分析表明, 生物滞留系统出水中的主要溶解性有机物(dissolved organic matters, DOMs)为蛋白类物质和类腐殖质物质, 主要来自生物或水生细菌代谢物; 系统对于Ⅰ区、Ⅱ区蛋白类荧光有机物和类富里酸具有较好的去除效果, 去除率可分别达到 57.33% ~61.30%、29.82% ~31.28% 和 35.55% ~43.16%. 径流水质与 DOMs 相关性分析表明, 系统径流出水中的 TN、TP 和 TOC 均与芳香类蛋白质含量呈显著正相关关系, 而NO_3^--N和NH_4^+-N与芳香类蛋白质含量呈显著负相关关系; TN 浓度均与Ⅳ区 DOMs(微生物代谢产物)和Ⅴ区 DOMs(类胡敏酸)呈显著负相关关系.

关键词:生物滞留系统; 降雨径流; 水质; 溶解性有机物; 三维荧光

中图分类号: X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)10-4539-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201801074

Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells

LIN Xiu-yong[1,2], WANG Shu-min[1,2*], LI Qiang[1], XIE Yun-cheng[1]

(1. Chongqing Key Laboratory of Environmental Material and Restoration Technology, Yongchuan 402160, China; 2. Department of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Bioretention cells have become one of the most popular devices in urban stormwater runoff management for their high efficiency in reducing runoff volume and pollution loads. However, bioretention cells are unstable in nutrient pollutant removal, as is verified by many cases, especially at low temperatures. Dissolved organic matters (DOMs) plays an important role in denitrification, but the three-dimensional fluorescence characteristics of stormwater runoff in bioretention field cells are poorly understood, so to improve the performance of bioretention cells in nutrient pollutants control, the authors determined that it was necessary to clarify the characteristics of three-dimensional fluorescence of stormwater runoff from bioretention cells and explain their relationship to water quality. To be applicable to urban landuse in mountainous cities, two field lined bioretention cells were constructed, and, from March to April in 2017, while temperatures were still low, water quality and three-dimensional fluorescence of stormwater runoff were analyzed during low rainfall intensity precipitation events. Analysis results showed that the effluent pollutant concentrations had low fluctuation after purification by the bioretention cells, and both cells showed relatively stable removal rates for NH_4^+-N and total phosphorus (TP; i. e., 78.38%-95.03% and 72.04%-76.04%, respectively). Analysis of fluorescence spectra showed that the DOMs in the runoff from the two cells was mostly made up of protein and humic substances, mainly of biological origin or aquatic bacterial metabolites. Both cells performed well in the removal of protein at Ⅰ, protein at Ⅱ and fulvic acid (i. e., the removal rates could reach 57.33%-61.30%, 29.82%-31.28%, and 35.55%-43.16% respectively). Correlation analyses between water quality and DOM showed that total Nitrogen (TN), TP and total organic carbon (TOC) were positively correlated with the protein content in runoff from the biorentention cells, while NO_3^--N and NH_4^+-N were negatively correlated with protein content. Meanwhile, TN was negatively correlated with DOMs in regions Ⅳ and Ⅴ of the cells.

Key words: bioretention cells; rainfall runoff; water quality; dissolved organic matters(DOMs); three-dimensional fluorescence

随着城市化进程的迅速推进, 城市降雨径流污染日益凸显[1,2], 尤其是营养性污染物质的面源排放, 已成为诱发城市黑臭水体的重要原因[3]. 生物滞留系统以其灵活的应用方式和高效的运行效果成为降雨径流污染调控的主打技术[4]; 然而, 该技术对氮磷的调控效果并不稳定, 尤其是在低温环境下[5,6]. DOMs 包括类蛋白、类氨基酸、类腐殖酸、碳水化合物等, 是水环境中最活跃的有机组分, 也是溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)的

收稿日期: 2018-01-08; **修订日期**: 2018-03-31

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51409030); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2016JCYJA2178, CSTC2015jcyjA20028); 重庆高校创新团队建设计划项目(CXTDX201601037); 永川区社会民生科技创新专项(Ycstc. 2017cb7001); 永川区水务局项目(2016-03)

作者简介: 林修咏(1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市暴雨径流调控, E-mail: anuoxx@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangshumin5103@sina.com

载体、异养微生物能源和碳源供体，不仅在水生生态环境中扮演重要角色[7,8]，而且与生物滞留系统的运行效能息息相关.

重庆属于山地城市，地形复杂，传统生物滞留池内部流态通常以平流为主，无法适应高差较大的地形，因此，设计了 U 型流态的生物滞留系统，强化了垂向流态的水力停留时间；同时，由于山地城市地质结构的复杂性和建筑群的高密度性，防渗型生物滞留系统可能更有必要关注[9,10]. 然而，目前国内对于生物滞留系统的应用研究普遍聚焦水量削减效能[11]，而对于水质净化效果则关注不足，研究基础更是薄弱，尤其是针对生物滞留系统径流 DOMs 的研究更是有待加强. 实验设计了防渗型 U 型流态生物滞留中试系统，为解决生物滞留系统夏秋季节运行效果较好，但是春季低温期间运行效果稍差的问题[12,13]，着重监测了 2017 年 3 ~4 月期间系统进出水的水质情况与荧光特征，旨在探明生物滞留系统在低温小强度降雨条件下场次降雨过程中的水质演变规律和有机组分分布特征，讨论降雨径流水质与有机质的关联特征，以期为生物滞留系统水质净化机制的深入探讨提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究对象

