

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, 刘永桥, 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, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民	(2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 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 NO ₂ 、HNO ₃ 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, 汪啟容	(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, 贾璐杰, 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收潜力及对外源磷的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧	(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, 许尤, 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内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 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 ₃ -N 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 N ₂ O 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)
西南高锡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, 薛蓑	(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 示踪中性紫色土的氨氧化过程	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氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 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, 丁帮环, 陈志浩	(2948)
污泥四要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)

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

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 搭建6个不同结构和介质组成的浅基质层干植草沟模拟柱, 在基质层添加较多发酵木屑, 利用进水期的脱氮作用, 并设置饱水层提高设施落干期脱氮能力, 从而强化设施全周期脱氮效果. 以半人工道路径流作为进水, 考察各模拟柱运行效果, 并结合分层取样水质检测数据和模拟柱内体积含水率、ORP的变化过程, 分析氮素在不同模拟柱内的去除机制. 结果表明: 在运行参数相对实际应用环境更为不利的条件下, 设置饱水层的模拟柱的TN去除率在67%~78%; TN去除过程主要发生在进水期, 且在含较多发酵木屑的基质层即被大量去除; 设置饱水层不仅可提高落干期设施脱氮能力, 还可保证较浅的基质层在进水期快速达到适宜反硝化的缺氧条件, 从而保证进水期设施的脱氮效果; 设置持水性过渡层并在其中放置有机质可以有效平衡饱水层碳源补给并控制有机质淋失的问题.

关键词: 干植草沟; 强化脱氮; 道路径流; 进水期; 饱水层

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2715-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201811236

Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer

DUAN Jin-kai, LI Tian*, ZHANG Jia-wei

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate nitrogen removal efficiencies and mechanisms from road runoff by dry grass swales with a shallow substrate layer, we constructed six dry grass swale columns with different structures and media composition. In order to enhance the nitrogen removal efficiencies during the whole process, fermented woodchips were added into the substrate layer, and saturated zones were established. Semi-synthetic road runoff was used as the influent water. The influent and effluent quality were analyzed, and the change in volumetric water content and ORP of the media were monitored. The results showed significant nitrogen removal by these columns under unfavorable conditions. The range of the average removal rate of TN by the dry grass swales with saturated zones was 67%-78%. The nitrogen removal process mainly occurred during the wet period of the substrate layer. The saturated zones enhanced nitrogen removal efficiencies during the dry period, and also promoted the quick establishment of anoxic conditions in the substrate layer during the wet period. The water-holding transition layer with organic matter was effective at providing a carbon source for denitrification in the saturated zone, and for avoiding the leaching of pollutants caused by organic decomposition.

Key words: dry grass swale; enhanced nitrogen removal; road runoff; wet period; saturated zone

干植草沟可有效削减径流峰值流量和峰现时间, 去除道路径流中污染物, 被广泛用于道路径流的处理^[1~4]. 干植草沟对道路径流污染物的去除机制与生物滞留类似^[5, 6], 后者已得到大量研究^[7~10]. 常规的生物滞留设施, 氮素的生物转化过程主要发生在落干期^[9, 11], 进水期截留在基质层内的有机氮和 NH_4^+ -N在落干期会发生氨化和硝化作用, 造成基质层中 NO_3^- -N累积^[9]; 不设饱水层的生物滞留设施容易出现 NO_3^- -N淋失现象^[9, 12]. 在干植草沟现场设施中也观测到类似的现象, 并且氮素释放现象在夏季尤其明显^[4, 13]. 基质层厚度是影响生物滞留设施水文及水质控制效果的关键因素, 厚度增加有利于提高 NO_3^- -N去除效果^[14, 15], 因此常见的生物滞留设施的基质层厚度一般要求不低于70 cm^[16]. 基质层中添加高C/N有机质可以提高生物滞留设施对 NO_3^- -N的去除效果^[7, 17, 18]. Wan等^[18]发现添加大量木屑的生物滞留模拟柱对TN的去除

率超过80%, 反硝化作用主要发生在进水期, 但使用人工配水作为进水, 不能很好代表真实道路径流; Wan等^[19]以生物滞留现场设施处理真实道路径流, TN去除率仅有34%.

