

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

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

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放

李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 甲烷和氧化亚氮是两种重要的非二氧化碳温室气体。城市污水处理厂是甲烷和氧化亚氮的重要释放源。因此, 为探究不同污水处理工艺甲烷和氧化亚氮的释放现状和变化规律, 通过浮流式表面集气罩对西安市第三污水处理厂(Orbal 氧化沟工艺)和第四污水处理厂(A/A/O 工艺)生物处理过程中甲烷和氧化亚氮的排放情况进行测定, 比较不同污水处理工艺中非二氧化碳温室气体的释放情况, 并以第四污水处理厂为例研究溶解氧、温度对非二氧化碳温室气体释放量的影响。结果表明, 西安市第三污水处理厂每 m^3 进水释放甲烷 1 181 mg(以 CH_4 计)、氧化亚氮 36.20 mg(以 N_2O 计), 西安市第四污水处理厂每 m^3 进水释放甲烷 209 mg(以 CH_4 计)、氧化亚氮 54.64 mg(以 N_2O 计)。温度、曝气方式、溶解氧浓度、亚硝酸盐氧化速率和最大产甲烷活性是甲烷和氧化亚氮释放量的重要影响因素。

关键词: 甲烷; 氧化亚氮; A/A/O; Orbal 氧化沟; 污水生物处理

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1640-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201610122

Non- CO_2 Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes

LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, YAO Qian, ZHUO Yang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) are two of the most important non- CO_2 greenhouse gases. And municipal sewage treatment plant is an important anthropogenic source of CH_4 and N_2O . Therefore, it is essential to measure the production and emission of CH_4 and N_2O during biological wastewater treatment process. The surface emission flux isolation chamber was employed to collect the gas sample from the Xi'an No. 3 WWTP (the Orbal oxidation ditch process) and Xi'an NO. 4 WWTP (A/A/O process) to determine the contents of methane and nitrous oxide. And the effects of temperature and dissolved oxygen concentration on non- CO_2 greenhouse gases emission from Xi'an NO. 4 WWTP were discussed. The results showed that methane and nitrous oxide emission factors from No. 3 WWTP were 1 181 mg CH_4 per m^3 influent and 36.20 mg N_2O per m^3 influent, respectively while those from the No. 4 WWTP were 209 mg CH_4 per m^3 influent and 54.64 mg N_2O per m^3 influent. In addition, the important influencing factors which affected methane and nitrous oxide emission were temperature, aeration strategy, DO, nitrite oxidation rate and specific methanogenic activity.

Key words: methane; nitrous oxide; A/A/O; Orbal oxidation ditch; biological treatment of wastewater

甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是两种常见的非二氧化碳温室气体,其温室效应分别是二氧化碳的 25 倍和 298 倍^[1],即在低排放量的情况下也会对大气环境造成较大威胁。城市污水生物处理过程中会产生甲烷和氧化亚氮。根据调查,2000~2009 年我国氧化亚氮的排放量逐年增加^[2],污水厂进水中总氮负荷中约有 7%转化为一氧化氮和氧化亚氮^[3]。随着各国日益严格的环境标准,污水处理量逐年增加,因此调查和控制污水处理厂生物处理过程中温室气体的释放具有重要意义。

甲烷主要在有机物的去除过程中产生,主要发生在氧化还原电位较低的区域(缺氧区或厌氧区)。经过发酵产酸菌、产氢产乙酸菌和产甲烷菌等一系列微生物依次作用,复杂有机物最终被氧化成甲烷和二氧化碳。氧化亚氮主要在生物脱氮过程中产生,主要发生在硝化阶段和反硝化阶段。在硝化阶

段,氧化亚氮主要是来源于羟胺(NH_2OH)氧化和硝化菌的反硝化过程,此外硝酰基(NOH)的非生物反应、好氧反硝化菌的存在与异养菌的硝化等几个过程也会造成氧化亚氮的产生^[4~7]。氧化亚氮是反硝化阶段的中间产物,其进一步还原受阻时就会造成氧化亚氮的逸出排放,可能的原因有两种:①氧化亚氮还原酶(Nos)受到抑制,如 pH、溶解氧等因素均会限制其活性,造成氧化亚氮的积累;②某些反硝化系统中没有 Nos,如荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)等,对于这些反硝化菌,其最终产物就是氧化亚氮^[8,9]。根据报道,硝化阶段是氧化亚氮产生和释放的主要阶段;在反硝化阶段,只要保证反硝化