生物滞留中试系统在 2014 年建设于重庆文理学院(29°20′46.4″N，105°56′39.3″E)，长 4.0 m，宽 1.6 m，由排水层、过滤层和介质层构成. 排水层厚 300 mm，由粒径 1 ~3 cm 砾石组成；过滤层为 200 mm 的河砂，种植层为 800 mm 的砂土混合物(土∶砂 = 4∶6). 两组系统分别种植麦冬草(*Ophiopogon japonica*)(系统 A)和紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)(系统 B)为主，并随着培育过程中生长了一定比例的杂草，植物密度约 13 株·m^{-2}. 系统的进水来自面积 60 m^2 的屋顶(服务面积 10.7%)；屋面暴雨径流经排水立管收集后进入径流分流器和在线流量计Ⅰ，然后汇入缓冲池，缓冲池底部和生物滞留系统(设置 60 cm 蓄水层)连通，最后暴雨径流经在线流量计Ⅱ测量后排出，见图 1 所示.

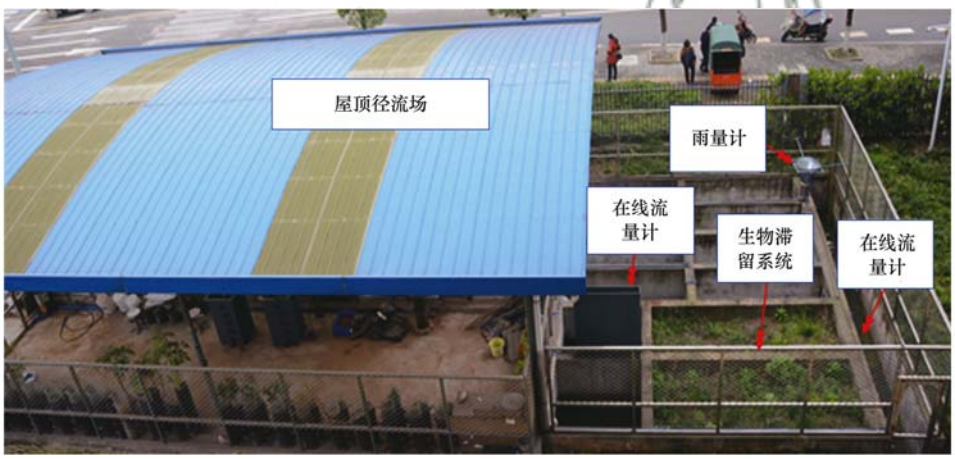

图 1 生物滞留系统现场示意

Fig. 1 Field photo of bioretention cells

1.2 采样与检测方法

于 2017 年 3 月和 4 月跟踪监测了 3 场降雨事件(表 1). 水样采集完毕后，立即按照文献[14]的要求进行测定 TN、TP、氨氮和硝态氮. 水样经 0.45 μm 滤膜过滤后测定 TOC 和三维荧光，TOC 用 TOC 分析仪测定(analytikjena multi N/C 2100s)，三维荧光用 F-7000 Hitachi 荧光光谱仪分析. 三维荧光的检测参数为：光源 150 W 氙灯、光电倍增管电压为 530 V、激发和发射狭缝宽度均为 5 nm、激发波长 E_x 扫描范围 200 ~400 nm，发射波长 E_m 扫描范围 250 ~550 nm、扫描速度12 000 nm·min^{-1}.

表 1 监测降雨事件雨情统计

Table 1 Statistics and hydrologic performance metrics for sampling events

日期(年-月-日)	气温/℃	间隔时间/d	降雨量/mm	降雨持续时间/h	降雨强度/mm·min^{-1}
2017-03-24	12	2	2.14	3.33	0.01
2017-03-30	14	3	2.24	6.82	0.01
2017-04-12	17	1	0.51	1.97	0.01

1.3 分析方法

(1)系统出水的综合去除率计算公式

$$R = \frac{c_{\text{i-ave}} - c_{\text{o-ave}}}{c_{\text{i-ave}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R 为综合去除率, $c_{\text{i-ave}}$ 为进水污染物平均浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $c_{\text{o-ave}}$ 为出水污染物平均浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

(2)三维荧光数据通过减去空白值和内插值法去除瑞利散射和拉曼散射的影响, 荧光区域划分依据表 2. 利用 MATLAB 2009 中的 DOMfluor 工具箱进行荧光光谱区域积分分析(fluorescence regional integration, FRI)[15], 用于对比不同区域的积分体积, 以及对比分析各区域对应溶解性有机组分的相对含量. 三维荧光光谱制图采用 Origin 8.5, 相关性分析采用 SigmaPlot 12.5 进行.