长三角地区地下水位高, 为防止污染地下水, 干植草沟设施出水需经排水管收集后排入市政雨水管道, 并在设施底部铺设防渗层. 该地区地面高程与圩区河网常水位之间高差一般仅80 cm, 为降低暴雨季节河水倒灌进入设施的风险, 宜采取较浅的基质层厚度, 并将排水管上弯. 而较浅的基质层厚度不利于设施脱氮, 因此需要考察在上述不利条件下实现干植草沟强化脱氮的可能性. 本文搭建了不同结构和介质组成的模拟柱, 在厚度仅30 cm的基

收稿日期: 2018-11-28; 修订日期: 2019-01-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07207001)

作者简介: 段进凯(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染控制, E-mail: Mr_djk@163.com

* 通信作者, E-mail: tianli@tongji.edu.cn

质层添加较多发酵木屑,以利用进水期的脱氮作用;并设置上弯管在设施底部形成饱水层以期进一步提高设施脱氮能力.本研究以接近实际道路径流的半人工道路径流作为进水,考察各模拟柱在不利运行条件下的氮素去除效果,评价浅基质层干植草沟强化道路径流脱氮效果的可行性,分析氮素转化与去除机制,以期干植草沟在高地下水位、低地面高程地区的强化脱氮应用提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验装置

6个干植草沟模拟柱置于透明阳光棚下,保证模拟柱处于与当地气候、光照、温度一致的条件,同

时避免天然降雨影响^[12].模拟柱为内径150 mm、高700 mm的有机玻璃柱.植物为果岭草混播黑麦草.除上端100 mm蓄水区外,柱外壁敷黑色遮光膜以防止藻类滋生.在模拟柱300、400和600 mm介质深度处分别设置采样口(依次记为D-300、D-400和D-600)用于分层取样.模拟柱侧壁设置上弯排水管,上弯高度等于对应模拟柱内砾石排水层深度,砾石排水层通常处于饱水状态.本实验装置见图1和图2.

模拟柱介质为双层或三层结构.基质层厚度为300 mm,均由20%表层土、78%黄砂和2%发酵木屑(质量比)组成,添加发酵木屑以形成进水期发生脱氮的环境.过渡层厚度为100 mm,骨架填料为浮

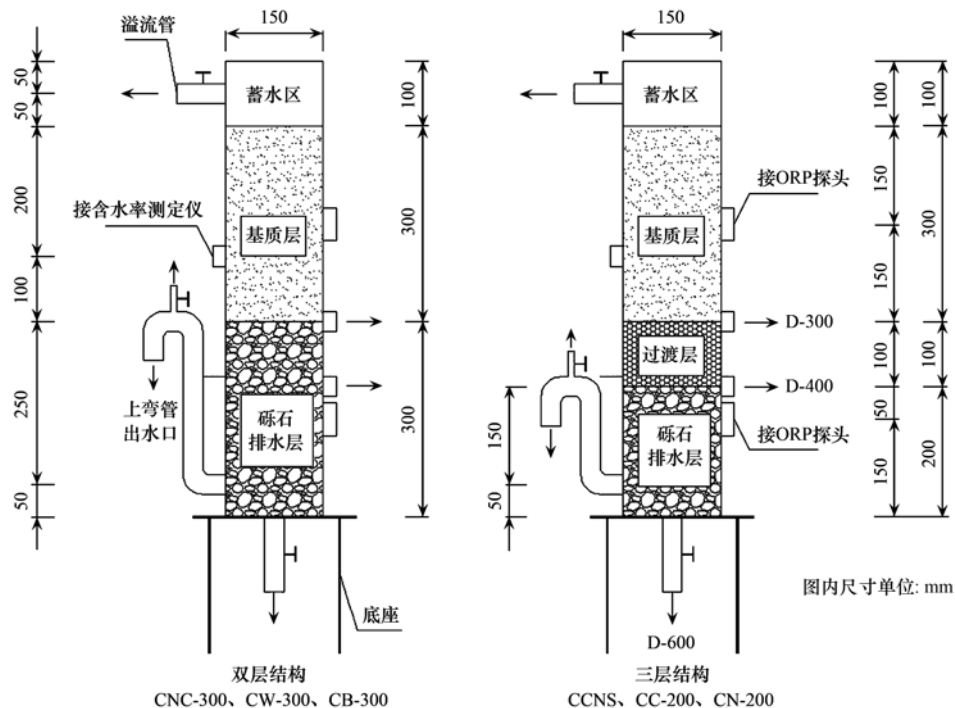


图1 模拟柱结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of dry grass swale columns



图2 模拟柱实物装置

Fig. 2 Photograph of dry grass swale columns

石,具备较好的持水性能^[20, 21].砾石排水层厚度为300 mm(双层结构)或200 mm(三层结构),起到结

构支撑、保障排水和落干期蓄水的作用.根据过渡层或砾石排水层使用的碳源种类以及饱水层深度对模拟柱编号(表1).CCNS(Column-Coir-No Submerged)未设置饱水层;CNC-300(Column-No Carbon)设置饱水层但其中未放置碳源,评价饱水层进一步提高设施脱氮能力的可行性;CW-300(Column-Woodchip)和CB-300(Column-Biochar)的饱水层分别放置发酵木屑或生物炭(竹炭),与CNC-300对比,评价饱水层添加碳源对设施脱氮能力的影响;CC-200(Column-Coir)和CN-200(Column-Newspaper)设置过渡层并在其中分别放置椰棕丝或报纸,与CW-300对比,评价碳源添加位置对设施脱氮效果的影响.

