

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成

沈庆然, 李田*, 曹熠, 潘舆

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 构建了 8 个不同基质组成的粗放型绿色屋顶小试装置, 通过累积 650 mm 模拟降雨实验, 研究厌氧稳定污泥应用于粗放型绿色屋顶生长基质时的合理组成, 考察使用过程中装置出水水质情况与基质自身营养物质含量变化情况, 结合厌氧稳定污泥资源化利用时带来的 N、P 淋出问题, 讨论不同改良材料的效果。结果表明: 厌氧稳定污泥能够显著增加植物量, 实验期间植物平均增重 808%; 厌氧稳定污泥会造成 TP 的大量淋失, 给水厂污泥能够有效控制 TP 淋失并且不会影响植物对 P 的吸收, 实验期间给水厂污泥累计减少 TP 淋出质量 68.66%, 且稳定后出水 TP 达到地表水 V 类标准; 厌氧稳定污泥会造成 TN 的严重淋失, 淋失 TN 的主要形态是 NO_3^- -N, 稻壳炭能够减少 NO_3^- -N 的淋失, 累计减少 NO_3^- -N 淋出质量 28.86%, 增加稻壳炭用量, 有助于控制 NO_3^- -N 淋出; 淋出液中 SS 和 COD 能够迅速下降并稳定, 稳定后 COD 含量约为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 优于地表水 V 类标准; 在以中小降雨为主的实际降雨条件下, 基质中厌氧稳定污泥所含营养物质的保留时间能超过 1 a, 可以满足植物较长时间的生长需求。

关键词: 海绵城市; 粗放型绿色屋顶; 生长基质; 出水水质; 模拟降雨; 厌氧稳定污泥

中图分类号: X703.1; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2953-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701196

Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling

SHEN Qing-ran, LI Tian*, CAO Yi, PAN Yu

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

Abstract: The experiment was carried out to study the reasonable composition of stable anaerobic sludge in the extensive green roof growth substrate by a total of 650 mm artificial rainfall event. Combined with the N, P leaching problem of the sludge resources utilization, the quality of the effluent and the change of the nutrient content of the substrate in the process of application were investigated. The results showed that the anaerobic sludge could significantly increase the plant biomass and the average weight gain was 808%. Stable anaerobic sludge caused a large amount of leaching of TP and water treatment residual could effectively control TP leaching and did not affect the absorption of P to the plant. During the experiment, the TP of the effluent was reduced by 68.66%. After stabilization, the effluent TP reached the surface water V standard. The main form of leached TN was NO_3^- -N and the leaching of NO_3^- -N could be reduced by rice husk charcoal. In the experiment, the NO_3^- -N leaching mass was reduced by 28.86% totally. Increasing the amount of rice husk charcoal helped to control NO_3^- -N leaching. SS and COD could be quickly decreased and stabilized. The COD of effluent after stabilization was about $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which was better than the standard of surface water V. Under the condition of actual precipitation with medium and small rainfall, the anaerobic sludge nutrient retention time should be more than 1 year, which meets the growing needs of plants for a long time.

Key words: sponge city; extensive green roof; substrate; effluent quality; artificial rainfall; anaerobic digested sludge

近年来,以径流源头控制为主要目标的海绵城市建设在我国蓬勃兴起。粗放型绿色屋顶(extensive green roof)作为一项重要的城市雨水管理技术,在海绵城市建设中受到广泛关注。粗放型绿色屋顶具有削减径流总量、延迟洪峰、缓解热岛效应、控制重金属和微量有机物等作用^[1,2],在发达国家应用广泛^[3,4]。已有的研究经验及相关研究表明^[3],粗放型绿色屋顶是一种投入使用后低维护或免维护的绿色屋顶类型。然而,已有的一些研究表明^[5],在免维护条件下应用时,不追肥的绿色屋顶的生长基质会随着使用时间的延长出现养分匮乏等问题,不能很好满足植物的生长需求。而使用过程中进行追肥,会造成养护成本增加等问题。国外有商品化含

缓释肥料的基质出售,能较好平衡养分供应与营养物淋失控制,但商家不提供具体配方。

厌氧稳定污泥是污水处理厂剩余污泥厌氧消化处理后的产物,富含有机质和氮磷等营养物质^[6,7]。近年来城市污泥产量不断增加,污泥的资源化利用日益受到人们的关注。将厌氧稳定污泥应用于园林绿化,在国内外均受到重视^[8],并取得了良好的应用效果,污泥应用于园林绿化能增加植物生物量,且肥效较长^[9]。然而,目前缺少将厌

收稿日期: 2017-01-23; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 上海市科委项目(16DZ1202106)

作者简介: 沈庆然(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市面源污染控制, E-mail: ndiwill@163.com

* 通信作者, E-mail: tianli@tongji.edu.cn

氧稳定污泥应用于粗放型绿色屋顶生长基质的研究. 若能将厌氧稳定污泥用作粗放型绿色屋顶生长基质组成,有利于资源循环利用,有助于支持植物生长,同时不需考虑植物中有害物质积累的风险. 然而,粗放型绿色屋顶基质层厚度一般不超过 20 cm^[10],由此带来的营养物质淋出风险,比应用于园林绿化时更大.

