

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明(789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁(795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌(801)

北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪(807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶(816)

上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰(825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛(834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山(847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康(854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒(862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊(873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙(884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉(893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕(900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇(910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶(917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿(925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良(935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军(942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰(950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇(955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃(963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩(970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东(980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博(988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹(994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇(1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛(1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷(1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇(1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬(1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞(1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印(1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚(1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉(1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪(1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航(1075)

1株*Arthrobacter arilaitensis*菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义(1082)

海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津(1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁(1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义(1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐(1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼(1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽(1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大(1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝(1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮(1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东(1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇(1171)

《环境科学》征订启事(1138) 《环境科学》征稿简则(1155) 信息(824,853,883)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响

汪健¹, 李怀正^{1*}, 甄葆崇², 刘振东¹

(1. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海闵行污水处理运营有限公司, 上海 201100)

摘要: 采用单级垂直潜流湿地处理城镇污水厂沉砂池出水, 通过提高湿地出水水位控制淹没水深作为缺氧区; 并在湿地反应柱下部安装穿孔曝气管, 从而在湿地上部创造好氧环境. 通过优化间歇曝气的曝气时间与间歇时间比例(间歇曝气比例)以及间歇曝气周期两个参数来提高湿地脱氮效率. 结果表明, 随着间歇曝气比例增大, 湿地对 COD 和 NH_4^+ -N 的去除率逐渐升高, 而 TN 去除率有先升高后下降的趋势, 当曝气比例为 3:1 时, 缺氧段污水碳氮比(C/N)值达到 4.8, TN 去除率达到最高为 62.1%, 较连续曝气提高了 12.7%, 出水质量浓度为 $15.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 随着间歇曝气周期的延长, 出水 DO 质量浓度逐渐降低, COD 和 NH_4^+ -N 去除率也逐渐降低, TN 去除率在周期为 6 h 时达到最大为 65.5%, 当曝气周期超过湿地缺氧段水力停留时间时, TN 去除率迅速下降.

关键词: 人工湿地; 间歇曝气; 碳源; 脱氮; 水力停留时间

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0980-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.024

Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland

WANG Jian¹, LI Huai-zheng^{1*}, ZHEN Bao-chong², LIU Zhen-dong¹

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Minhang Wastewater Treatment & Operation Limited Company, Shanghai 201100, China)

Abstract: One-stage vertical subsurface flow constructed wetlands (CWs) were used to treat effluent from grit chamber in municipal wastewater treatment plant. The CW was divided into aerobic zone and anoxic zone by means of raising the effluent level and installing a perforated pipe. Two parameters (the ratio of aeration time and nonaeration time, aeration cycle) were optimized in the experiment to enhance nitrogen removal efficiency. The results suggested that the removal rates of COD and NH_4^+ -N increased while TN showed a trend of first increasing and then decreasing with the increasing ratio. When the ratio was 3:1, the C/N value in the anoxic zone was 4.8. And the TN effluent concentration was $15.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with the highest removal rate (62.1%), which was increased by 12.7% compared with continuous aeration. As the extension of the aeration cycle, the DO effluent concentration as well as the removal rates of COD and NH_4^+ -N declined gradually. The TN removal rate reached the maximum (65.5%) when the aeration cycle was 6h. However, the TN removal rate dropped rapidly when the cycle exceeded the hydraulic retention time in the anoxic zone.

Key words: constructed wetland; intermittent aeration; carbon source; nitrogen removal; hydraulic retention time

人工湿地因其造价低、无二次污染等优点广泛应用于我国农村地区^[1,2]. 然而传统人工湿地在脱氮和复氧方面存在的诸多缺陷限制其广泛地应用和发展^[3-5]. 人工湿地能够很好地去掉 BOD、TSS 和大肠杆菌等^[6], 却不能很好地脱氮^[4,7-9]. 硝化反硝化作用被认为是湿地脱氮的最主要形式^[4,9], 这就要求人工湿地中要有明确的好氧环境和缺氧环境供硝化菌和反硝化菌的生长^[10], 并在缺氧段有足够的碳源保证反硝化反应的发生^[11]. 目前常用的跌水复氧^[12]、通气管复氧^[13]等增氧方式只能单方面解决湿地供氧不足的缺陷, 无法在单级湿地内部营造好氧、缺氧环境, 过度的充氧反而会抑制反硝化反应的进行, 不利于 TN 的去除. 湿地中反硝化碳源可以分为以下三类^[14]: 污水中的碳源、湿地系统内的碳源和外加碳源. 湿地系统内碳源主要依靠植物根