表 1 过渡层和砾石排水层结构和介质组成(质量比)

Table 1 Structure and media composition of the transition layer and the drainage layer (expressed as the mass ratio)				
序号	编号	过渡层	砾石排水层	饱水层深度/mm
1	CCNS	浮石 80% + 椰棕丝 20%	砾石 83% + 陶粒 17%	—
2	CNC-300	—	砾石 100%	300
3	CW-300	—	砾石 98% + 发酵木屑 2%	300
4	CB-300	—	砾石 92% + 竹炭 8%	300
5	CC-200	浮石 80% + 椰棕丝 20%	砾石 83% + 陶粒 17%	200
6	CN-200	浮石 80% + 报纸 20%	砾石 83% + 陶粒 17%	200

1.2 实验用水与实验操作

以自来水冲洗市区路面，并在收集到的径流中添加少量 NH₄Cl 补充 NH₄⁺-N 含量，获取半人工道路径流作为实验进水，调整后的进水污染特征与上海市道路径流相近^[22]。

宁静^[23]以雨量大于 0.5 mm 为有效降雨，计算得到上海市降雨事件的间隔平均值为 71.36 h。笔者以雨量大于 2 mm 的降雨事件为考察对象，分析了相同的降雨样本，确定典型降雨间隔为 170 h(95 th 百分位数)。考虑到短周期为脱氮作用的不利条件，选择实验运行周期为 3 d。实验开始前以自来水淋洗

模拟柱，直至出水污染物浓度稳定。正式实验共分 2 个阶段(表 2)。阶段 2 分层采集水样，以考察模拟柱内氮素去除过程。使用蠕动泵进水，流速为 1.0 L·h⁻¹(5.66 cm·h⁻¹)，每次进水时间为 5 h。

若干植草沟服务面积比取 10%(下限值)，流量径流系数取 0.9，则 5 L 进水量相当于设计降雨量 31 mm，该降雨量在上海市对应的年径流总量控制率大于 80%，超过文献[24]的要求。同时，上海市降雨强度平均值为 1.70 mm·h⁻¹^[23]，由上述参数计算可知，对于实际应用的干植草沟设施，进水流速 5.66 cm·h⁻¹为不利条件。

表 2 实验进水水质和运行方式¹⁾

Table 2 Characteristics of influent water and operation schemes							
指标	进水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				运行方式		
	TN	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	COD	进水期时长 /h	落干期时长 /h	运行周期数
阶段 1	4.04(0.34)	2.01(0.35)	1.00(0.65)	146(34.6)	5	67	6
阶段 2	3.75(0.89)	1.19(0.14)	1.02(0.38)	140(84.6)	5	67	3
地表水 V 类标准	2.0	—	2.0	40	—	—	—

1) 括号内为标准差

以塑料桶收集设施出水，混匀后取 1 L 水样备用。在阶段 2，每次进水之前，收集饱水层中的积水评价落干期水质变化。待模拟柱储水排空后，启动蠕动泵，依次收集 D-300、D-400 和 D-600 出水，分别视为进水仅通过基质层、通过基质层和过渡层、通过整个模拟柱的出水。水样在 4℃ 的冰箱中保存，24 h 内完成水质指标检测。

1.3 水质检测方法与数据处理

水质检测指标包括 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、COD、有机氮(Org-N)和 TKN，均采用国家标准检测方法进行检测。Org-N 和 TKN 经计算得到。由于进、出水中 NO₂⁻-N 均未检出，Org-N = TN - NH₄⁺-N - NO₃⁻-N。TKN = Org-N + NH₄⁺-N。使用 ORP 去极化法铂复合电极(CD-2A 型，南京传滴仪器设备有限公司)测定介质不同深度处的 ORP，使用 HOBO 含水率仪(HoBo TMS-SMC-M005，Onset Computer Corporation，USA)测定介质体积含水率，数据采集间隔均为 60 min。使用 Vario EL III 元素分析仪(Elementar Co. Ltd.，Hanau，Germany)测定发酵木

屑和竹炭的 C/N。

采用 SPSS 20 和 OriginPro 8.0 软件进行数据处理。结果表明，在 0.05 水平下，所有指标进、出水质量浓度数据均符合正态分布，但方差不齐，故对模拟柱进、出水污染物质量浓度进行显著性分析时统一采用单因素方差分析(ANOVA)中的 Games-Howell 检验。在 0.05 水平下，部分指标去除率数据不符合正态分布，故对不同模拟柱的污染物去除率进行显著性分析时统一采用非参数检验中的 Mann-Whitney U 检验。

2 结果与讨论

2.1 模拟柱对氮素的去除效果

阶段 1 各模拟柱进、出水水质监测结果见图 3。

为达到稳定的脱氮效果，生物滞留设施通常采用较大的基质层厚度^[10]。Davis 等^[25]认为氧气难以进入较深的基质层，因此厚基质层可创造适合反硝化的缺氧环境。Lucke 等^[26]对基质层厚度为 100 cm 的生物滞留池进行研究，运行 10 年后的设施对 TN