为了研究厌氧稳定污泥应用于粗放型绿色屋顶生长基质时的合理组成,搭建了不同配比的粗放型绿色屋顶小试装置,考察使用过程中装置出水水质情况与基质自身营养物质含量变化情况,结合厌氧稳定污泥资源化利用时带来的氮、磷淋出问题,讨论不同改良材料的效果.

1 材料与方法

1.1 实验装置和基质组成

模拟绿色屋顶小试装置设置在同济大学校园内的阳光棚下,能够保证光照同时避免降水干扰. 装置包括 8 个 0.4 m×0.3 m×0.2 m 的 HDPE 塑料箱和相应的支架,呈 5% 坡度倾斜放置. 在模拟装置较低的一端设有出水口,用于收集出水. 装置内种植景天属垂盆草(*Sedum sarmentosum* Bunge). 参考德国 FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) 屋顶绿化指南对生长基质的要求,结合本文的研究目标,以浮石为主要无机轻质组分,

发酵桦木屑为主要有机组分,添加田园土增强基质支持植物生长的能力. 针对利用污泥作为基质组分带来的问题,分别选择了不同特点的基质补充成分(表 1). 过滤层使用 200 g·m⁻² 的透水土工布,用以防止基质层颗粒物随出水流失,排水层采用厚度为 0.03 m 的塑料排水板.

Ref1、Ref2 基质为设计的空白对照. Ref1 是基础配比,用来评价基础配比的污染物淋出情况;Ref2 包含除厌氧稳定污泥以外的所有材料,用来评价改良材料自身的污染物淋出情况. B、S、C、Z、I 基质是在 Ref1 的配比上添加不同组分得到的实验组;B 含有厌氧稳定污泥(取自上海白龙港污水处理厂),用以探讨厌氧稳定污泥的使用效果,同时 B 也与 S、C、Z、I 形成对照;S 基质含有给水厂污泥;C 基质含生物炭(Charcoal),本文使用的是稻壳炭(上海小凡园林绿化有限公司);Z 基质含有天然斜发沸石(Zeolite,浙江缙云神石矿业有限公司);I 组包含生物炭和沸石,I2 与 I1 配比相同,其中 I1 是将所有材料混合均匀作为生长基质层;I2 的生长基质层为分层结构,将发酵木屑、田园土、厌氧稳定污泥以及少量浮石用作上层(营养层),其余材料置于下层(吸附层),由此构成 I2 生长基质层. 为了充分考察厌氧稳定污泥的使用效果同时保证基质有机质总量不超过 FLL 的规定,经过计算后选择 5% 的厌氧稳定污泥质量比.

表 1 模拟装置的基质组成及主要参数

Table 1 Composition and main parameters of simulated green roof substrates

编号	基质深度 /cm	基质组成(质量分数)	堆密度 /kg·m ⁻³
Ref1	10	浮石 75% + 发酵木屑 5% + 田园土 20%	575
Ref2	10	浮石 56% + 发酵木屑 5% + 田园土 20% + 给水厂污泥 10% + 稻壳炭 1% + 沸石 8%	604
B	10	浮石 70% + 发酵木屑 5% + 田园土 20% + 厌氧稳定污泥 5%	591
S	10	浮石 60% + 发酵木屑 5% + 田园土 20% + 厌氧稳定污泥 5% + 给水厂污泥 10%	600
C	10	浮石 69% + 发酵木屑 5% + 田园土 20% + 厌氧稳定污泥 5% + 生物炭 1%	550
Z	10	浮石 62% + 发酵木屑 5% + 田园土 20% + 厌氧稳定污泥 5% + 沸石 8%	587
I1	10	浮石 51% + 发酵木屑 5% + 田园土 20% + 厌氧稳定污泥 5% + 给水厂污泥 10% + 生物炭 1% + 沸石 8%	610
I2	10	浮石 51% + 发酵木屑 5% + 田园土 20% + 厌氧稳定污泥 5% + 给水厂污泥 10% + 生物炭 1% + 沸石 8%	610

表 1 中,厌氧稳定污泥为颗粒态干污泥,其好氧呼吸速率(AT₄)为 2.76 mg·g⁻¹,稳定性良好^[11]. 木屑有机质有助于维持基质层土壤结构,帮助植物生长. 木屑为经发酵处理后的桦木屑,C/N 为 54,而原木屑 C/N 为 266,原木屑在夏季高温期间会降解增加出水 COD 和 SS^[12]. 生物炭对 NO₃⁻-N 的淋失有一定的控制作用^[13-15],静态吸附实验表明,所用稻壳炭对 NO₃⁻-N 的吸附符合 Langmuir 方程,饱和吸附容量为 28.75 mg·g⁻¹,控制机理为物理吸附^[16, 17]和

静电吸附^[18]. 沸石具有阳离子交换能力,对 NH₄⁺-N 有吸附作用^[19-21]. 浮石密度小、强度高,能够保证绿色屋顶基质层所需的强度和较低的堆密度^[22]. 给水厂污泥能够控制 P 的淋失^[23, 24]. 绿色屋顶生长基质组成材料的理化性质见表 2,其中有机质含量采用干烧法测定.