系释放、植物死亡分解, 远远满足不了反硝化的需要^[15]. 甲醇、乙醇等低分子有机物被认为是理想的外加碳源, 但该类物质存在一些不容忽视的缺点, 如本身的毒性会对环境造成潜在的危害, 且管理要求高、出水 COD 也高, 同时增加运行管理费用^[14]. 因此合理利用污水中的碳源促进反硝化反应发生对于增强人工湿地脱氮具有重要意义. 有学者^[16,17]通过间歇曝气的方式同时实现了对湿地供氧和增强反硝化脱氮, 但对于如何优化间歇曝气的运行参数未能继续深入研究. 本研究通过对间歇曝气中两个重要参数(周期内曝气时间与间歇时间的比例、间歇曝

收稿日期: 2015-09-04; 修订日期: 2015-10-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07312-001-005)

作者简介: 汪健(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人工湿地技术, E-mail: wj787316@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: lihzh@tongji.edu.cn

气周期)进行优化来探讨间歇曝气提高湿地脱氮能力的内在机制。

1 材料与方法

1.1 实验场地与实验装置

如图 1(a) 所示, 实验场地在上海市闵行污水处理厂内, 实验进水取自污水厂沉砂池后集水井。湿地反应柱由蠕动泵控制进水流量。湿地反应柱结构见图 1(b), 由高 2 m、直径 0.4 m 的 PVC 圆柱制成, 柱体填充高 1.5 m、粒径 10 mm 左右的瓜子片作为湿地基质, 其上覆土 0.2 m 作

为布水层, 进水管设置在覆土中央。控制湿地淹没水深 0.45 m 作为缺氧段。曝气管安装在 0.5 m 高度位置, 与气泵相连, 由气体流量计控制流量, 时控开关控制曝气时间。在 1.1 m 位置填埋穿孔管, 外部安装球阀, 用于测定基质内部氧气含量。在 0.4 m 处设置采样口用于测定进入缺氧段的污水, 底部设置排空管。

1.2 实验方法与进水水质

实验中主要测定的污染物和相关指标以及使用的仪器见表 1。

实验期间湿地反应柱进水水质见表 2。

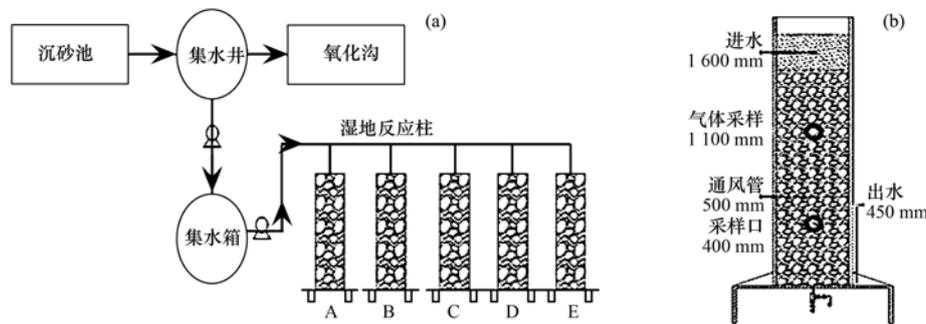


图 1 人工湿地实验场地及装置

Fig. 1 Experimental site and configuration of the constructed wetland

表 1 实验中检测方法及使用仪器

Table 1 Detection methods and instruments used in the experiment

序号	检测项目	检测方法	主要仪器
1	COD	重铬酸钾法	恒温加热器
2	SCOD	重铬酸钾法	恒温加热器、抽滤装置
3	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	纳氏试剂分光光度法	分光光度计
4	TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	高压蒸汽灭菌锅、分光光度计
5	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	酚二磺酸分光光度法	分光光度计
6	pH	—	WTW 手持式多参数水质测试仪
7	水温	—	WTW 手持式多参数水质测试仪
8	DO	—	WTW 手持式多参数水质测试仪
9	O_2	—	Oxyman 氧气测量仪

表 2 实验期间进水水质

Table 2 Water quality of the influent during the experiment period

项目	COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SCOD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$	DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
范围	168.7 ~ 357.2	104.4 ~ 168.3	26.6 ~ 38.6	32.3 ~ 45.2	18.6 ~ 26.4	0 ~ 0.18
均值	262.2	135.8	35.5	41.7	21.7	0.06

1.3 实验工况设置

本实验分为间歇曝气比例实验(2015-04-30 ~ 2015-06-04)和间歇曝气周期实验(2015-06-10 ~ 2015-07-15)两个部分。控制水力负荷 $0.7 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 瞬时曝气量 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (气水比 8:1)。实验具体工况如表 3 所示。