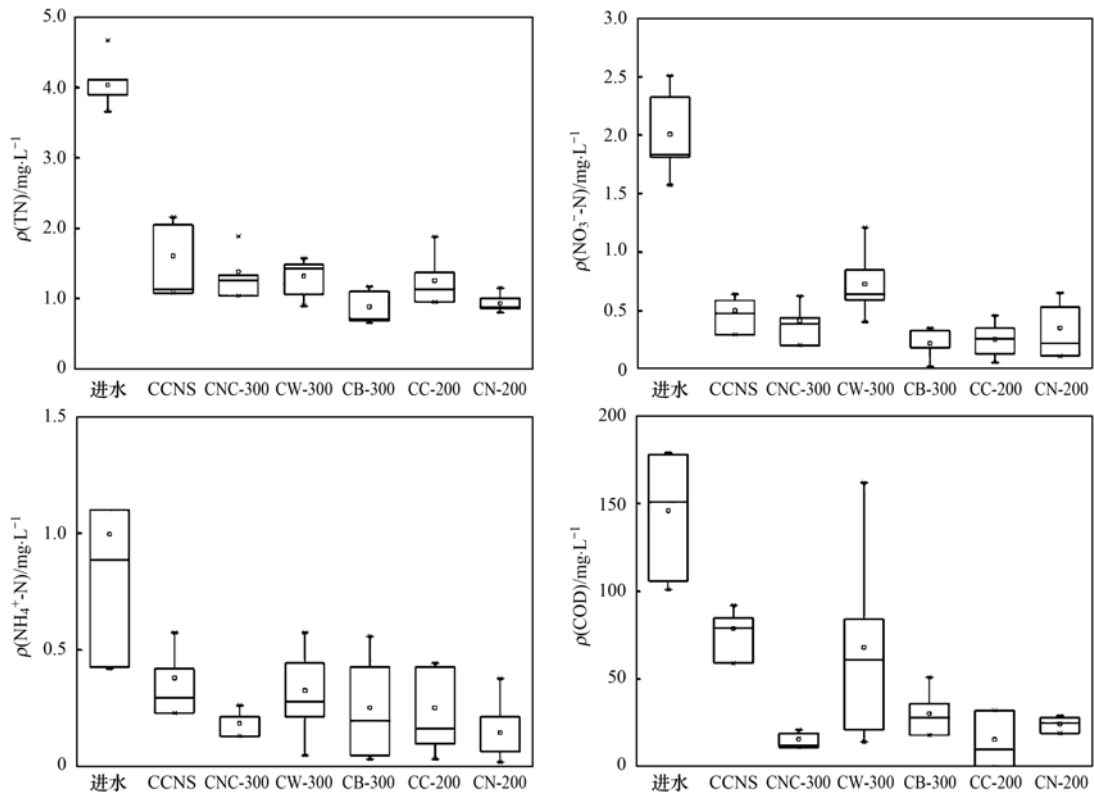


图3 各模拟柱进、出水氮素和 COD 质量浓度分布情况

Fig. 3 Concentrations of different nitrogen species and COD in influent and effluent of the columns

的去除率仍可达 48%。然而在地下水位高、河道常水位与地面高程接近的地区,宜采用浅基质层设施。本文以接近实际道路径流的半人工道路径流作为进水,在不利进水流速和降雨间隔条件下,各模拟柱出水 TN 和 NO_3^- -N 平均质量浓度均显著低于进水 ($P < 0.05$)。设置饱水层的模拟柱对 TN 的去除率范围在 67% ~ 78%,均显著高于 CCNS 的值 ($P < 0.05$),表明在运行参数相对实际应用环境不利的条件下,浅基质层生态设施的基质层添加较多发酵木屑同时设置饱水层可实现良好的脱氮效果。

CW-300 对 NH_4^+ -N 的去除率显著低于 CNC-300 ($P < 0.05$),且 CW-300 出水 COD 平均质量浓度为 $68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,明显高于其他设置饱水层的模拟柱,这暗示 CW-300 饱水层放置的发酵木屑降解淋出是导致 NH_4^+ -N 和 COD 去除效果差的原因,国内外相关研究也报道了类似的现象^[17, 18, 27, 28]。因此,易降解有机质不宜放置于饱水层。饱水层放置生物炭的 CB-300 对 TN 和 NO_3^- -N 的去除率显著高于 CW-300 的值 ($P < 0.05$),且 CB-300 出水 COD 平均质量浓度仅为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这是由于生物炭的 C/N (202.8) 远高于发酵木屑 (42.9),生物炭氮素含量较低且不易降解^[29, 30]。有机质放置于过渡层的 CC-200 和 CN-200 出水 COD 平均质量浓度均低于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 NH_4^+ -N 平均质量浓度低于 CW-300 的