1.2 模拟降雨操作

用自来水模拟降雨,与监测目标相关的自来水水质指标见表 3. 采用恒水位高位水箱和喷淋装置

表 2 基质组成材料的部分理化性质¹⁾

Table 2 Several physico-chemical properties of the substrates			
材料	有机质 (质量比)/%	堆密度 /g·cm ⁻³	总氮 /mg·g ⁻¹
浮石	0.35	0.65	/
木屑	88.71	0.34	3.20
田园土	3.02	1.40	1.68
厌氧稳定污泥	44.13	0.70	30.54
给水厂污泥	6.51	1.30	/
稻壳炭	74.90	0.14	1.77
沸石	0.05	1.20	/

1) “/” 表示未测定

模拟降雨, 每次降雨量 50 mm, 降雨强度为 10 mm·h⁻¹. 装置产生出流时, 将所有出流收集并记录出流总量. 模拟降雨实验每周进行一次, 出水水样均在 24 h 内完成水质指标检测.

表 3 实验用自来水水质指标/mg·L⁻¹

Table 3 Characteristics of tap water used in this study/mg·L ⁻¹						
指标	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TP	COD	SS
浓度	2.05	1.91	0.05	0.03	9.0	— ¹⁾

1) “—” 表示未检出

1.3 指标监测

监测水质指标包括 SS、COD、TP、TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N, 另外, 还测定了植物体中 N 元素含量. 根据国家环保局标准, SS 用重量法, TN 用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法, TP 用过硫酸钾消解-钼锑钨分光光度法, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法, NO₃⁻-N 采用酚二磺酸分光光度法, COD 采用比色法 (HACH DRP 2010), 植物 N 元素含量使用元素分析仪 (Elementar, Vario EL III) 测定.

2 结果与讨论

由表 3 可知, 与天然降雨相比, 自来水 NH₄⁺-N 浓

度略低. 由于实验出水水质数据不符合正态分布, 因此实验数据的统计分析时, 使用 Kruskal-Wallis 检验比较不同装置的出水水质差异, 用 Origin 9.0 软件完成全部数据分析. 另外, 实验中观察到, 降雨量少于 10 mm 时, 装置基本不出流或只有很少出流. 出水检测结果如下.

2.1 TP 的出水水质特征及控制效果

各个装置出水 TP 的平均浓度、淋出液浓度变化过程及累积淋失质量见图 1. I2 装置的实验滞后一次, 但不影响实验结果的分析. Ref1、Ref2 的出水 TP 平均浓度分别为 0.10 mg·L⁻¹ 和 0.13 mg·L⁻¹, 略低于 Teemusk 等^[25, 26] 的实验结果, Teemusk 的实验中生长基质构成与本文的空白对照相似, 并且没有施肥. 自来水 TP 含量很低, 实验组出水 TP 的主要来源为基质中的厌氧稳定污泥^[27]. 不含给水厂污泥的 B、C、Z 装置 TP 大量淋出, 出水平均浓度均超过 1.0 mg·L⁻¹, 与 Berndtsson 等^[28] 搭建的施肥粗放型绿色屋顶装置出水 TP 浓度相近. S、I1、I2 装置出水 TP 平均浓度均在 0.37 mg·L⁻¹ 左右, 显著低于 B、C、Z 装置. 另一方面, 从出水 TP 的变化过程看, B、C、Z 装置的出水 TP 先下降, 之后持续上升, 浓度约为 1.0 mg·L⁻¹, 实验后期 TP 浓度不降反升可能与气温升高有关; 与之相反, S、I1、I2 出水 TP 浓度一直低于 B、C、Z 装置, 且后续实验中未发生浓度升高的情况, 水质稳定, 稳定后浓度可以达到地表水 V 类标准. 数据分析表明, S、I1、I2 出水 TP 浓度与 B、C、Z 装置有显著性差异 ($p < 0.05$); S、I1、I2 出水 TP 浓度中位数小于 B、C、Z 装置 ($P < 0.05$). 另外, 就 TP 累积淋出质量而言, B、C、Z 装置 TP 累计淋出质量平均为 46.52 mg, S、I1、I2 装置 TP 累计淋出质量平均为 14.58 mg, 较未