2 结果与分析

2.1 间歇曝气比例对湿地污染物去除效果的影响

间歇曝气比例实验中, 湿地按照设定的运行参数挂膜两周后出水水质基本稳定, 每隔 2 d 对进出水污染物质量浓度进行测定, 期间共进行 11 次水质

表 3 实验工况

装置编号	比例实验		周期实验	
	周期	曝气时间/间歇时间(比例)	比例	曝气周期(曝气与不曝气时间)
A	6 h	4 h/2 h (2:1)	3:1	2 h (1.5 h/0.5 h)
B	6 h	4.5 h/1.5 h (3:1)	3:1	3 h (2.25 h/0.75 h)
C	6 h	4.8 h/1.2 h (4:1)	3:1	4 h (3 h/1 h)
D	6 h	5 h/1 h (5:1)	3:1	6 h (4.5 h/1.5 h)
E	对照组	连续曝气	3:1	8 h (6 h/2 h)

测定. 各湿地反应柱出水污染物质量浓度情况如图 2 所示. 从图 2(a) 和 2(b) 中可以看出, 周期内随着曝气时间与不曝气时间比例的增大, 出水 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均质量浓度逐渐降低. 当该比例达到 3:1 时, 出水 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均质量浓度分别为 $54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均能达到城镇污水处理厂一

级 B 排放标准^[18]. COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除依赖于氧气的供给^[19], 好氧条件有利于微生物对有机物的降解, 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除途径主要依靠硝化菌的硝化作用. 因此在同一周期内, 随着曝气时间的延长, 湿地内部氧气的供给量越充足, 其去除率也就越高, 实验结果充分证明了这一点.

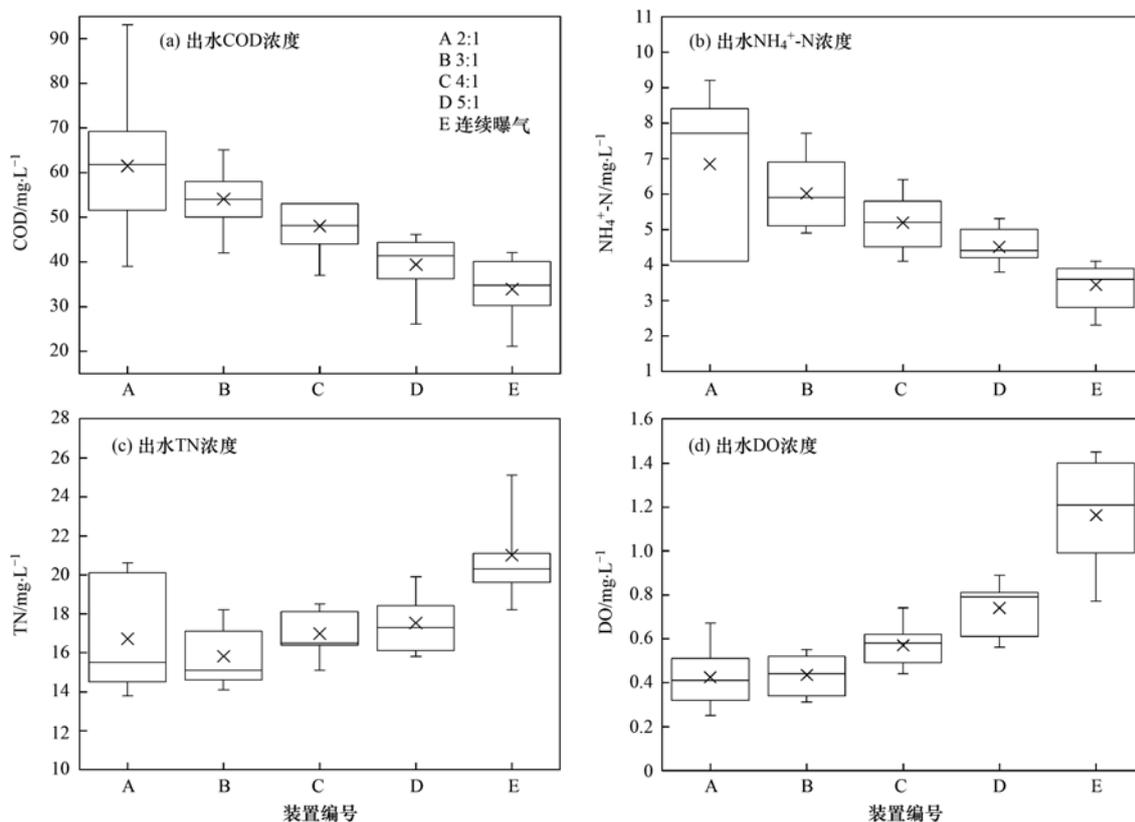


图 2 各湿地反应柱出水污染物浓度

Fig. 2 Effluent pollutant concentrations of different reaction columns

从图 2(c) 中可以看出, 间歇曝气的 A ~ D 反应柱出水 TN 质量浓度均低于连续曝气的 E 反应柱, E 反应柱出水 TN 质量浓度平均值为 $21.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率仅为 49.4%; 而间歇曝气的 A ~ D 反应柱出水平均质量浓度均在 $18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 其中比例为 3:1 时, 出水 TN 质量浓度最低, 仅为 $15.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率较连续曝气提高了 20.5%.