收稿日期: 2016-10-19; 修订日期: 2016-11-08

基金项目: 陕西省住房城乡科技开发项目(2015-K65)

作者简介: 李惠娟(1986~),女,博士研究生,主要研究方向为废水的生物处理理论与技术, E-mail: lhj270836125@163.com

正常进行的条件,氧化亚氮的产生和释放是可以完全避免的。由于污水处理工艺的不同,如曝气方式、水力停留时间等运行参数不同,脱氮过程中优势微生物种群不同,这就造成了氧化亚氮的产生和释放量的不同。

近年来各国学者对污水处理过程中温室气体产生的相关问题进行了大量研究^[10~13],但这些报道主要集中在研究单一污水处理工艺温室气体释放情况,对不同污水处理工艺温室气体排放差异及其原因的研究有限。本研究选取我国污水处理常见工艺——氧化沟工艺(西安市第三污水处理厂,Orbal 氧化沟工艺)和 A/A/O 工艺(西安市第四污水处理厂,A/A/O 工艺)对其甲烷和氧化亚氮的释放量进行测试,比较不同污水生物处理工艺对非二氧化碳温室气体释放的影响,并探讨了溶解氧、温度与温室气体释放量之间的关系,为污水处理厂温室气体产生和释放的研究提供基础资料,对研究污水处理厂温

室气体减排措施,并对研发新的污水处理工艺具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 污水处理厂概况和试验布置

西安市第三污水处理厂(三污)位于西安市东部,总投资 2.62 亿元,服务面积约为 21 km²,日处理能力为 15 万 m³(二期工程部分运行)。进水主要是来自纺织、印染、机械加工等行业的工业废水(占 55.3%)和生活污水,进水水质复杂,各项指标波动范围大^[14,15]。西安市第四污水处理厂(四污)位于西安市北郊,总投资 4.19 亿元,服务面积约为 45 km²,日处理量为 25 万 m³(一期工程)^[16],污水来源主要为生活污水和工业废水,生活污水与工业废水的比例约为 4:6。两个污水处理厂采用的处理工艺是目前我国比较常见的处理工艺,其基本情况见表 1。

表 1 两个污水处理厂基本情况/mg·L⁻¹

Table 1 Basic information of the two WWTPs/mg·L⁻¹

污水厂	处理工艺		COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	曝气方式
三污	Orbal 氧化沟	进水	390~825	15.9~47.5	23.45~98.06	表面转盘曝气
		出水	10.93~50.79	1.57~18.82	5.42~25.53	
四污	A/A/O	进水	187~651	16.8~44.3	39.47~58.72	底部微孔曝气
		出水	16.6~51.4	0.45~14.71	2.38~20.47	

西安市第三污水处理厂采用 Orbal 氧化沟工艺,相当于一系列完全混合反应器的串联,根据其特点,共布设采样点 4 个[图 1(a)],其中厌氧选择池中采样点 1 个,氧化沟外沟、中沟、内沟各设采样点 1 个,采样点位于曝气转盘上游。西安市第四污水处理厂主要生物处理工艺为 A/A/O 工艺,属于推流式反应系统,因此取样点应按照水流方向布设。缺氧段、厌氧段各布设 1 个,好氧段布设 3 个,共 5 个采样点[图 1(b)]。

1.2 采样方法

气体样品采用浮流式表面集气罩收集,气相色谱测定。浮流式表面集气罩类似静态箱^[17,18],为 PVC 材质的圆柱体(φ 15 cm, h = 10 cm),顶端有采样口和温度计,使用前检查其气密性。采样时将集气罩沉没在液面下,随着污水生物处理过程中不断产生气体,集气罩中充满气体后,气体样品通过取样口用气体采样袋收集。气体样品在 24 h 内利用气相色谱仪分析甲烷和氧化亚氮气体浓度^[19~22],同时在采样点周围取水样,根据标准方法测定其中 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、COD、SS 和 VSS 等。