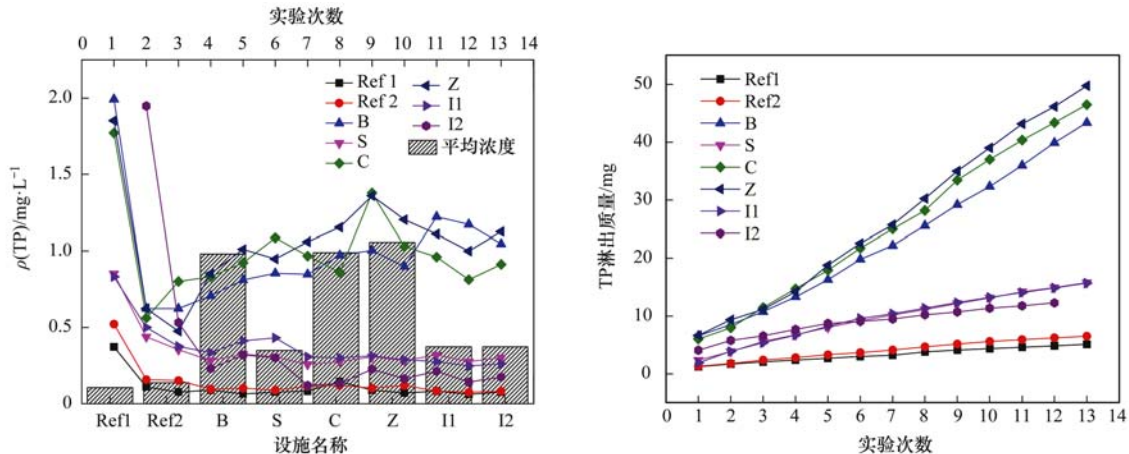


图 1 各装置出水 TP 的平均浓度、淋失过程以及累积淋失质量

Fig. 1 Average concentration, leaching process and cumulative leaching loss of total phosphorus

添加给水厂污泥的装置少 68.66%。且由图 1 可知, 分层结构的 I2 装置 TP 控制效果最好。因此, 给水厂污泥能够有效抑制基质 TP 的淋出, 且不会影响植物对磷的吸收^[29]。

2.2 COD 及 SS 的出水水质特征

COD 和 SS 的平均浓度及淋出液浓度变化过程见图 2。首次进水, 除 Ref1 和 Ref2 装置的 COD 低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外, 其他实验组 COD 均高于 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 实验组首次实验 COD 较高的原因是厌氧稳定污泥含有的大量水溶性有机质随出水淋出^[7]。随着实验的进行, 所有装置出水 COD 的浓度可很快下降并稳定在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 优于地表水 V 类水水体要求。Ref2 的 COD 平均浓度略高于 Ref1, 可能与 Ref2 基

质组成中的稻壳炭及给水厂污泥中含有溶解性有机质有关。数据分析表明, 实验组出水 COD 浓度分组类别相同 ($P = 0.09$), 各装置没有显著性差异。木屑经发酵后在夏季性能稳定, 未发生降解后 COD 淋出现象。

出水中 SS 浓度变化情况与 COD 类似。首次实验各装置出水 SS 浓度较高, 从第二次进水开始, 实验组装置出水中 SS 的浓度稳定在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 后续实验波动很小。Berndtsson 等^[30]的研究表明, SS 等污染物的来源主要有基质自身以及大气沉降等。实验组装置出水 SS 质量浓度较低, 可能与过滤层材料及实验中各装置的植物长势较好有关^[27, 31]。

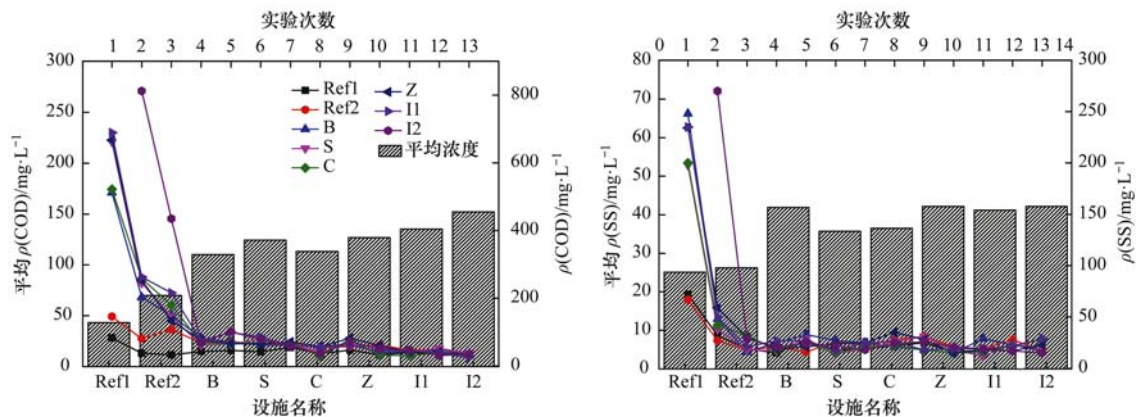


图 2 各装置出水 COD、SS 的平均浓度及淋失过程
Fig. 2 Average concentration and leaching process of COD and SS