2.2 间歇曝气周期长短对湿地污染物去除效果的影响

间歇曝气周期工况中共进行 10 次水质测定. 各湿地反应柱出水污染物质量浓度情况如图 3 所示. 从图 3(a) 中可以看出, 随着曝气周期长度增加, 湿地对 COD 的去除能力大体上在不断下降. 反应柱 A 曝气周期为 2 h 时, COD 出水质量浓度最

低,平均质量浓度仅为 $27.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达到 89.5%;反应柱 E 曝气周期为 8 h 时,COD 出水质量浓度最高,平均质量浓度为 $57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 78.3%. 反应柱 B、C 曝气周期分别为 3 h 和 4 h,其出水 COD 平均质量浓度较为接近.

从图 3(b)中可以看出,湿地对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除表现出与 COD 十分相似的规律. 随着曝气周期长度的增加,湿地对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率逐渐下降. 反应柱

A 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度最低,仅为 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达到 91.5%;反应柱 B、C 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 出水平均质量浓度较为接近,分别为 $3.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而反应柱 D 和 E 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度相对较高,分别为 $5.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 总体而言,湿地对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果均较为理想. 各反应柱出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均质量浓度均能达到城镇污水处理厂污染物排放一级 B 标准.

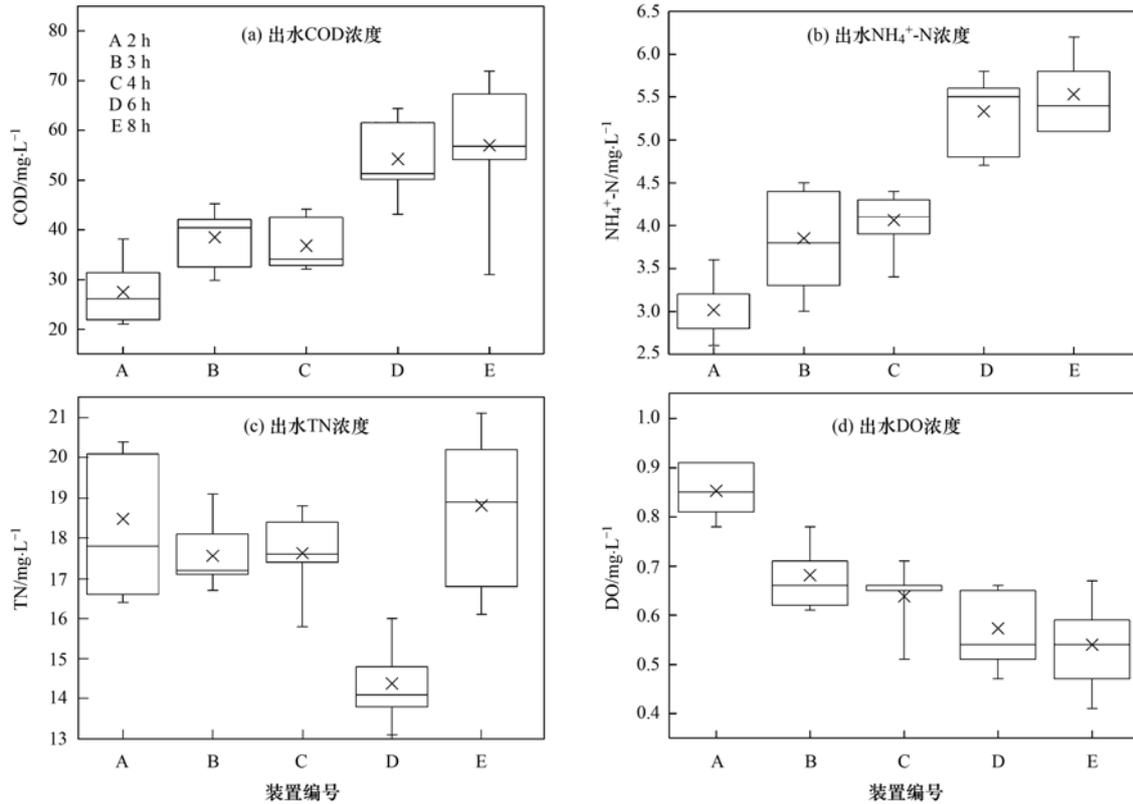


图 3 各湿地反应柱出水污染物浓度

Fig. 3 Effluent pollutant concentrations of different reaction columns

从上面的实验结论可以看出,随着曝气周期的不断延长,湿地对 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除呈现相同的趋势,即曝气周期越长,出水质量浓度越高. 曝气周期直接影响湿地的供氧频率,周期越短,湿地供氧越频繁,因而对湿地内部复氧越有利. 这点从图 3(d) 各湿地出水溶解氧不难得到证明. 随着曝气周期的延长,湿地出水溶解氧平均质量浓度呈现下降趋势. 周期最短的反应柱 A 出水 DO 质量浓度能达到 $0.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而周期最长的 E 反应柱出水 DO 平均质量浓度仅为 $0.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