表 2　荧光区域划分及其物质来源[16]

Table 2　Division of fluorescence and corresponding organic matter

区域	范围/nm	有机物组分
Ⅰ	$E_m < 330$, $E_x < 250$	芳香类蛋白质
Ⅱ	$330 < E_m < 380$, $E_x < 250$	芳香类蛋白质
Ⅲ	$380 < E_m < 500$, $E_x < 250$	类富里酸
Ⅳ	$E_m < 380$, $E_x > 250$	微生物代谢产物
Ⅴ	$E_m > 380$, $E_x > 250$	类胡敏酸

2　结果与讨论

2.1 场次降雨径流水质分析

(1)场次降雨径流水质时间分布特征

以 2017-04-12 降雨为例分析了场次降雨过程中污染物浓度变化历程(图 2). 对于屋面降雨径流, 初期径流的污染物浓度高于中后期, 总体上单调递减, 这与车伍等[16]的研究结果一致; 综合 3 场降雨水质情况, 对于屋面径流, 初期 30 min 时 TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、TP 的平均浓度分别为(3.00 ± 1.67)、(1.21 ± 0.43)、(0.46 ± 0.33)、(0.05 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别是末期径流的 1.23、1.59、1.41 和 2.62 倍. 降雨径流流经系统 A/B 后, 出水水质变化趋于平缓, 总体上并未呈现出逐渐降低的态势, 甚至呈现出后期污染物浓度高于初期径流的现象, 与团队前期小试研究结果类似[12]; 对于系统 A, 出水初期 30 min 后 TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、TP 的平均浓度分别为(2.50 ± 1.00)、(0.20 ± 0.25)、(0.66 ± 0.33)、(0.01 ± 0.01) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别是末期径流的 0.98、0.84、0.92 和 0.34 倍; 对于系统 B, 出水初期 30 min 后 TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、TP 的平均浓度分别为(2.52 ± 0.84)、(0.06 ± 0.06)、(0.44 ± 0.32)、(0.01 ± 0.01) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别是末期径流的 0.97、1.64、1.19 和 0.84 倍. 对于 TN 和 TP, 系统 A 和系统 B 均出现了末期径流浓度大于初期径流浓度的现象, 可能是由于降雨间隔期间, 系统净化作用使得系统内储存水的 TN、TP 浓度较低, 进而对屋面径流存在逐步稀释作用, 同时, 较低的水温限制了系统的硝化/反硝化速率, 促成了系统径流后期 TN 浓度的抬升.

(2)系统进出水污染物平均浓度比较分析

为进一步阐明系统进出水污染物浓度的变化情况, 统计了进出水平均浓度(表 3). 由表 3 可知, 对于所监测的 3 场降雨, 屋面降雨径流 TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、TP 的整体平均浓度分别为(2.37 ± 1.59)、(0.91 ± 0.47)、(0.44 ± 0.36)、(0.03 ± 0.03) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 系统 A 径流出水 TN、$NH_4^+$-N、$NO_3^-$-N、TP 的整体平均浓度分别为(2.64 ± 1.00)、(0.20 ± 0.22)、(0.61 ± 0.34)、(0.01 ± 0.01) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 系统 B 径流出水 TN、$NH_4^+$-N、$NO_3^-$-N、TP 的整体平均浓度分别为(2.57 ± 0.92)、(0.05 ± 0.04)、(0.35 ± 0.30)、(0.01 ± 0.01) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 系统 A 对$NH_4^+$-N和 TP 均有相对稳定的去除效率, 去除率可分别达到 78.38% 和 72.04%; 系统 B 对NH_4^+-N和 TP 的去除也有良好表现(去除率可分别达到 95.03% 和 76.04%), 可能是系统对NH_4^+-N和 TP 的吸附/吸收作用所致. 然而, 对于 TN 和NO_3^--N的调控, 两个系统的运行效果并不稳定, 尤其是对于 TON 的调控(系统 A 和系统 B 对 TN 的去除率分别为 −79.41% 和 −112.75%); 这说明, 系统对于氨氮的去除可能主要缘于微生物同化作用, 低水温使得系统无法在短时间内完成充分的氨氧化/反硝化, 同时也说明, 相对于磷素来说, 系统更容易发生氮素释放现象, 这与 Li 等[17]的研究类似.

表 3　生物滞留系统进出水污染物平均浓度/$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3　Arithmetic average concentrations of pollutants in cell inlet and outlets/$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

径流来源	TOC	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	TON	TP
屋面径流	10.17 ± 9.69	2.37 ± 1.59	0.91 ± 0.47	0.44 ± 0.36	1.02	0.03 ± 0.03
系统 A 出水	4.07 ± 4.14	2.64 ± 1.00	0.20 ± 0.22	0.61 ± 0.34	1.83	0.01 ± 0.01
系统 B 出水	20.68 ± 5.39	2.57 ± 0.92	0.05 ± 0.04	0.35 ± 0.30	2.17	0.01 ± 0.01