2.3 N 素的出水水质特征

各个装置出水含 N 化合物的平均浓度、淋出液浓度变化过程及部分装置 NO_3^- -N 累积淋失质量见图 3。各装置出水 TN 浓度很高, 发生了较为严重的淋出, 国外的有研究观察到了类似现象^[32~34]。空白对照 Ref1 和 Ref2 出流 TN 平均浓度分别为 $2.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这与文献^[27, 35]得到的结果类似, 可视为没有发生过量淋出。对照基质组成可以推断厌氧稳定污泥为 TN 淋失的主要来源。

除 I2 装置外, 其他装置的 NH_4^+ -N 首次实验时存在大量淋出, 首次实验出水 TN 几乎全部为 NH_4^+ -N, NO_3^- -N 浓度很低。厌氧稳定污泥中包含有机氮和无机氮, 其中无机氮主要存在形式是 NH_4^+ -N, 占到 TN 的 18.4%^[7], 首次实验的实验结果与厌氧稳定污泥的特征相符。从第二次实验开始, 出水 NH_4^+ -N 浓度急剧下降, NO_3^- -N 上升, 出水中 TN 几乎全为 NO_3^- -N, 之后的实验出水中 NH_4^+ -N 浓度一直小于 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。产生这个现象的原因可能是在进水

的间隔期, NH_4^+ -N 在合适的环境中通过硝化作用转化为 NO_3^- -N, 这与文献^[33, 36]的实验结果类似。从装置类型方面看, 含有沸石的装置出水 NH_4^+ -N 平均浓度明显低于不含沸石的装置, 沸石对 NH_4^+ -N 有一定的控制效果, 且主要作用为能够抑制首次实验出水中 NH_4^+ -N 的浓度, 这应该与沸石能够吸附 NH_4^+ -N 有关^[37~39]。同时, I2 装置首次实验 NH_4^+ -N 浓度明显低于其他装置, 并且在后续实验中没有波动, 表明分层结构有助于控制 NH_4^+ -N。 NH_4^+ -N 的淋出主要发生在实验初期, 若实验初期进水的水量控制在不超过满足基质的田间持水度需要, 不同组成的基质都能避免 NH_4^+ -N 的淋出。因此, 就控制 NH_4^+ -N 淋出而言, 沸石的作用不大。

从第 2 次进水开始, 出水中 NO_3^- -N 浓度急剧增加。第 8 次实验开始出水中 NO_3^- -N 浓度升高, 这与环境温度升高, 加速了厌氧稳定污泥中有机氮的矿化有关^[40], NO_3^- -N 来源主要是有机氮的矿化和 NH_4^+ -N 的硝化。实验装置的出水 NO_3^- -N 平均浓度在

20 ~ 30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 国外^[33, 34]的施肥型绿色屋顶实验也报道了类似的结果, 甚至更高, 因此, 就氮淋出而言, 使用厌氧稳定污泥与直接施肥类似. 图 3 表明, C、I1、I2 (含生物炭装置) NO_3^- -N 浓度要低于 B、S、Z (不含生物炭装置). 数据分析表明, 含生物炭装置与不含生物炭装置出流 NO_3^- -N 浓度存在显著性差异 ($P < 0.05$), 含生物炭装置 NO_3^- -N 浓度中位数低于不含生物炭装置 ($P < 0.05$). 就 NO_3^- -N 累积淋出质量而言, 含生物炭装置累计淋出质量明显小于对照组 B, 累积淋失质量比 B 装置平均少 28.86%. 另外, 为确定稻壳炭用量的影响, 本实验

设计了 C' 装置, C' 稻壳炭的用量是 C 组的 2 倍 (2% 质量比), 其他配比组成与 C 组相同. 实验结果表明, C' 组 NO_3^- -N 累积淋出质量比 C 组少 20.66%. 增加稻壳炭用量能够降低出流中 NO_3^- -N 浓度, 同时改善装置的水文效果, 进而减少累积淋失质量. 但兼顾基质中营养物质含量与 NO_3^- -N 淋出的合理配比有待进一步研究.

出水 TN 的变化过程总体呈波动下降的趋势, 历次实验 (NH_4^+ -N + NO_3^- -N)/TN 的平均值为 88.42%, 分析可知, TN 淋失的主要原因是 NO_3^- -N 的淋出, Collins 等^[41]报道了类似的结果.