用土壤氧气测定仪在反应柱 1.1 m 位置对土壤中氧气含量进行测定,对每个湿地反应柱从曝气周期开始进行测定,每隔 30 min 测一次,直至周期结

束. 测定结果如图 4 所示.

从图 4 中可以清楚地看出不同曝气周期条件下各湿地内部基质的含氧量变化情况. 空气中氧含量为 20.9%,反应柱 A 曝气周期为 2 h,曝气周期刚开始时,基质中氧含量仅为 20.1%. 一旦曝气开始,基质中氧含量迅速恢复到大气中的水平,即为 20.9%,当在 1.5 h 时曝气停止,此时氧含量逐渐下降,下降到 20.1% 时新一轮的曝气周期又开始. 因此对于曝气周期较短的反应柱 A,湿地中耗氧微生物无法在较短时间内大量消耗掉氧气,致使湿地中含氧量始终保持在较高水平(20% 以上),这就造成湿地出水溶解氧质量浓度较高、对 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率高于其他四组. 而同理可以分析其他四组

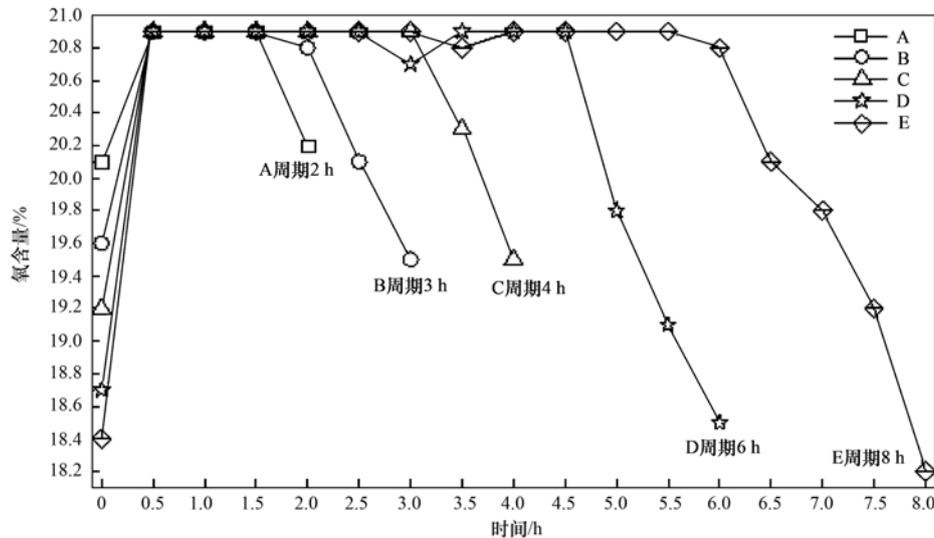


图4 各反应柱周期内基质含氧量的变化

Fig. 4 Change of oxygen content in the substrate of different reaction columns during the cycle

基质内氧含量变化情况,随着曝气周期的延长,湿地内基质氧含量在曝气间歇时下降逐渐增大,这也导致其缺氧段污水溶解氧逐渐降低,同时,在好氧段对 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率也逐渐减低。

3 讨论

3.1 间歇曝气比例对湿地脱氮效果影响分析

人工湿地在间歇曝气的运行模式下,曝气时间与不曝气时间的比例决定着整个运行过程中湿地内部处于好氧状态和缺氧状态的时间比例,直接影响着湿地的供氧量,该比例过大不仅使运行成本增加也不利于创造反硝化环境;过小则提供不了湿地污染物去除所需要的氧量。

湿地 TN 的去除主要依赖于硝化反硝化作用,需要湿地有好氧缺氧交替环境。好氧条件下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 发生硝化反应被转化为硝态氮,进入缺氧环境后在反硝化菌的作用下发生反硝化反应产生氮气使得 TN 被去除。一般认为溶解氧高于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 会对反硝化菌产生抑制作用^[20],一定程度上阻碍反硝化反应的进行。从图 2(d) 中可以看到,在连续曝气的条件下,反应柱出水 DO 平均质量浓度高达 $1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,无法满足反硝化所需要的缺氧环境,因此总氮去除率较低。大部分反硝化菌为异养菌,它们以有机物作为电子供体还原硝态氮。因此除了缺氧环境,碳源也是反硝化反应必不可少的因素。反硝化菌优先利用易降解的有机物作为碳源,一般以溶解性 COD 值作为碳源,硝酸盐氮作为氮源,通过二者的比值(即 C/N)来衡量反硝化反应是否能够充