1.3 释放速率和释放因子计算

温室气体释放速率定义为单位时间内释放的温室气体量,是表征温室气体释放的重要指标。在曝气区,释放速率($E_{\text{CHG, aero}}$)的表达式如下:

$$E_{\text{CHG, aero}} = Q_{\text{air}} \cdot c_{\text{CHG, aero}} \tag{1}$$

式中, $E_{\text{CHG, aero}}$ 为曝气区温室气体释放速率(kg·d⁻¹); Q_{air} 为生物曝气池曝气量(m³·d⁻¹); $c_{\text{CHG, aero}}$ 为温室气体样品浓度(g·m⁻³)。

非曝气区(三污氧化沟各沟道及四污缺氧区和厌氧区)的温室气体排放速率($E_{\text{CHG, non-aero}}$)计算方法如下:

$$E_{\text{CHG, non-aero}} = \frac{V_{\text{gas}} \cdot c_{\text{CHG}}}{\Delta t} \cdot \frac{A_{\text{non-aero}}}{A_{\text{SEFIC}}} \tag{2}$$

式中, $E_{\text{CHG, non-aero}}$ 为非曝气区温室气体释放速率(kg·d⁻¹); V_{gas} 为一定时间内浮流式表面集气罩中收集的气体总体积(m³); Δt 为浮流式表面集气罩进行气体收集的时间(d); $A_{\text{non-aero}}$ 为非曝气区表面积(m²); A_{SEFIC} 为浮流式表面集气罩横截面(m²)。

排放因子(w_{CHG})定义为单位进水排放非二氧化碳温室气体的量,是对比不同工艺温室气体排放

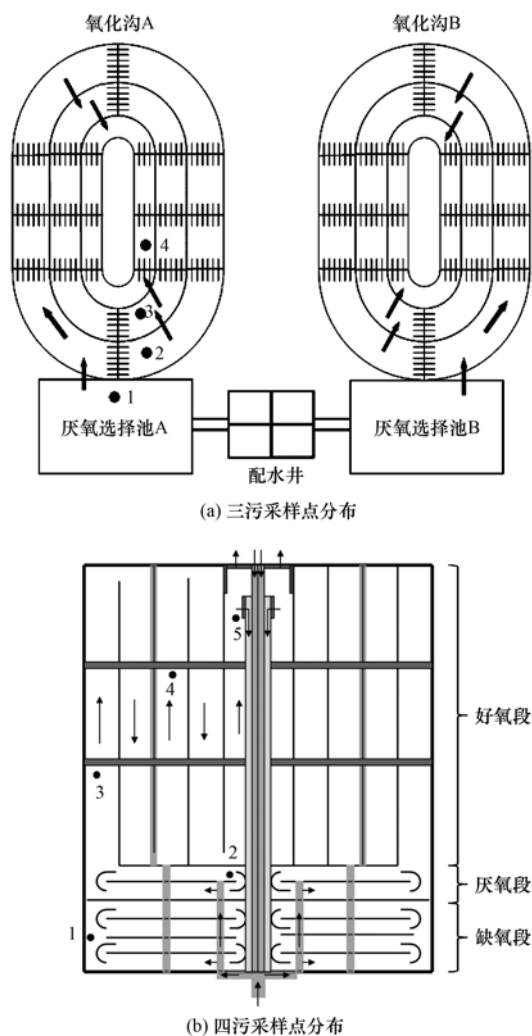


图 1 现场采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in the two WWTPs

的重要指标. 其计算方法如下:

$$w_{\text{GHG, influent}} = \frac{E_{\text{GHG}}}{Q_{\text{influent}}} \quad (3)$$

式中, $w_{\text{GHG, influent}}$ 为按污水厂每天进水量计算的温室气体排放因子 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Q_{influent} 为污水处理厂每天进水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); E_{GHG} 为温室气体释放速率 ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$).

1.4 最大比产甲烷活性(SMA)与辅酶 F_{420}

污泥最大比产甲烷活性 (specific methanogenic activities, SMA) 采用血清瓶试验法^[23]. 试验期间每隔 2 h 测定气体中甲烷浓度, 根据式(4)计算 SMA.

$$\mu_{\text{max CH}_4} = 4 \times \frac{dc_{\text{CH}_4} \times V_{\text{CH}_4}}{dt} \times \frac{1}{X} \quad (4)$$

式中, 4 为甲烷的 COD 当量; $\mu_{\text{max CH}_4}$ 为最大比产甲烷活性 [$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$] (以 COD 计); $\frac{dc_{\text{CH}_4} \times V_{\text{CH}_4}}{dt}$ 为甲

烷的产率 ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$); X 为血清瓶中污泥浓度 (g).