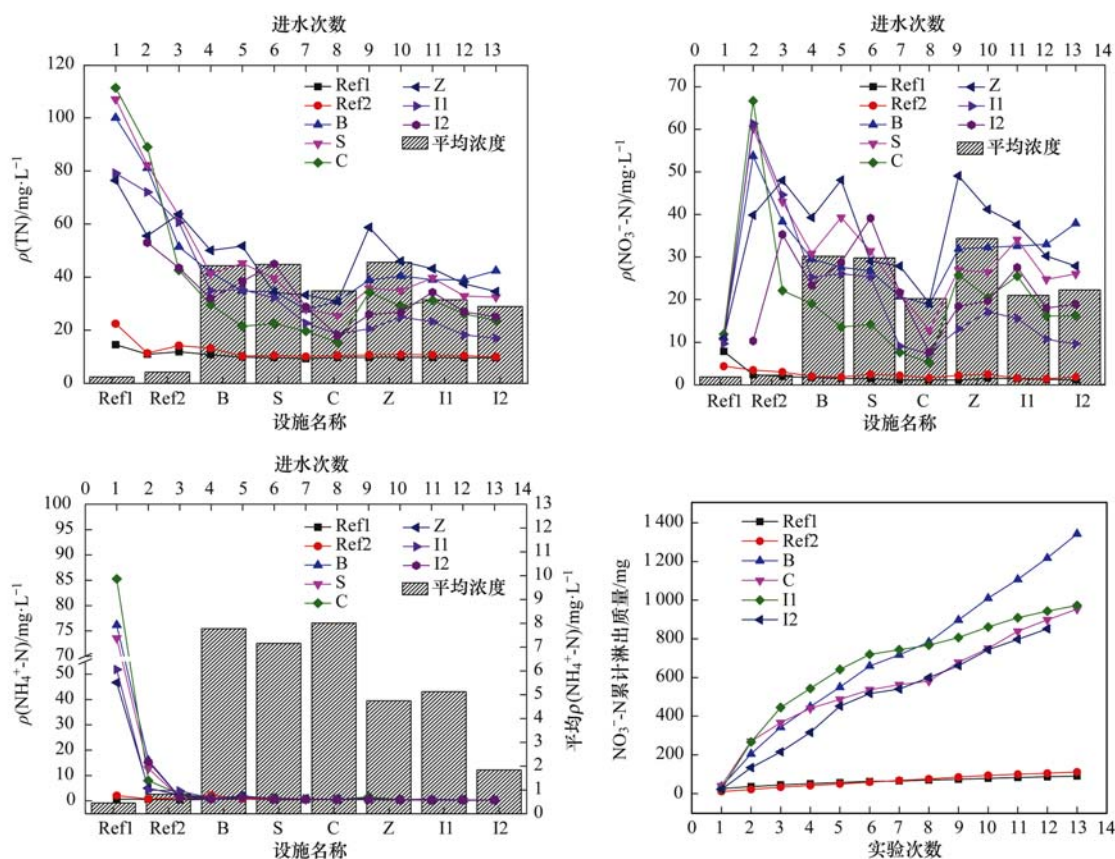


图 3 各装置出水含氮物质的平均浓度、淋失过程及累积淋失质量

Fig. 3 Average concentration, leaching process, and cumulative leaching loss of nitrogenous compounds

2.4 粗放型绿色屋面模拟装置氮平衡以及植物生长情况

各模拟装置的 TN 含量测定结果见图 4, 据此对实验前后基质中 TN 数据进行平衡分析, 平衡式如下.

输入装置 TN = 输出装置 TN + 装置残留 TN + 差值 Δ , 即:

进水 TN + 实验前各基质 TN = 植物体 TN + 淋出 TN + 基质残留 TN + 差值 Δ

图 4 表明, 各个实验装置经过总计 650 mm 暴

雨规模的模拟降雨淋洗后, 残留 TN 依然占输入 TN 一半以上. 添加了稻壳炭的复合基质淋失氮百分比略低于不含稻壳炭的装置, 残留 TN 也略高于不含稻壳炭的装置, 其中 I2 的淋失 TN 百分比最小, 进一步体现出基质分层的优势. 实验组装置 (不包括空白对照) 实验前后 TN 差值 Δ 产生的原因可能是部分 NO_3^- -N 在合适的环境下经反硝化生成 N_2 进入大气而被永久去除, 木屑可能对反硝化过程有促进作用^[42, 43].