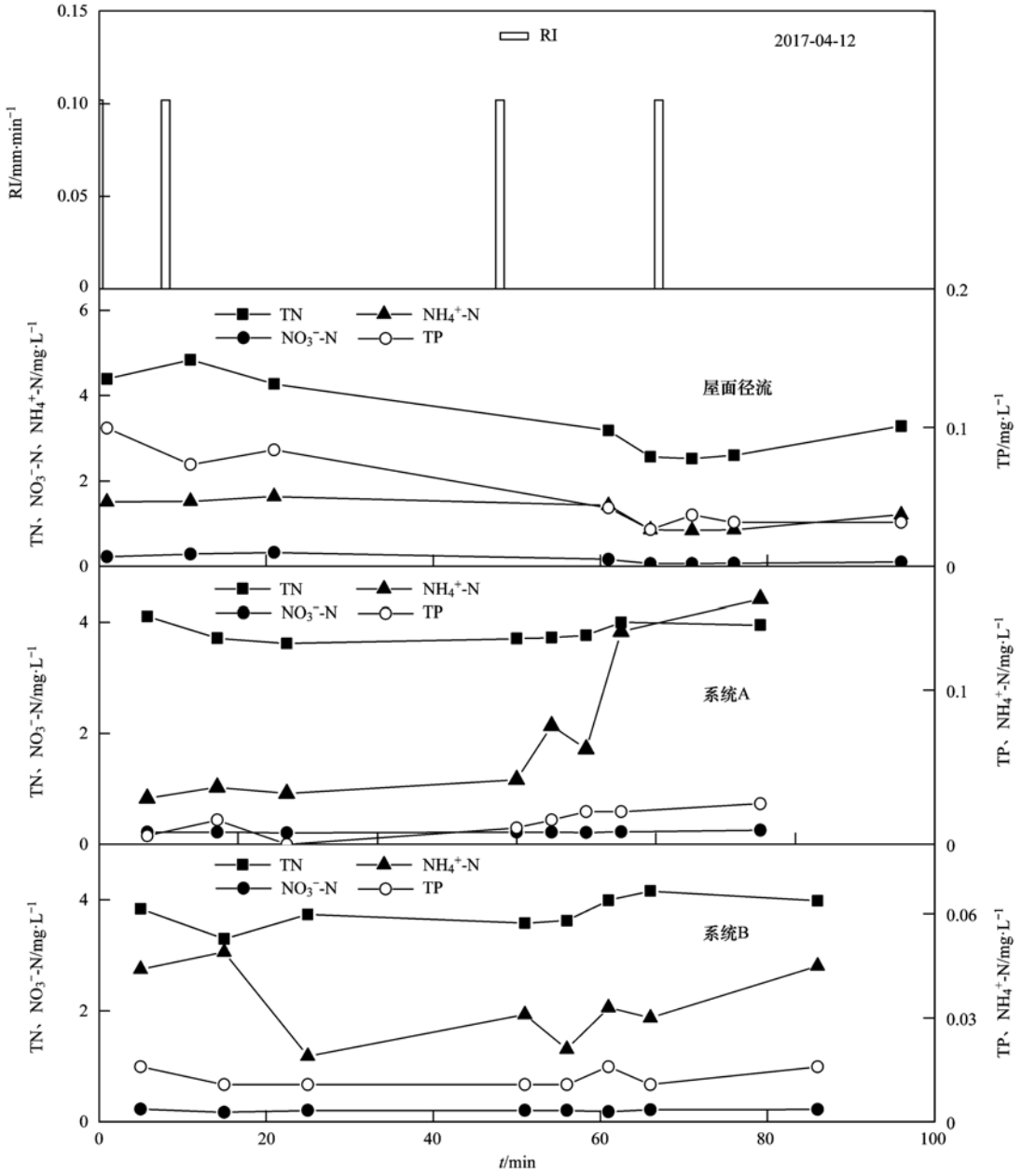

图 2 场次降雨径流生物滞留系统进出水水质变化历程

Fig. 2 Water quality at cell inlets and outlets during rainfall events

2.2 荧光光谱图特征

(1)荧光光谱图分析

以 2017-04-12 降雨为例分析了降雨径流三维荧光光谱特征(图 3). 由图 3 可知, 初期屋面径流的荧光峰位于Ⅲ区, 降雨末期屋面径流整体荧光峰存在明显削弱; 系统 A 和系统 B 出水中的有机组分均集中在Ⅱ和Ⅲ区, 出流末期的荧光强度显著增强, 且系统 A 出水的Ⅲ区荧光峰均明显强于系统 B. 因此, 屋面径流有机污染主要集中在降雨初期, 主要为类腐殖质; 系统出流则为蛋白类物质和类腐殖质物质[18], 这可能是导致出水有机氮浓度较高的主要原因.

(2) 荧光定量分析

荧光图分析易受主观识别误差限制, 对于成分结构复杂样品的分析具有较大影响, 往往通过荧光定量分析加以克服[19], 进而分析水生环境中微生物的活动和有机组分的相对含量之间的关系[20]. 两个系统的各个分区相对含量的平均调控下效率如图 4 所示. 可见, 系统 A 对于Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅳ区和Ⅴ区有机物质的平均去除率分别为 61.30%、29.82%、35.55%、1.98% 和 3.28%, 系统 B 分别为 57.33%、31.28%、43.16%、6.39% 和 15.52%,