污泥中辅酶 F_{420} 采用紫外分光光度法^[24].

1.5 氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率

氨氧化速率 (AUR)、亚硝酸盐氧化速率 (NUR) 采用间歇试验法, 测定起始浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度为 20°C .

2 结果与分析

2.1 污水厂非二氧化碳温室气体排放

为了获得数据能较准确地反映两个污水厂非二氧化碳温室气体的排放情况, 对两个污水处理厂非二氧化碳温室气体排放进行一年的监测.

两个污水厂甲烷的排放情况见图 2. 三污甲烷的释放总量 (以 CH_4 计, 下同) 为 $26\,542 \sim 66\,518 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 释放因子为每 m^3 进水 $717 \sim 1\,822 \text{ mg}$. 四污甲烷的释放总量为 $11\,746 \sim 30\,540 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 释放因子为每 m^3 进水 $129 \sim 335 \text{ mg}$. 根据西安市人均综合用水定额 [$150 \text{ L} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$] 和两个污水厂的处理量, 两个污水厂甲烷的人均释放因子分别为 $39.81 \sim 99.77 \text{ g} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $7.05 \sim 18.33 \text{ g} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$. 对比两个污水厂甲烷的释放情况可以看出, 夏季 (6~8 月) 甲烷释放量高于冬季 (12 月~次年 2 月), 而三污的甲烷释放量高于四污.

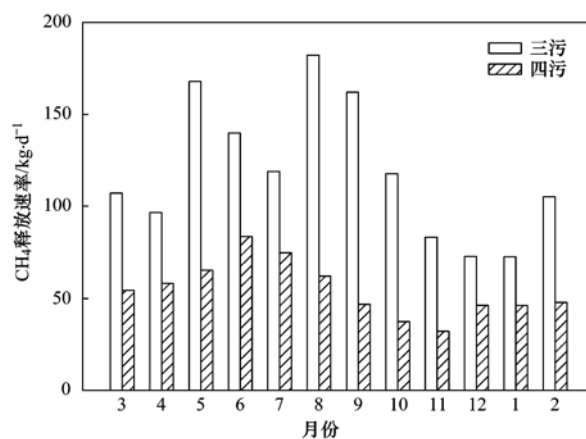


图 2 甲烷释放速率历时 (逐月) 变化

Fig. 2 Monthly variation of CH_4 release rate of the two WWTPs

两个污水厂氧化亚氮的释放情况见图 3. 三污氧化亚氮释放总量 (以 N_2O 计, 下同) 为 $1\,613 \sim 28\,063 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 释放因子为每 m^3 进水 $29.47 \sim 51.99 \text{ mg}$, 氧化亚氮人均释放因子为 $1.61 \sim 2.85 \text{ g} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$; 四污的氧化亚氮释放总量为 $3\,425 \sim 5\,953 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 释放因子为每 m^3 进水 $37.54 \sim 65.23 \text{ mg}$, 人均释放因子为 $2.06 \sim 3.57 \text{ g} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$. 对比两个污水处理厂氧化亚氮的释放情况, 夏季 (6~8

月) 温度高时氧化亚氮的释放量要高于冬季(12 月~次年 2 月) 温度低时的释放量, 且四污氧化亚氮的释放量高于三污。

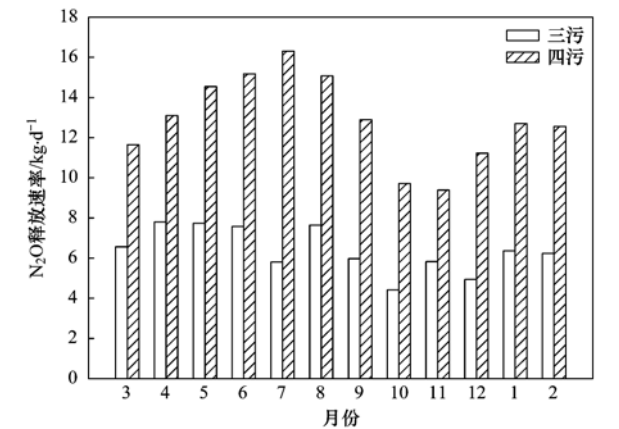


图 3 氧化亚氮释放速率历时(逐月)变化
Fig. 3 Monthly variation of N₂O release rate of the two WWTPs