上海市年平均降雨量为 1 132.9 mm, 其中小雨、

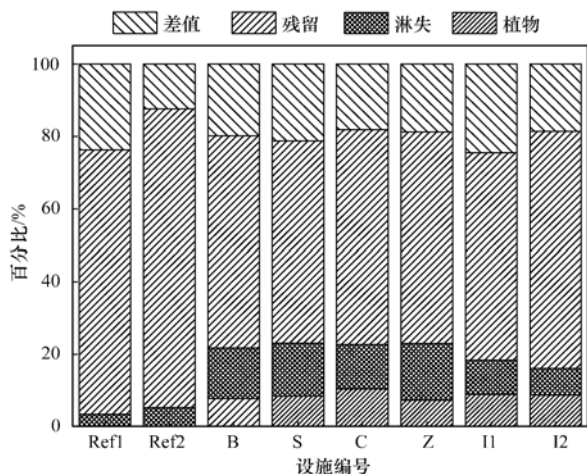


图4 各装置出水 TN 平衡关系

Fig. 4 Total nitrogen balance in effluent of each unit

中雨、大雨、暴雨的年均降雨总量分别为 263.5、341.3、293.0、235.0 mm。其特点是小雨和中雨最多,降雨量占年总降雨量的 53.38%^[44]。上海市的大雨和暴雨的年平均降雨总量之和低于模拟降雨总量。另外,粗放型绿色屋顶在上海地区实际降雨条件下有很好的水文控制效果,10cm 厚度的粗放型绿色屋顶对降水量的平均削减率可以达到 68.8%^[23]。由上述分析可知,实际降雨条件下,小雨、中雨的水量基本能够被装置滞留,不会发生出流;大雨和暴雨的年平均降雨总量之和低于模拟降雨总量,实际条件下 1a 的降雨造成的营养物质淋出量不会高于模拟实验。因此,实际降雨条件下使用厌氧稳定污泥与补充吸附介质,装置所含氮素 1 年后仍能保留大部分,能够有效保证植物较为长期生长的需要。

植物栽种时间为 2016 年 5 月 11 日,收割日期为 2016 年 9 月 12 日,生长时间 4 个月,主要为夏季。实验期间,对照组 Ref1 与 Ref2 装置植物不能正常生长,覆盖度及鲜物质量与实验开始时相近。其余实验装置植物长势旺盛,实验前后植物平均增重 808%,覆盖度达到 100%。

3 结论

(1) 不添加污水厂厌氧稳定污泥的空白组植物无法正常生长,含有厌氧稳定污泥的实验组植物长势旺盛,在 4 个月的实验周期内,植物平均增重 808%,覆盖度达到 100%。

(2) 给水厂污泥能够有效地抑制厌氧稳定污泥中的 TP 淋出,出水 TP 平均浓度满足地表 V 类水体标准。

(3) 厌氧稳定污泥提供植物养分的同时会造成

严重的 NO_3^- -N 淋失, NO_3^- -N 主要来源为厌氧稳定污泥中有机氮的矿化和 NH_4^+ -N 的硝化。运行初期控制进水量不超过补足基质的田间持水度,可避免含厌氧稳定污泥的基质中 NH_4^+ -N 的淋出。

(4) 稻壳炭作为基质成分对 NO_3^- -N 的淋出有一定控制作用,且增加稻壳炭的用量能够提升控制效果。栽培介质与过滤净化介质分层铺设有助于减少营养物质淋出。

(5) 经夏季 4 个月进水 650 mm 的实验过程,复合基质中残留 TN 占初始 TN 的一半以上。在中小降雨为主的实际降雨条件下,基质中厌氧稳定污泥所含 N 素营养物可以维持 1 a 以上,可满足植物较长时间的生长需求。

参考文献:

- [1] 沈庆然, 侯娟, 李田. 粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4700-4705.
Shen Q R, Hou J, Li T. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons by extensive green roofs [J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4700-4705.
- [2] Vijayaraghavan K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 740-752.
- [3] Sutton R K. Green roof ecosystems[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [4] Li Y L, Babcock R W Jr. Green roofs against pollution and climate change. A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(4): 695-705.
- [5] Clark M J, Zheng Y B. Plant nutrition requirements for an installed sedum-vegetated green roof module system: effects of fertilizer rate and type on plant growth and leachate nutrient content[J]. HortScience, 2013, 48(9): 1173-1180.
- [6] Hospido A, Carballa M, Moreira M, et al. Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: potential impacts of emerging micropollutants [J]. Water Research, 2010, 44(10): 3225-3233.
- [7] 周立祥, 胡霭堂, 胡忠明. 厌氧消化污泥化学组成及其环境化学性质[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(2): 176-181.
Zhou L X, Hu A T, Hu Z M. The composition and characteristics of anaerobically digested sludge [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3(2): 176-181.
- [8] 张悦, 唐建国. 英、法两国污泥处理处置情况介绍[A]. 见: 中国土木工程学会. 中国土木工程学会全国排水委员会 2011 年年会论文集[C]. 重庆: 中国土木工程学会, 2011. 592-625.
- [9] 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2464-2474.
Li Y X, Chen T B, Luo W, et al. Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2464-2474.
- [10] Russell V. Guidelines for the planning, execution and upkeep of green-roof sites[J]. Landscape Architecture, 2005, 95(10): 180-181.