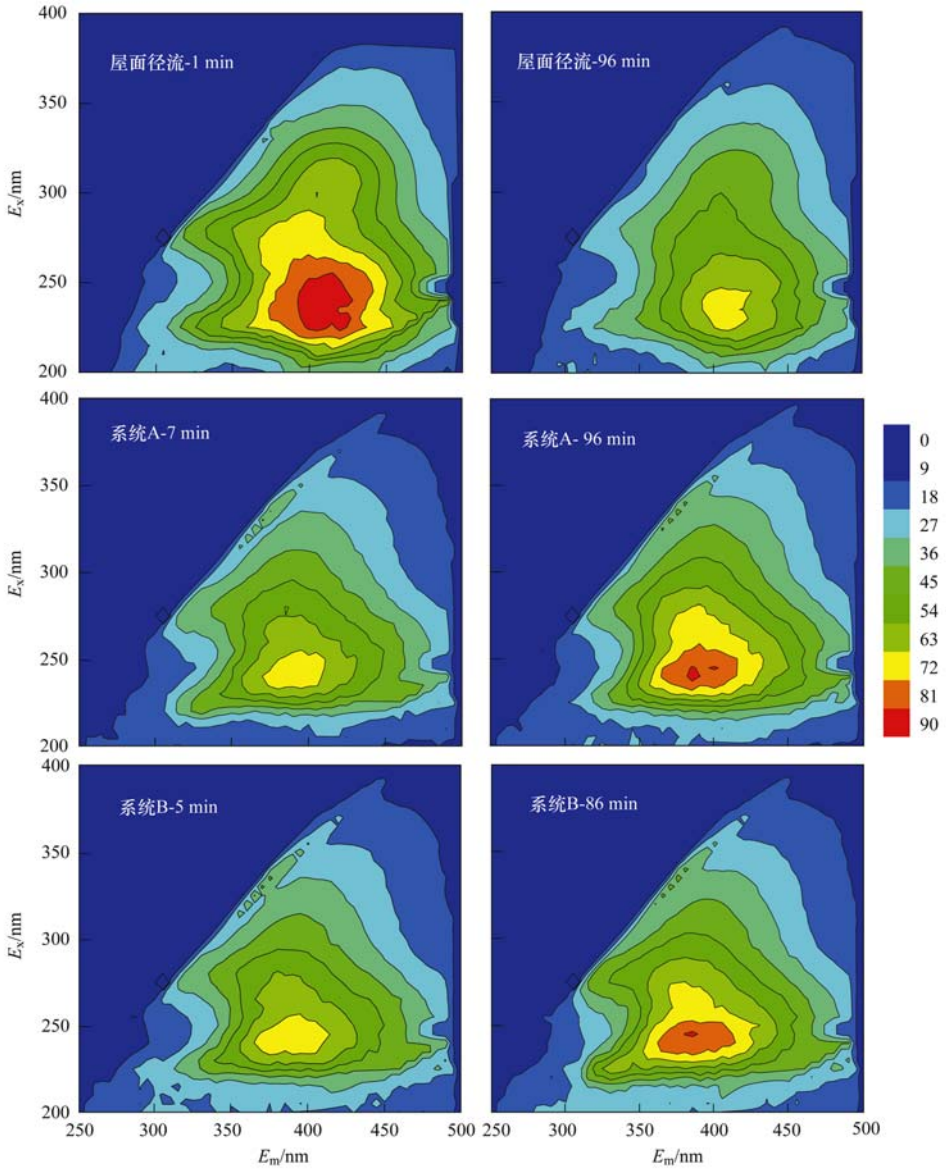

图 3　屋面径流、系统 A 和系统 B 出水的荧光光谱图(2017-04-12)

Fig. 3　Fluorescence spectrograms for stormwater runoff from roof, system A and system B(2017-04-12)

两个系统出流的荧光特征由于种植植物不同，略有差异，对于蛋白类(Ⅰ和Ⅱ)和类富里酸(Ⅲ)荧光有机物均有较好的调控效果，但对于微生物代谢产物(Ⅳ)和类胡敏酸(Ⅴ)的调控效果稍差. 已有研究表明，Ⅰ区、Ⅱ区蛋白类有机物的相对含量与微生物活性呈正相关关系[20,21]. 在本研究中，系统 A、B 对Ⅰ区、Ⅱ区蛋白类有机物均具有较好的调控效果，说明尽管水温较低，但系统仍具有一定的微生物活性；植物不同，微生物活性不同，种植紫花苜蓿有利于去除类腐殖质，种植麦冬则有助于提升蛋白类组分和微生物代谢物的调控效果.

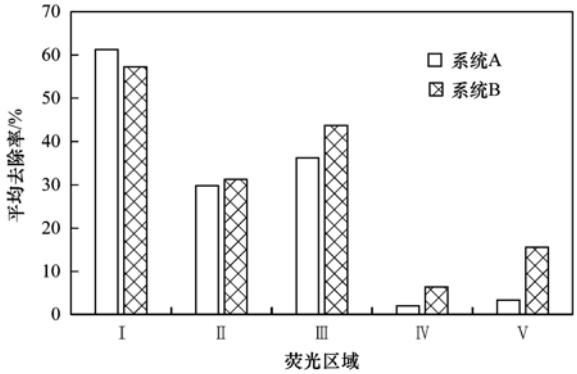

图 4　不同荧光区域调控效率

Fig. 4　Average removal rate of fluorescence spectrograms in different ranges

(3) HIX 荧光指数分析

腐殖化指数(humification index, HIX)为激发波长 255 nm 时，发射波长在 435 ~ 480 nm 与 300 ~ 345 nm 波段中的荧光强度积分值(或平均值)之比，通常用于表征有机物的腐化程度和成熟度[22, 23].