两个污水处理厂非二氧化碳温室气体的二氧化碳当量比较情况如图 4 所示。从中可以看出, 三污的二氧化碳当量[每 m³ 进水 40.31 g(以 CO₂ 计)] 高于四污[每 m³ 进水 21.51 g(以 CO₂ 计)], 表明从非二氧化碳温室气体释放角度考虑, A/A/O 工艺更具优势。

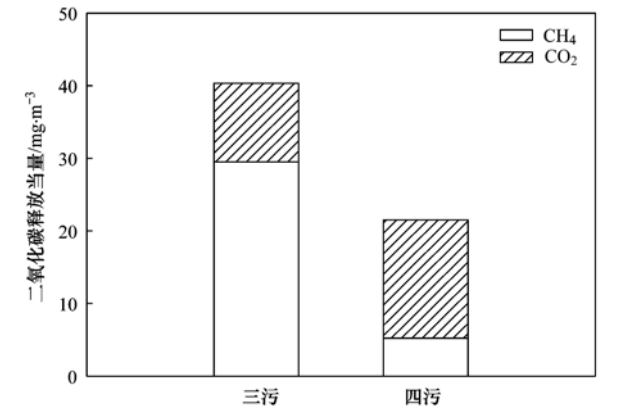


图 4 两个污水处理厂二氧化碳排放当量比较
Fig. 4 CO₂ equivalent of the two WWTPs

2.2 最大产甲烷活性 (specific methanogenic activity, SMA) 与辅酶 F₄₂₀

通过测定两个污水处理厂活性污泥的最大产甲烷活性及辅酶 F₄₂₀ 的浓度发现, 三污活性污泥在 3 种不同基质下的最大产甲烷活性均比四污活性污泥高(图 5)。而三污活性污泥的辅酶 F₄₂₀ 浓度为 0.019 2 μmol·g⁻¹, 四污为 0.013 4 μmol·g⁻¹。最大产甲烷活性与辅酶 F₄₂₀ 的结果均可说明三污活性污泥的产甲烷活性高于四污, 因此可解释三污甲烷排放量高于四污。

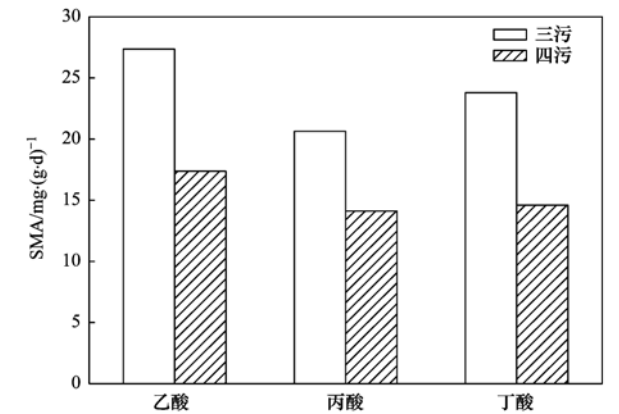


图 5 两个污水处理厂污泥最大产甲烷活性
Fig. 5 SMA of the two WWTPs

2.3 氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率

对比两个污水处理厂活性污泥的氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率(见表 2)可以发现两个污水处理厂的氨氧化速率基本接近而亚硝酸盐氧化速率相差较大。三污的亚硝酸盐氧化速率接近氨氧化速率, 这表明亚硝酸盐可以被快速氧化, 处理系统不会发生亚硝氮积累。四污亚硝酸盐氧化速率仅是按氧化速率的一半, 说明四污的处理系统容易发生亚硝氮积累。而亚硝酸盐的浓度与氧化亚氮的产生有着密切的联系^[25]。亚硝酸盐的累积不但造成硝化阶段的反硝化的增强^[26], 还会降低反硝化速率, 造成一氧化氮和氧化亚氮的积累^[27], 进而造成氧化亚氮释放量升高。