分进行^[21]。将湿地反应柱 0.4 m 高度采样口水样作为进入缺氧段前的水样,对其 SCOD 和硝酸盐氮进行测定,结果如图 5 所示。

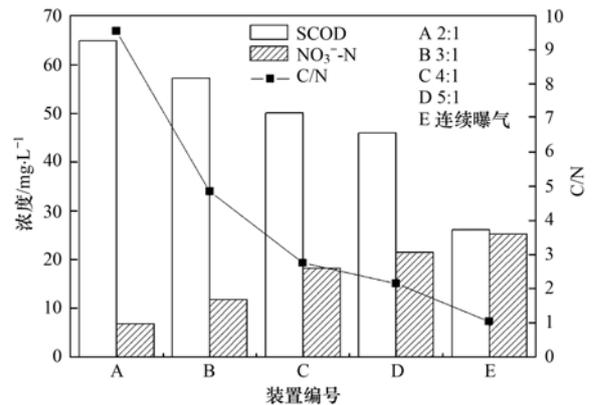


图5 缺氧区 SCOD、硝酸盐氮质量浓度及碳氮比

Fig. 5 Concentrations of SCOD, nitrate and C/N in the anoxic zone

从图 5 可以看出,随着周期内曝气时间的延长,曝气间歇时间缩短,进入缺氧段的污水 SCOD 质量浓度逐渐减低,硝酸盐氮质量浓度逐渐升高,因此造成 C/N 值逐渐降低,当曝气与不曝气时间比例为 2:1 时, C/N 为 9.4, 而连续曝气时该值仅为 0.9。结合图 2(c) 不难发现,连续曝气时湿地 TN 去除率最低,一方面由于缺氧段 DO 质量浓度较高,不利于反硝化反应的发生;另一方面,缺氧段碳源质量浓度过低, C/N 值仅为 0.9, 无法满足反硝化菌对碳源的需求。从反应柱 E ~ B, 曝气时间逐渐减少, TN 去除率逐渐升高,这是由于随着曝气时间缩短,进入缺氧段的碳源逐渐增多, C/N 值逐渐升高,从而 TN 去除率逐渐升高。而反应柱 A 的 C/N 值高达 9.4, 而 TN 的

去除率却低于反应柱 B. 反应柱 A 在曝气时间与不曝气时间比例为 2:1 的条件下进入缺氧段的硝酸盐氮只有 $6.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在好氧段硝化能力不足导致缺氧段硝酸盐氮质量浓度成为反硝化反应的限制因素, 从而导致 TN 去除率降低.

因此不难得出结论, 传统人工湿地由于复氧能力有限, 硝化能力不足, 硝酸盐氮质量浓度低成为反

硝化反应的制约因素, 从而导致 TN 去除率低; 而连续曝气时, 湿地内有机物被大量去除导致反硝化碳源不足, 同样制约反硝化反应, 导致 TN 去除率低. 控制合适的曝气时间和不曝气时间有利于提高湿地 TN 的去除率.

以 TN 的去除率为目标变量对实验结果进行单因素方差分析得到表 4.

表 4 间歇曝气比例的单因素方差分析

Table 4 One-way ANOVA of intermittent aeration ratio

项目	自由度	平方和	均方	F 值	显著性概率
模型误差(组间)	4	0.113 59	0.028 4	14.041 98	9.495 26E-8
随机误差(组内)	50	0.101 11	0.002 02		
总和	54	0.214 7			

由于显著性概率小于 0.05, 因此可认为在置信度 0.05 水平下, 间歇曝气的比例对 TN 去除率有显著性影响.

3.2 间歇曝气周期对湿地脱氮效果影响分析

间隙曝气运行模式中, 周期是另一个至关重要的运行参数. 周期的长短决定着湿地的供氧频率. 在曝气时间与不曝气时间的比例一定条件下, 周期越短则供氧频率越高, 周期越长则供氧频率越低. 频率过高一方面对控制设备要求高, 另一方面可能导致湿地充氧效果过好; 而频率过低则不利于湿地污染物去除, 尤其当周期超过湿地水力停留时间时则部分污水相当于没有经过好氧处理.

从图 3(c) 中可以明显看出, 反应柱 D 总氮出水平均质量浓度明显低于其他 4 组, 仅为 $14.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率达到 65.5%. 而其他 4 组出水总氮平均质量浓度均在 $17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上. 从缺氧段溶解氧和反硝化碳源数量来对其进行分析, 由上面分析可知, 曝气周期越短, 湿地供氧频率越高, 湿地中基质氧含量变化越小, 缺氧段污水溶解氧越高, 从图 3(d) 可看出, 反应柱 A ~ E 出水溶解氧逐渐降低, 因此反应柱 A ~ D 总氮去除率大体逐渐升高. 而对于反应柱 E 较低的 TN 去除率, 可以从反硝化碳源方面进行分析.