以 2017-04-12 的降雨为例分析了系统 A、B 的 HIX 值(图 5). 由图 5 可知, 两个系统的 HIX 值均小于 4, 系统 B 出水的 HIX 值(平均值 2.27)低于系统 A (平均值 2.71). 通过分析 HIX 值与 DOM 特性的响应关系(表 4)可知, 系统出流中的主要有机物质来自生物或水生细菌代谢物, 且系统 B 的微生物代谢产物多于系统 A. 对于系统 B 的径流出水, HIX 值呈现了先下降后上升的现象, 该结果与李淑娟等[24]的对于人工湿地的研究结果相似, 可能是由于腐化物质种类较多, 较难溶解的类腐殖质集中在降雨中后期被排出系统的缘故. 此外, 系统 A 的 HIX 值变化不稳定, 腐化程度均大于系统 B, 这可能是由于系统 A 中的微生物活性相对系统 B 较弱, 导致其 HIX 值在不同的场次降雨中变化趋势不同.

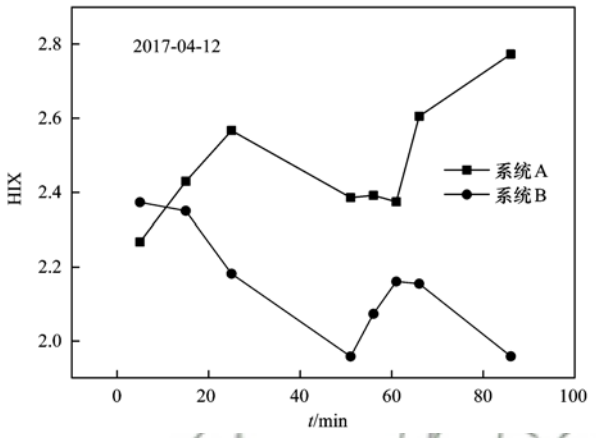

图 5 HIX 的变化过程

Fig. 5 Changing humification index

表 4 HIX 的相关数值区域及其 DOM 特性[25]

Table 4 Response relationship between humification index and DOM

HIX 值	DOM 特性
>16	含有大量腐殖质
6~10	含有较多腐殖质, 且有少量原生有机组分
4~6	含少量腐殖质和较多的原生有机组分
<4	生物或水生细菌代谢产物

2.3 相关性分析

为了解系统对于污染物净化效果与有机物质的相互关系, 分析了污染物浓度和有机组分之间的相关性(表 5). 对于屋面径流, 除 NO_3^--N 外, TN、NH_4^+-N、TP、TOC 均与溶解性有机物呈显著正相关关系, 有机氮、有机磷应该为屋面径流氮磷的主要赋存形态. 对与系统 A 和系统 B 径流, Ⅰ区 DOM (芳香类蛋白质)均与 TN、TP 和 TOC 呈显著正相关关系, 而与NO_3^--N和NH_4^+-N呈显著负相关关系, 这可能是由于蛋白类有机物易被微生物利用[25], 通过微生物的生理活动, 实现NO_3^--N和NH_4^+-N浓度的降低; 相对于屋面径流, 系统径流中有机氮的比重会有进一步的提升(图 3), 系统径流中蛋白类有机物浓度的升高有利于促进氮磷等有机形态浓度的升高, 从而导致 TN、TP 浓度的升高. 两个系统出水中的 TN 浓度均与Ⅳ区 DOM(微生物代谢产物)和 V 区 DOM(类胡敏酸)呈显著负相关关系, 说明系统脱氮效能与微生物活动密切相关, 微生物代谢产物越高, 微生物活性越高, 越有利于系统脱氮. 此外, 对于系统 A 和系统 B, NO_3^--N 和 NH_4^+-N 浓度与 DOM 的相关性并不一致, 可能是由于系统种植植物不同, 微生物种群不同, 对 DOM 的利用方式也不同; 对于系统 B, NO_3^--N浓度与Ⅲ区 DOM(类富里酸)呈显著负相关关系, 可能是系统 B 可充分利用类富里酸促进反硝化脱氮; 对于系统 A, NO_3^--N

表 5 径流水质与有机物质相关性分析1)

Table 5 Correlation between water quality and DOM

项目		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
屋面径流	TN	0.53*	0.60*	0.63*	0.62*	0.68*
	NH_4^+-N	0.68*	0.77*	0.76*	0.81*	0.82*
	NO_3^--N	−0.33	−0.33	−0.43**	−0.36	−0.47**
	TP	0.72*	0.81*	0.91*	0.80*	0.87*
	TOC	0.67*	0.76*	0.76*	0.75*	0.74*
系统 A 径流	TN	0.81*	−0.16	0.09	−0.67*	−0.62*
	NH_4^+-N	−0.53**	−0.55	−0.65*	−0.15	−0.08
	NO_3^--N	−0.80*	0.15	−0.10	0.68*	0.63*
	TP	0.72*	0.64**	0.66**	−0.35	−0.12
	TOC	0.63*	0.05	0.23	−0.42	−0.37
系统 B 径流	TN	0.83*	−0.04	0.20	−0.59*	−0.55*
	NH_4^+-N	−0.48**	−0.25	−0.28	−0.11	−0.08
	NO_3^--N	−0.48*	−0.55*	−0.70*	−0.13	−0.22
	TP	0.81*	0.41	0.79*	−0.52	−0.45
	TOC	0.62*	0.07	0.24	−0.42**	−0.40