表 2 两个污水处理厂的硝化速率			
Table 2 Nitrification rate of the two WWTPs			
名称	单位	三污	四污
氨氧化速率(以 NH ₄ ⁺ -N 计)	mg·(g·h) ⁻¹	2.43	2.58
亚硝酸盐氧化速率(以 NO ₂ ⁻ -N 计)	mg·(g·h) ⁻¹	2.74	1.46

2.4 温室气体释放的影响因素

试验过程中发现温室气体的排放量随温度和曝气区溶解氧的变化而变化。为探究温室气体释放量与溶解氧、温度的变化关系, 以 A/A/O 工艺为例进行研究。

2.4.1 溶解氧的影响

试验期间四污厌氧区和缺氧区的溶解氧浓度相对稳定, 因此这两个区域甲烷与氧化亚氮的释放量相对稳定。在好氧区, 随着溶解氧浓度的变化, 甲烷、氧化亚氮的释放量变化范围较大(图 6)。甲烷释放量随着溶解氧浓度的升高而增大, 线性相关系数为 0.70。因为水中溶解性甲烷会随着曝气溢出, 溶解氧越高曝气强度越大, 溢出的溶解性甲烷越多。

而氧化亚氮释放量随溶解氧浓度的升高减小,相关系数为 0.65. 这是由于当好氧池中溶解氧浓度较低时 ($< 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 活性污泥中部分硝化菌 (*Nitrosomonas europaea*) 会进行反硝化反应导致氧化亚氮释放量增加^[4]; 并且较高的溶解氧可抑制亚硝氮的积累, 进而减小氧化亚氮的释放量. 本研究得出的溶解氧浓度与甲烷、氧化亚氮释放量的关系趋势与王金鹤^[5]的研究一致.

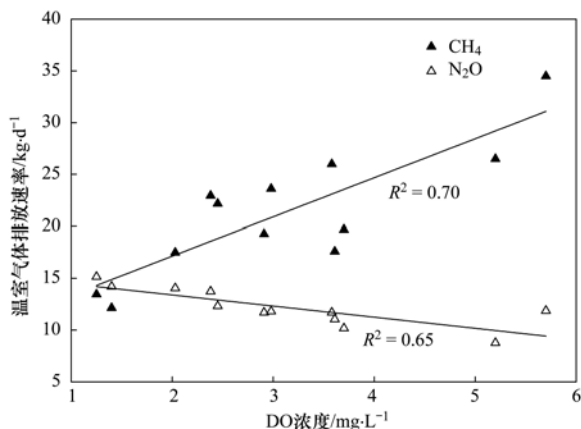


图 6 好氧区甲烷、氧化亚氮释放速率与溶解氧的关系

Fig. 6 Relationship between CH_4 , N_2O release rate and dissolved oxygen concentration in oxic tanks

2.4.2 温度的影响

甲烷与氧化亚氮的释放量随水温的升高而增加, 出现夏季的释放量明显大于冬季的情况, 因此有必要探讨温度对污水处理过程中温室气体释放量的影响. 由图 7 可知甲烷、氧化亚氮释放速率和污水温度有较显著的相关性 ($R^2 = 0.85$, $R^2 = 0.79$). 甲烷释放量随温度升高而升高是因为产甲烷菌的活性随着基质温度的升高而增加^[28]. 这一变化关系与王金鹤^[5]和亓鹏玉等^[29]的研究结果相同. 氧化亚