值,表明放置于持水性过渡层的椰棕丝和报纸不易过度降解,可避免 COD 和 NH_4^+ -N 淋失。

2.2 氮素去除过程分析

阶段 2 为除氮机制实验,根据各模拟柱分层取样氮素平均质量浓度,绘制 CCNS、CNC-300、CC-200 和 CN-200 不同运行时刻、介质不同深度处出水氮素平均质量浓度变化图(图 4),考察氮素在模拟柱内的转化过程。未设饱水层的 CCNS 仅分析进水期氮素变化过程。

由图 4,CCNS、CNC-300、CC-200 和 CN-200 在进水期均可有效去除 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N,且去除过程主要发生在基质层(表 3)。这表明 NH_4^+ -N 可通过基质的吸附和离子交换作用被截留, NO_3^- -N 大部分可在添加较多发酵木屑的较浅基质层去除。木屑为基质层反硝化提供了充足碳源,同时木屑降解使孔隙水内溶解氧浓度下降,使基质层在进水期处于缺氧状态(图 5),进水中 NO_3^- -N 在进水期即通过反硝化作用被去除。进水中大部分 TKN 被截留在基质层内(图 4)。在落干期,基质层含水率逐渐下降,ORP 迅速升高(图 5),Wan 等^[18]报道了类似的 ORP 变化过程。截留的 TKN 在落干期通过氨化和硝化作用转化为 NO_3^- -N,并滞留在基质层内,基质层对 TKN 的截留去除能力得以恢复。在下次进水期,由 TKN 转化的 NO_3^- -N 和进水中 NO_3^- -N 主要

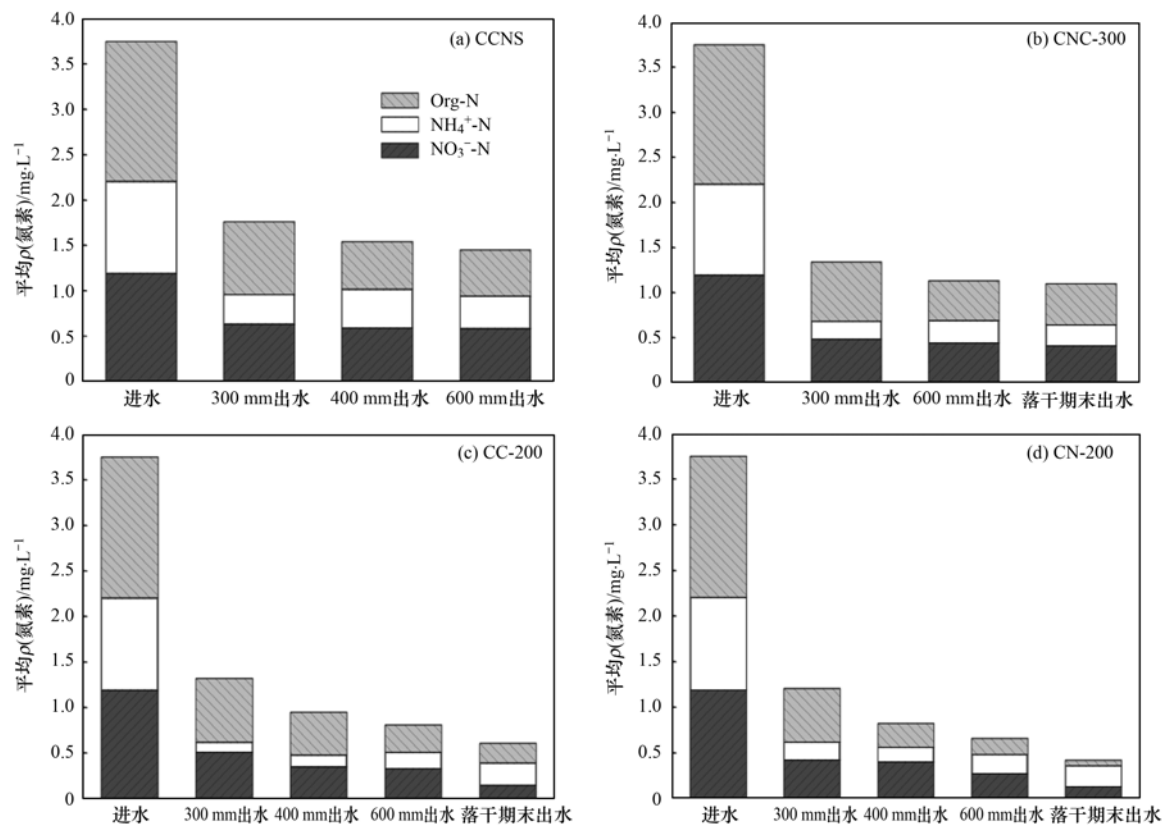


图 4 模拟柱内氮素去除过程

Fig. 4 Removal process of different nitrogen species in the columns

表 3 模拟柱分层取样 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 平均质量浓度¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 3 Average concentrations of nitrate and ammonia nitrogen for stratified sampling in the columns/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