将各湿地 400 mm 高度溶解性 COD 和硝酸盐氮的质量浓度及比值(即 C/N 值)绘制如图 6 所示, 从中可以看出, 曝气周期较短的 A、B、C 反应柱缺氧段碳源明显不足, C/N 值较低, 因此反硝化反应不充分, TN 去除率不高. 反应柱 D 和 E 碳源量接近, C/N 值也接近, 但反应柱 D 的总氮去除率却远高于反应柱 E.

这跟反应柱水力停留时间有关系, 根据计算在

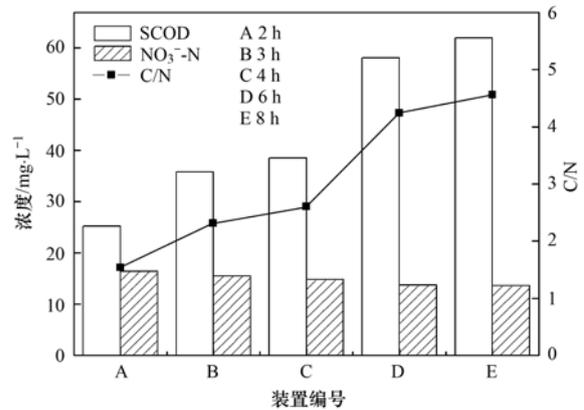


图 6 各反应柱缺氧段 SCOD、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度及 C/N

Fig. 6 Concentrations of SCOD, nitrate and C/N in the anoxic zone

水力负荷 $0.7 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 连续进水的条件下, 该反应柱水力停留时间为 6 h. 由于反应柱 E 曝气周期为 8 h, 超过了湿地的水力停留时间, 因此当湿地曝气时, 大量经过好氧处理的污水进入湿地下部, 这部分污水碳源含量极少, 硝态氮含量却非常多, 无法满足反硝化反应需求; 而当湿地处于曝气间歇时, 该好氧污水一部分已经流出湿地, 补充进来的碳源只能供部分污水进行反硝化. 因此随着周期的更替, 始终有部分硝态氮含量很高的污水无法得到足够碳源参与反硝化反应, 而同样始终有部分碳源充足的污水得不到足够的硝态氮进行反硝化.

以 TN 的去除率为目标变量对实验结果进行单因素方差分析得到表 5.

由于显著性概率小于 0.05, 因此可认为在显著性水平 0.05 下, 间歇曝气的周期对 TN 去除率有显著性影响.

传统湿地污染物去除率不高的原因在于氧气的供给有限, 曝气能大幅度提高 COD 和氨氮的去除

表 5 间歇曝气周期的单因素方差分析

Table 5 One-way ANOVA of intermittent aeration cycle

项目	自由度	平方和	均方	F 值	显著性概率
模型误差(组间)	4	0.070 08	0.017 52	16.866 4	1.624 11E-8
随机误差(组内)	45	0.046 74	0.001 04		
总和	49	0.116 83			

率,但同时曝气提高了湿地污水的溶解氧,抑制反硝化反应,不利于总氮的去除.这与多位学者的研究结论相一致^[22,23].人工湿地为了提高总氮的去除率,需要强化作为湿地脱氮主要途径的硝化反硝化反应过程.湿地中需要有明确的好氧环境和缺氧环境供硝化反应和反硝化反应的进行,在反硝化段还需要有碳源供反硝化菌生长.谢海林^[24]利用多级湿地创造好氧-缺氧环境,利用原污水回流充当碳源,这样不仅增加了湿地占地面积,同时也提高了运行和管理的难度.实验证明,在单级湿地中通过人工间歇曝气的方式实现总氮的去除是一条有效的途径.曝气时,在湿地好氧段 COD 被大量去除,硝化反应充分进行,氨氮大量转化为硝酸盐氮;曝气间歇时,在反应柱上部大部分非溶解性 COD 通过过滤截留的方式被去除,溶解性 COD 作为反硝化碳源被大量保留进入下部缺氧段参与反硝化反应.当湿地反应柱由不曝气变为连续曝气时,限制反硝化反应的因素由硝酸盐氮变为碳源,因此间歇曝气需要找到合适的比例和周期.实验证明:当曝气周期 6 h,周期内曝气时间与间歇时间比例为 3:1 时,进入反硝化段的污水碳氮比能达到 4.8,总氮去除率达到 65.5%,较连续曝气提高 18%.