1) * 表示 $P<0.01$; * * 表示 $0.01<P<0.05$

浓度与Ⅳ区 DOM(微生物代谢产物)和Ⅴ区 DOM(类胡敏酸)呈显著正相关关系，可能是由于微生物代谢产物和类腐殖质有机物较难被降解[26]，是导致硝态氮反硝化碳源不足进而发生淋滤现象的原因之一.

3　结论

(1)春季降雨径流水质监测结果表明，系统径流未呈现污染物浓度逐渐降低的变化趋势，系统 A、B 初期径流的 TN 和 TP 浓度分别是末期径流的 0.97～0.98 和 0.34～0.84 倍；对NH_4^+-N和 TP 均有相对稳定的去除效率，分别达 78.38%～95.03%和 72.04%～76.04%，但普遍出现了 TN 的释放现象.

(2)荧光光谱特征分析表明，屋面径流中的 DOMs 主要为类腐殖质，生物滞留系统出水中的 DOMs 主要为蛋白类物质和类腐殖质物质，主要来自生物或水生细菌代谢物；生物滞留系统对于蛋白类荧光有机物(Ⅰ和Ⅱ)和类富里酸(Ⅲ)具有较好的去除效果，去除率可分别达到 57.33%～61.30%，29.82%～31.28%和 35.55%～43.16%. 系统径流中的 TN、TP 和 TOC 均与芳香类蛋白质含量存在协同增长的关系，蛋白类有机物能促进NO_3^--N和NH_4^+-N的去除.

参考文献：

[1] Zhu H, Xu Y Y, Yan B X, *et al*. Snowmelt runoff: a new focus of urban nonpoint source pollution[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, **9**(12): 4333-4345.

[2] Whittemore D O. Potential impacts of stormwater runoff on water quality in urban sand pits and adjacent groundwater[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2012, **48**(3): 584-602.

[3] Wang S M, He Q, Ai H N, *et al*. Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different land uses in Chongqing [J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2013, **25**(3):502-510.

[4] Roy-Poirier A, Champagne P, Filion Y. Review of bioretention system research and design: past, present, and future[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, **136**(9): 878-889.

[5] Collins K A, Lawrence T J, Stander E K, *et al*. Opportunities and challenges for managing nitrogen in urban stormwater: a review and synthesis[J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(11): 1507-1519.

[6] Hunt W F, Jarrett A R, Smith J T, *et al*. Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in north carolina[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, **132**(6): 600-608.

[7] 马丽娜, 张慧, 檀文炳, 等. 河北沽河人工湿地水体溶解性有机物性质的演化过程研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(1): 206-212.
Ma L N, Zhang H, Tan W B, *et al*. Evolution of dissolved organic matter properties in a constructed wetland of Xiao River, Hebei[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, **36**(1): 206-212.

[8] 沈烁, 王育来, 杨长明, 等. 南淝河不同排口表层沉积物 DOM 光谱特征[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(9): 2351-2361.
Shen S, Wang Y L, Yang C M, *et al*. Spectral characteristic of dissolved organic matter (DOM) in the surface sediments from different discharging points along the Nanfei River in Hefei City, Anhui Province[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(9): 2351-2361.

[9] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, *et al*. Bioretention technology: overview of current practice and future needs[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, **135**(3): 109-117.

[10] Richards P J, Farrell C, Tom M, *et al*. Vegetable raingardens can produce food and reduce stormwater runoff[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, **14**(3): 646-654.

[11] Chai H X, Shen S B, Hu X B, *et al*. Effect of baffled water-holding garden system on disposal of rainwater for green building residential districts[J]. Desalination and Water Treatment, 2014, **52**(13-15): 2717-2723.

[12] Wang S M, Lin X Y, Yu H, *et al*. Nitrogen removal from urban stormwater runoff by stepped bioretention systems[J]. Ecological Engineering, 2017, **106**: 340-348.

[13] Liu W Z, Liu G H, Zhang Q F. Influence of vegetation characteristics on soil denitrification in shoreline wetlands of the Danjiangkou reservoir in China[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2011, **39**(2): 109-115.

[14] 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.

[15] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al*. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.

[16] 车伍, 张鹃, 张伟, 等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水, 2016, **32**(6): 9-14.
Che W, Zhang K, Zhang W, *et al*. Analysis of initial rainfall and total runoff volume control[J]. China Water & Wastewater, 2016, **32**(6): 9-14.

[17] Li L Q, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(6): 3403-3410.

[18] 杨长明, 汪盟盟, 马锐, 等. 城镇污水厂尾水人工湿地深度处理过程中 DOM 三维荧光光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(3): 708-713.
Yang C M, Wang M M, Ma R, *et al*. Excitation-emission matrix fluorescence spectra characteristics of DOM in a subsurface constructed wetland for advanced treatment of municipal sewage plant effluent[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, **32**(3): 708-713.