指标	模拟柱编号	基质层出水 平均质量浓度	进水期结束时刻 出水平均质量浓度	落干期结束时刻 出水平均质量浓度
NO_3^- -N	CCNS	0.63(0.10)	0.58(0.08)	—
	CNC-300	0.48(0.08)	0.44(0.06)	0.41(0.03)
	CW-300	0.44(0.10)	0.54(0.51)	0.39(0.05)
	CC-200	0.51(0.10)	0.33(0.06)	0.15(0.06)
	CN-200	0.42(0.09)	0.27(0.04)	0.13(0.04)
NH_4^+ -N	CCNS	0.33(0.06)	0.36(0.04)	—
	CNC-300	0.20(0.03)	0.25(0.04)	0.23(0.07)
	CW-300	0.34(0.09)	0.50(0.06)	0.81(0.08)
	CC-200	0.11(0.02)	0.18(0.02)	0.25(0.05)
	CN-200	0.20(0.05)	0.21(0.03)	0.23(0.06)

1) 括号内为标准差;进水 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 平均质量浓度分别为 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

在基质层通过反硝化作用被去除. 图 4 表明各模拟柱对 TN 的去除过程主要发生在进水期, 且在基质层即被大量去除, 表明添加较多发酵木屑的基质层在进水期可以有效脱氮.

CNC-300 基质层出水 NO_3^- -N 平均质量浓度低于 CCNS 的对应值(表 3), 原因是设置饱水层的 CNC-300 基质层体积含水率在落干期可长期维持在接近田间持水度的较高水平(图 5), 微生物在落干期仍可保持一定活性, 这有利于进水开始后反硝化反应迅速恢复. Morse 等^[31]的研究也表明维持较高的含水率有利于保持基质内反硝化微生物活性. 进

水开始后, 基质层 ORP 快速下降达到缺氧状态并维持较长时间, 从而保证进水期反硝化脱氮效果. Waller 等^[7]报道了设置饱水层的生物滞留设施顶部 10 cm 反硝化基因丰度高于设施底部 10 cm, 设置饱水层有利于表层基质在降雨期发生反硝化. 未设饱水层的 CCNS 基质层内毛细水蒸发迅速, 使得落干期的体积含水率低于田间持水度, 对基质层中微生物产生胁迫作用. CCNS 基质层 ORP 在进水期下降缓慢, 进水结束后快速上升, 维持缺氧状态的时间较短, 这不利于设施反硝化脱氮. 上述现象表明, 对于基质层添加较多发酵木屑的浅基质层生态