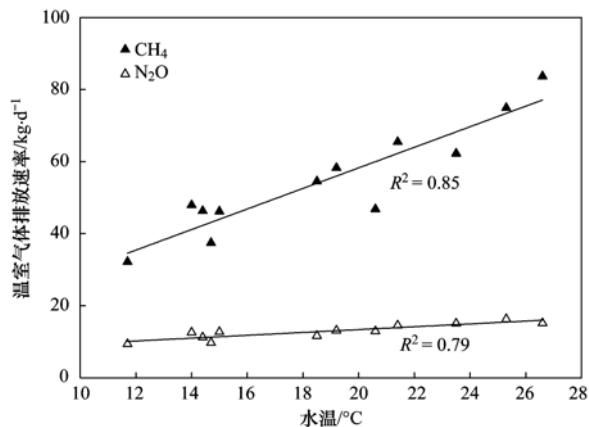


图 7 甲烷、氧化亚氮释放速率与水温的关系

Fig. 7 Relationship between CH_4 , N_2O release rate and wastewater temperature

氮释放量随水温升高而增加是由于一定温度范围内温度越高氨氧化速率越快, 亚硝氮积累率也越高^[30]. 但氧化亚氮释放量与水温的变化关系与王金鹤^[5]和张婷婷等^[31]的研究结果相反, 与郭宁等^[30]和王亚宜等^[32]的研究结果相同. 这说明温度对氧化亚氮释放量的影响机制较为复杂, 还需进一步的研究.

3 讨论

影响污水处理过程中非二氧化碳温室气体释放的因素有很多, 从试验数据来看, 主要是温度、曝气方式和溶解氧浓度. 此外, 微生物的种群结构、水力停留时间、C/N 等工艺参数也会影响温室气体的释放.

从两个污水处理厂甲烷和氧化亚氮释放的历时变化中可以看出, 在夏季温度较高时, 温室气体释放量比较大, 而在冬季, 由于温度下降, 温室气体释放量明显降低. 这是由于水温影响产甲烷菌及硝化菌的活性, 从而影响温室气体的产生和释放.

不同的曝气方式会对生物处理单元中溶解氧的浓度造成影响, 而溶解氧的浓度也会影响甲烷和氧化亚氮的释放^[33,34]. 溶解氧对甲烷的产生具有明显的抑制作用, 低溶解氧浓度有利于甲烷的产生、释放, 因此厌氧区是甲烷的主要释放源. 硝化阶段的溶解氧不足会引起硝化菌的反硝化, 造成氧化亚氮的产生和释放^[4,35]. 若溶解氧浓度过高, 反硝化过程可能受到抑制, 也会造成氧化亚氮的产生和释放^[4,36].

亚硝酸盐浓度对温室气体的释放也有影响, 亚硝酸盐浓度较高时, 污水处理系统中 ORP 值上升, 抑制甲烷的产生. 有研究表明, 抑制甲烷产生的亚硝酸盐浓度阈值为 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[37,38]. 而亚硝酸盐的浓度与氧化亚氮的产生和释放有直接联系. 亚硝酸盐浓度的增加会导致硝化过程中氨氧化菌反硝化作用的增强, 该过程会将亚硝酸盐还原为 N_2O ^[26]; 在反硝化期间高浓度的亚硝酸盐会导致反硝化速率降低并造成一氧化氮和氧化亚氮的积累^[27], 进而引起氧化亚氮释放量的升高.

系统中亚硝酸盐的浓度还与污泥中微生物种群结构直接相关, 由于 AOB 和 NOB 数量比的差异, 造成了两种工艺中氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率的不同, 造成了不同系统中亚硝酸盐的浓度差异. 已经有研究指出^[39], 在 Orbal 氧化沟污泥中, 参与硝化过程的两类主要细菌氨氧化细菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化细菌 (NOB) 的数量相当, 而在 A/A/O 工艺

中, AOB 的数量约为 NOB 的两倍, 且优势菌属 *Nitrosomonas europaea* 已经被证实能够进行反硝化, 而硝化菌的反硝化过程会产生氧化亚氮。

4 结论

西安市第三污水处理厂(Orbal 氧化沟工艺)每 m^3 进水释放甲烷 1 181 mg(以 CH_4 计)、氧化亚氮 36.20 mg(以 N_2O 计), 西安市第四污水处理厂(A/A/O 工艺)每 m^3 进水释放甲烷 209 mg(以 CH_4 计)、氧化亚氮 54.64 mg(以 N_2O 计)。两个污水处理厂非二氧化碳温室气体的二氧化碳当量分别为每 m^3 进水 40.31 g(以 CO_2 计, 三污)和 21.51 g(以 CO_2 计, 四污)。对比两个污水处理工艺, Orbal 氧化沟工艺的温室气体释放量高于 A/A/O 工艺, 因此从非二氧化碳温室气体释放角度考虑, A/A/O 工艺更具优势。影响污水厂非二氧化碳温室气体产生释放的主要因素是温度、曝气方式和溶解氧浓度。此外, 活性污泥的产甲烷活性和亚硝酸盐氧化速率也是影响甲烷及氧化亚氮释放的重要原因。