- [11] Shao Z H, He P J, Zhang D Q, *et al.* Characterization of water-extractable organic matter during the biostabilization of municipal solid waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164**(2-3): 1191-1197.
- [12] 王建军. 生物滞留技术处理地表径流的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2014. 28-29.
- [13] Laird D, Fleming P, Wang B Q, *et al.* Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, **158**(3-4): 436-442.
- [14] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, *et al.* Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2013, **206**: 32-39.
- [15] Steiner C, Glaser B, Gerdaldes Teixeira W, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**(6): 893-899.
- [16] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, *et al.* Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, **95**(3): 255-257.
- [17] Dong D, Feng Q B, McGrouther K, *et al.* Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 153-162.
- [18] Khan M A, Ahn Y T, Kumar M, *et al.* Adsorption studies for the removal of nitrate using modified lignite granular activated carbon[J]. *Separation Science and Technology*, 2011, **46**(16): 2575-2584.
- [19] Colombani N, Mastrocicco M, Di Giuseppe D, *et al.* Batch and column experiments on nutrient leaching in soils amended with Italian natural zeolites[J]. *CATENA*, 2015, **127**: 64-71.
- [20] Leyva-Ramos R, Monsivais-Rocha J E, Aragon-Piña A, *et al.* Removal of ammonium from aqueous solution by ion exchange on natural and modified chabazite [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**(12): 2662-2668.
- [21] 林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. HCl 改性沸石和方解石复合覆盖层控制底泥氮磷释放的效果及机理研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 551-555.
- Lin J W, Zhu Z L, Zhao J F, *et al.* Efficiency and mechanism of compound barrier with HCl modification zeolite and calcite to control nitrogen and phosphorus release from sediments [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(3): 551-555.
- [22] 薛慧君, 申向东, 邹春霞, 等. 浮石及浮石轻骨料混凝土材料研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2016, **35**(5): 1536-1540, 1546.
- Xue H J, Shen X D, Zou C X, *et al.* Research progress of pumice and pumice lightweight aggregate concrete materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, **35**(5): 1536-1540, 1546.
- [23] 李田, 陈昱霖, 顾俊青. 不同介质组成的粗放型绿色屋面降雨出流水质[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, **43**(11): 1722-1727.
- Li T, Chen Y L, Gu J Q. Effluent quality of extensive green roofs with different substrates[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, **43**(11): 1722-1727.
- [24] 王建军, 李田, 张颖. 给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4642-4647.
- Wang J J, Li T, Zhang Y. Water treatment residual as a bioretention media amendment for phosphorus removal [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4642-4647.
- [25] Teemusk A, Mander ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: the effects of short-term events [J]. *Ecological Engineering*, 2007, **30**(3): 271-277.
- [26] Teemusk A, Mander ü. The influence of green roofs on runoff water quality: a case study from estonia[J]. *Water Resources Management*, 2011, **25**(14): 3699-3713.
- [27] 陈昱霖, 李田, 顾俊青. 粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4157-4162.
- Chen Y L, Li T, Gu J Q. Influence of the substrate composition in extensive green roof on the effluent quality[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4157-4162.
- [28] Berndtsson J Z, Emilsson T, Bengtsson L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality[J]. *Science of The Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 48-63.
- [29] Novak J M, Watts D W. An alum-based water treatment residual can reduce extractable phosphorus concentrations in three phosphorus-enriched coastal plain soils [J]. *Journal of Environment Quality*, 2005, **34**(5): 1820-1827.
- [30] Berndtsson J-C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(4): 351-360.
- [31] Morgan S, Alyaseri I, Retzlaff W. Suspended solids in and turbidity of runoff from green roofs[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, **13**(S1): 179-193.
- [32] Beecham S, Razzaghmanesh M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate[J]. *Water Research*, 2015, **70**: 370-384.
- [33] Emilsson T, Berndtsson J C, Mattsson J E, *et al.* Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems[J]. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(3): 260-271.
- [34] Razzaghmanesh M, Beecham S, Kazemi F. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment [J]. *Science of The Total Environment*, 2014, **470-471**: 651-659.
- [35] Gregoire B G, Clausen J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality [J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(6): 963-969.
- [36] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(3): 369-380.
- [37] Ming D W, Allen E R. Use of natural zeolites in agronomy, horticulture and environmental soil remediation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2001, **45**(1): 619-654.
- [38] Montalvo S, Guerrero L, Borja R, *et al.* Application of natural zeolites in anaerobic digestion processes: a review[J]. *Applied Clay Science*, 2012, **58**: 125-133.
- [39] Passaglia E, Laurora A. NH₄ exchange in chabazite, heulandite-clinoptilolite, and phillipsite[J]. *Rendiconti Lincei*, 2013, **24**(4): 369-376.
- [40] 王良梅, 刘树新, 杨丽. 污泥有机氮在林地土壤中的矿化动态[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2012, **36**(5): 87-91.
- Wang G M, Liu S X, Yang L. Incubation study on nitrogen

- mineralization dynamics of forest soil amended with sewage sludge [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2012, **36**(5): 87-91.
- [41] 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.
- [42] Cameron S G, Schipper L A. Nitrate removal and hydraulic performance of organic carbon for use in denitrification beds[J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(11): 1588-1595.
- [43] Greenan C M, Moorman T B, Parkin T B, *et al.* Denitrification in wood chip bioreactors at different water flows[J]. Journal of Environment Quality, 2009, **38**(4): 1664-1671.
- [44] 房国良, 高原, 徐连军, 等. 上海市降雨变化与灾害性降雨特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(10): 1270-1273.
- Fang G L, Gao Y, Xu L J, *et al.* Analysis of precipitation change and the characteristics of disaster rainfalls in shanghai [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, **21**(10): 1270-1273.



CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)