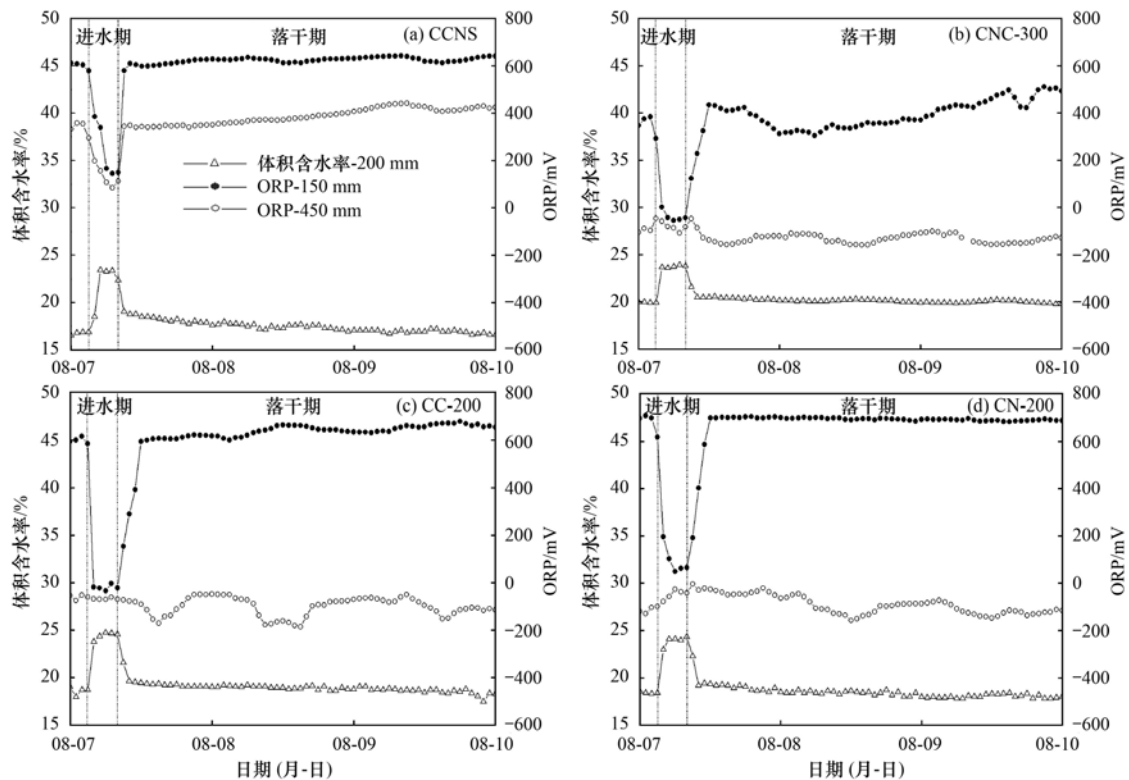


图5 模拟柱不同介质深度处体积含水率和 ORP 变化情况 (2018 年)

Fig. 5 Volumetric water content and ORP values at different depths of the columns in 2018

设施, 设置饱水层可进一步提高基质层在进水期的脱氮能力.

CNC-300 落干期结束时刻的出水 NO_3^- -N 平均质量浓度低于进水期结束时刻的值 (表 3), 原因是该模拟柱砾石排水层在落干期处于饱水状态, 具备反硝化所需的缺氧环境 (图 5), 且该层积水中含有进水中残留和基质层淋失下来的有机质作为碳源 (COD 平均质量浓度为 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 表明设置饱水层可提高设施在落干期的脱氮能力. 与 CNC-300 相比, CW-300 砾石排水层对 TN 的去除效果较差, 原因是饱水层的发酵木屑长期浸泡降解, 导致落干期 NH_4^+ -N 质量浓度明显上升 (表 3). 这表明饱水层放置有机质可能降低设施的脱氮效果, 尽管较多易降解碳源的存在促进了反硝化作用.

CC-200 和 CN-200 基质层出水 NO_3^- -N 平均质量浓度均低于 CCNS 的对应值 (表 3), 原因是 CC-200 和 CN-200 通过设置持水性能良好的过渡层, 使基质层体积含水率在落干期也可维持在相对较高水平 (18% 左右), 在进水期可快速达到缺氧状态并维持较长时间 (图 5). 在一个完整的运行周期内, CC-200 和 CN-200 的砾石排水层对 NO_3^- -N 的平均去除率分别为 17% 和 23%, 高于 CNC-300 的对应值 (6%), 这是由于进入 CNC-300 饱水层的碳源有限, 而 CC-200 和 CN-200 的持水性过渡层放置了大量有机质, 在进水期可降解、释放有机质并进入饱

水层 (COD 平均质量浓度分别为 $27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 可为落干期饱水层反硝化提供充足碳源. 与 CW-300 不同, CC-200 和 CN-200 的过渡层在落干期未处于淹没状态, 避免了有机质持续降解淋出. 因此, 设置持水性过渡层并在其中放置有机质可以有效平衡饱水层碳源补给和控制有机质淋失的问题.

3 结论

(1) 在运行参数相对实际应用环境更为不利的条件下, 基质层厚度仅 30 cm 的干植草沟模拟柱, 通过在基质层添加较多发酵木屑同时设置饱水层, 实现了良好的脱氮效果, TN 去除率范围达到 67% ~ 78%.

(2) 基质层添加较多发酵木屑的模拟柱对 TN 的去除过程主要发生在进水期, 且在基质层即被大量去除.

(3) 设置饱水层不仅可提高设施在落干期的脱氮能力, 而且使基质层体积含水率在落干期长期维持在接近田间持水度水平, 保证较浅的基质层保持湿润、维持微生物活性, 在进水期快速恢复缺氧环境, 保证了基质层在进水期的脱氮效果.

(4) 饱水层在落干期的脱氮效果受碳源添加位置影响. 不放置有机质的饱水层在落干期具备微弱的脱氮能力, 有机质直接放置在饱水层易造成降解

产物 COD 和 NH_4^+-N 的淋出。设置持水性过渡层并将有机质放置于过渡层可以保证饱水层的碳源供给与脱氮效果, 同时避免有机质降解淋出。

参考文献:

- [1] Boger A R, Ahiablame L, Mosase E, *et al.* Effectiveness of roadside vegetated filter strips and swales at treating roadway runoff: a tutorial review [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2018, **4**(4): 478-486.
- [2] Shafique M, Kim R, Kyung-Ho K. Evaluating the capability of grass swale for the rainfall runoff reduction from an urban parking lot, Seoul, Korea [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(3): 537.
- [3] Leroy M C, Portet-Koltalo F, Legras M, *et al.* Performance of vegetated swales for improving road runoff quality in a moderate traffic urban area [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **566-567**: 113-121.
- [4] Stagge J H, Davis A P, Jamil E, *et al.* Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff [J]. *Water Research*, 2012, **46**(20): 6731-6742.
- [5] Cizek A R, Hunt W F, Winston R J, *et al.* Water quality and hydrologic performance of a regenerative stormwater conveyance in the piedmont of North Carolina [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, **144**(8): 04018062.
- [6] Ingvertsen S T, Cederkvist K, Jensen M B, *et al.* Assessment of existing roadside swales with engineered filter soil: II. treatment efficiency and in situ mobilization in soil columns [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(6): 1970-1981.
- [7] Waller L J, Evanylo G K, Krometis L A H, *et al.* Engineered and environmental controls of microbial denitrification in established bioretention cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(9): 5358-5366.
- [8] Cording A, Hurley S, Adair C. Influence of critical bioretention design factors and projected increases in precipitation due to climate change on roadside bioretention performance [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, **144**(9): 04018082.
- [9] 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.
- [10] Lefevre G H, Paus K H, Natarajan P, *et al.* Review of dissolved pollutants in urban storm water and their removal and fate in bioretention cells [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, **141**(1): 04014050.
- [11] Cho K W, Yoon M H, Song K G, *et al.* The effects of antecedent dry days on the nitrogen removal in layered soil infiltration systems for storm run-off control [J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(7): 747-755.
- [12] Zinger Y, Blecken G T, Fletcher T D, *et al.* Optimising nitrogen removal in existing stormwater biofilters: benefits and tradeoffs of a retrofitted saturated zone [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **51**: 75-82.
- [13] Manka B N, Hathaway J M, Tirpak R A, *et al.* Driving forces of effluent nutrient variability in field scale bioretention [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **94**: 622-628.
- [14] Brown R A, Hunt III W F. Impacts of media depth on effluent water quality and hydrologic performance of undersized bioretention cells [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, **137**(3): 132-143.
- [15] Li H, Sharkey L J, Hunt W F, *et al.* Mitigation of impervious surface hydrology using bioretention in North Carolina and Maryland [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, **14**(4): 407-415.
- [16] Jiang C B, Li J K, Zhang B H, *et al.* Design parameters and treatment efficiency of a retrofit bioretention system on runoff nitrogen removal [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(33): 33298-33308.
- [17] Peterson I J, Igielski S, Davis A P. Enhanced denitrification in bioretention using woodchips as an organic carbon source [J]. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 2015, **1**(4): 04015004.
- [18] Wan Z X, Li T, Shi Z B. A layered bioretention system for inhibiting nitrate and organic matters leaching [J]. *Ecological Engineering*, 2017, **107**: 233-238.
- [19] Wan Z X, Li T, Liu Y T. Effective nitrogen removal during different periods of a field-scale bioretention system [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(18): 17855-17861.
- [20] Çifçi D I, Meriç S. Manganese adsorption by iron impregnated pumice composite [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, **522**: 279-286.
- [21] Pungrasmi W, Phinitthanaphak P, Powtongsook S. Nitrogen removal from a recirculating aquaculture system using a pumice bottom substrate nitrification-denitrification tank [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 357-363.
- [22] 何梦男, 张劲, 陈诚, 等. 上海市淀北片降雨径流过程污染时空特性分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 536-545.
- [22] He M N, Zhang J, Chen C, *et al.* Analysis of the temporal and spatial characteristics of rainfall-runoff pollution in Dianbei basin of Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 536-545.
- [23] 宁静. 上海市短历时暴雨强度公式与设计雨型研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006. 46-48.
- [24] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 上海市海绵城市建设技术导则(试行) [R]. 上海: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 2016. 5-7, 9.
- [25] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, *et al.* Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal [J]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(3): 284-293.
- [26] Lucke T, Nichols P W B. The pollution removal and stormwater reduction performance of street-side bioretention basins after ten years in operation [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **536**: 784-792.
- [27] Shrestha P, Hurley S E, Wemple B C. Effects of different soil media, vegetation, and hydrologic treatments on nutrient and sediment removal in roadside bioretention systems [J]. *Ecological Engineering*, 2018, **112**: 116-131.
- [28] Christianson L E, Feyereisen G, Lepine C, *et al.* Plastic carrier polishing chamber reduces pollution swapping from denitrifying woodchip bioreactors [J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, **81**: 33-37.
- [29] Bock E, Smith N, Rogers M, *et al.* Enhanced nitrate and phosphate removal in a denitrifying bioreactor with biochar [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, **44**(2): 605-613.
- [30] Bock E M, Coleman B, Easton Z M. Effect of biochar on nitrate removal in a pilot-scale denitrifying bioreactor [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, **45**(3): 762-771.
- [31] Morse N R, McPhillips L E, Shapleigh J P, *et al.* The role of denitrification in stormwater detention basin treatment of nitrogen [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(14): 7928-7935.

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, ZHU 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 Jinpen 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, XIONG 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 ¹³ C-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 Ammonoxidation	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)