4 结论

(1) 控制合适间歇曝气比例有利于提高湿地 TN 的去除率.该比例过大时,反硝化碳源缺失成为脱氮的限制因素;比例过小时,硝化反应不足成为脱氮限制因素.实验中控制该比例为 3:1 时取得最好的脱氮效果.

(2) 合理的间歇曝气周期对 TN 的去除也至关重要.曝气周期太短,湿地供氧频繁,内部始终处于好氧状态,不利于反硝化反应发生;曝气周期太长,超过缺氧段水力停留时间时使得碳源补充不及时,反硝化反应受限.实验中控制曝气周期为 6 h 时, TN 去除率最高,达到 65.5%.

(3) 在间歇曝气比例为 3:1、间歇曝气周期为 6 h 时,其出水 COD、 NH_4^+ -N、TN 均能达到城镇污水处理厂污染物排放标准一级 B 标准.

参考文献:

- [1] Zhang T, Xu D, He F, *et al.* Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990-2010 [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **47**: 189-197.
- [2] 梁康,王启烁,王飞华,等.人工湿地处理生活污水的研究进展[J].*农业环境科学学报*, 2014, **33**(3): 422-428.
- [3] Wu H M, Fan J L, Zhang J, *et al.* Strategies and techniques to enhance constructed wetland performance for sustainable wastewater treatment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(19): 14637-14650.
- [4] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment; five decades of experience [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(1): 61-69.
- [5] 黄锦楼,陈琴,许连煌.人工湿地在应用中存在的问题及解决措施[J].*环境科学*, 2013, **34**(1): 401-408.
- [6] Babatunde A O, Zhao Y Q, O'Neill M. Constructed wetlands for environmental pollution control: a review of developments, research and practice in Ireland [J]. *Environment International*, 2008, **34**(1): 116-126.
- [7] Ye F X, Li Y. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(7): 1043-1050.
- [8] Mietto A, Politeo M, Breschiaglio S, *et al.* Temperature influence on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system in Northern Italy [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **75**: 291-302.
- [9] 张玲,崔理华.人工湿地脱氮现状与研究进展[J].*中国农学通报*, 2012, **28**(5): 268-272.
- [10] 高廷耀,顾国维,周琪.水污染控制工程(下册) [M]. (第三版).北京:高等教育出版社, 2007. 164-165.
- [11] Warneke S, Schipper L A, Matiassek M G, *et al.* Nitrate removal, communities of denitrifiers and adverse effects in different carbon substrates for use in denitrification beds [J]. *Water Research*, 2011, **45**(17): 5463-5475.
- [12] 刘峰.多级跌水复合垂直流湿地控制农村面源污染研究 [D].南昌:南昌大学, 2011. 15-18.
- [13] 司马卫平.新型人工湿地污水处理系统复氧效果研究 [J].*环境保护科学*, 2009, **35**(3): 11-13.
- [14] 丁怡,宋新山,严登华.反硝化碳源在人工湿地脱氮中的应用及其研究进展 [J].*环境污染与防治*, 2011, **33**(12): 65-69.
- [15] Song K, Lee S H, Kang H. Denitrification rates and community structure of denitrifying bacteria in newly constructed wetland [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, **47**(1): 24-29.

- [16] 郭焯焯, 杨淑英, 黄莹, 等. 间歇曝气潜流人工湿地的污水脱氮效果[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(4): 1405-1409.
- [17] Fan J L, Liang S, Zhang B, *et al.* Enhanced organics and nitrogen removal in batch-operated vertical flow constructed wetlands by combination of intermittent aeration and step feeding strategy [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(4): 2448-2455.
- [18] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [19] Du X L, Xu Z X, Wang S. Enhanced removal of organic matter and ammonia nitrogen in a one-stage vertical flow constructed wetland system [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2010, **29**(1): 60-67.
- [20] Zhai J, Zou J S, He Q. Variation of dissolved oxygen and redox potential and their correlation with microbial population along a novel horizontal subsurface flow wetland [J]. Environmental Technology, 2012, **33**(17): 1999-2006.
- [21] Zhao H W, Mavnic D S, Oldham W K. Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two-stage intermittent aeration process treating domestic sewage[J]. Water Research, 1999, **33**(4): 961-970.
- [22] Zapater-Pereyra M, Gashugi E, Rousseau D P L, *et al.* Effect of aeration on pollutants removal, biofilm activity and protozoan abundance in conventional and hybrid horizontal subsurface-flow constructed wetlands[J]. Environmental Technology, 2014, **35**(16): 2086-2094.
- [23] 任拥政, 章北平, 海本增. 利用充氧和回流强化波形潜流人工湿地的脱氮效果[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2700-2704.
- [24] 谢海林. 垂直潜流人工湿地脱氮机理及效果改善研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. 56-63.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行