[19] He X S, Xi B D, Wei Z M, *et al*. Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy with regional integration analysis for characterizing composition and transformation of dissolved organic matter in landfill leachates[J]. Journal of Hazardous Materials,

2011, **190**(1-3): 293-299.

[20] Liu T, Chen Z L, Yu W Z, *et al*. Characterization of organic membrane foulants in a submerged membrane bioreactor with pre-ozonation using three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. Water Research, 2011, **45**(5): 2111-2121.

[21] Henderson R K, Baker A, Murphy K R, *et al*. Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: a review [J]. Water Research, 2009, **43**(4): 863-881.

[22] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, *et al*. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying[J]. Chemosphere, 1999, **38**(1): 45-50.

[23] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al*. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(6): 706-719.

[24] 李淑娟, 葛利云, 邓欢欢. 复合垂直流人工湿地净化过程中DOM的三维荧光光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(4): 946-950.
Li S J, Ge L Y, Deng H H. Excitation-emission matrix fluorescence spectra characteristics of DOM in integrated verical flow constructed wetland for treating eutrophic water [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, **35**(4): 946-950.

[25] Yamashita Y, Jaffé R, Maie N, *et al*. Assessing the dynamics of dissolved organic matter (DOM) in coastal environments by excitation emission matrix fluorescence and parallel factor analysis (EEM - PARAFAC)[J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(5): 1900-1908.

[26] Yoshioka T, Mostofa K M G, Konohira E, *et al*. Distribution and characteristics of molecular size fractions of freshwater-dissolved organic matter in watershed environments: its implication to degradation[J]. Limnology, 2007, **8**(1): 29-44.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 10

Oct. 15, 2018

CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China ····· WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, *et al.* (4393)

Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015 ····· ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, *et al.* (4400)

Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing ····· DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, *et al.* (4408)

Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement ····· GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, *et al.* (4414)

Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016 ····· WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, *et al.* (4422)

Seasonal Variation and Source Analysis for $PM_{2.5}$, PM_1 and Their Carbonaceous Components in Beijing ····· FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, *et al.* (4430)

Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of $PM_{2.5}$ in the Northern Suburb of Nanjing in Spring ····· ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, *et al.* (4439)

Analysis of Non-polar Organic Compounds in $PM_{2.5}$ by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS ····· MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, *et al.* (4446)

Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou ····· WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, *et al.* (4457)

Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO_x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology ····· YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, *et al.* (4463)

Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology ····· LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, *et al.* (4472)

Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City ····· DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, *et al.* (4479)

Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve ····· SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, *et al.* (4490)

Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River ····· ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, *et al.* (4497)

Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland ····· WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, *et al.* (4505)

Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects ····· SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, *et al.* (4512)

Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water ····· DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, *et al.* (4519)

Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River ····· FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, *et al.* (4530)

Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells ····· LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, *et al.* (4539)

Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ^{15}N and ^{18}O Isotope Technique ····· SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, *et al.* (4547)

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater ····· PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, *et al.* (4556)

Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment ····· LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (4565)

Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis ····· ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, *et al.* (4576)

Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments ····· LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, *et al.* (4584)

Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants ····· LI Ao-lin, CHEN Lü-jun, ZHANG Yan, *et al.* (4593)

Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feammox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater ····· LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, *et al.* (4601)

Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater ····· YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (4612)

Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A^2/O-BAF at Low Temperatures ····· HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, *et al.* (4621)

Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O_3-BAC and Analysis of Consortium Structure ····· ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, *et al.* (4628)

Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges ····· WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, *et al.* (4636)

Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes ····· WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, *et al.* (4644)

Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge ····· ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, *et al.* (4653)

Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis ····· YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, *et al.* (4661)

Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China ····· SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, *et al.* (4670)

Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas ····· MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, *et al.* (4684)

Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field ····· HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, *et al.* (4694)

Emission of NH_3 and N_2O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers ····· SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, *et al.* (4705)

Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil ····· TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, *et al.* (4717)

Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox *Nitrospira*) in a Neutral Paddy Soil ····· WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, *et al.* (4727)

Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis ····· CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, *et al.* (4735)

Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil ····· CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, *et al.* (4744)

Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters ····· LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, *et al.* (4752)

Lead Uptake and Accumulation in Rice (*Oryza sativa* L.) with Water Management and Selenite Fertilization ····· WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, *et al.* (4759)

Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water ····· YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, *et al.* (4766)

Oxidation of Humic Acid Complexing As(Ⅲ) by As(Ⅲ)-Oxidizing Bacteria ····· LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, *et al.* (4778)

A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition ····· YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, *et al.* (4783)

Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria *Zobellella* sp. B307 ····· BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, *et al.* (4793)

Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17β-estradiol Degrading Strain *Fusarium* sp. KY123915 ····· WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, *et al.* (4802)

Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland ····· LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, *et al.* (4809)

Microbial Community Diversity Analysis During Composting of Lincomycin Mycelia Dreg with Manure ····· REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, *et al.* (4817)

Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms ····· PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, *et al.* (4825)

Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash ····· LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)