致谢: 本试验的现场采样工作由西安市第三、第四污水处理厂工作人员协助完成, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 宋丽丽. 源自生活污水的甲烷排放研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
Song L L. Primary study on methane emission from domestic wastewater [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011.
- [3] Ahn J H, Kim S, Park H, et al. N_2O emissions from activated sludge processes, 2008-2009: results of a national monitoring survey in the United States [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(12): 4505-4511.
- [4] Kampschreur M J, Temmink H, Kleerebezem R, et al. Nitrous oxide emission during wastewater treatment [J]. Water Research, 2009, **43**(17): 4093-4103.
- [5] 王金鹤. 城镇污水处理厂中温室气体的释放研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
Wang J H. Research on the greenhouse gas emissions from full-scale municipal wastewater treatment plants [D]. Ji'nan: Shandong University, 2011.
- [6] 李平, 晏波, 吴锦华, 等. 污水处理中 N_2O 的产生及减量控制[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(1): 25-27.
Li P, Yan B, Wu J H, et al. Production and reduction control of nitrous oxide in wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2005, **21**(1): 25-27.
- [7] 刘秀红, 杨庆, 吴昌永, 等. 不同污水生物脱氮工艺中 N_2O 释放量及影响因素[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(12): 1940-1947.
Liu X H, Yang Q, Wu C Y, et al. N_2O emissions from different biological nitrogen removal processes and factors affecting N_2O production [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(12): 1940-1947.
- [8] 彭永臻, 尚会来, 张静蓉, 等. $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 对污水反硝化过程中 N_2O 产生的影响[J]. 北京工业大学学报, 2010, **36**(4): 517-522.
Peng Y Z, Shang H L, Zhang J R, et al. Effects of $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ on N_2O production during denitrification [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, **36**(4): 517-522.
- [9] 刘俊女, 汪苹, 柯国华, 等. 废水脱氮过程中 N_2O 的控逸理论及研究进展[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2005, **23**(6): 14-19.
Liu J N, Wang P, Ke G H, et al. N_2O emission control in wastewater denitrification process [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2005, **23**(6): 14-19.
- [10] Li H J, Peng D C, Liu W B, et al. N_2O generation and emission from two biological nitrogen removal plants in China [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(25): 11800-11806.
- [11] Brotto A C, Kligerman D C, Andrade S A, et al. Factors controlling nitrous oxide emissions from a full-scale activated sludge system in the tropics [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(15): 11840-11849.
- [12] Yan X, Li L, Liu J X. Characteristics of greenhouse gas emission in three full-scale wastewater treatment processes [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(2): 256-263.
- [13] 于洋, 崔胜辉, 林剑艺, 等. 城市废弃物处理温室气体排放研究: 以厦门市为例 [J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3288-3294.
Yu Y, Cui S H, Lin J Y, et al. Study on greenhouse gas emissions from urban waste disposal system: a case study in Xiamen [J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3288-3294.
- [14] 郑琴, 张兴兴, 周文献, 等. Orbal 氧化沟在西安市第三污水处理厂中的应用[J]. 给水排水, 2010, **36**(2): 35-37.
Zheng Q, Zhang X X, Zhou W X, et al. Application of Orbal oxidation ditch in the No. 3 wastewater treatment plant of Xi'an City [J]. Water & wastewater engineering, 2010, **36**(2): 35-37.
- [15] 徐晓妮, 王社平, 张日霞, 等. 西安市第三污水处理厂 Orbal 氧化沟反硝化速率测定分析[J]. 科学技术与工程, 2009, **9**(24): 7576-7579, 7587.
Xu X N, Wang S P, Zhang R X, et al. The determination analysis of the denitrification rate for Orbal oxidation ditch in No. 3 wastewater treatment plant of Xi'an [J]. Science Technology and Engineering, 2009, **9**(24): 7576-7579, 7587.
- [16] 黄宁俊, 王社平, 王小林, 等. 西安市第四污水处理厂工艺设计介绍[J]. 给水排水, 2007, **33**(11): 27-31.
Huang N J, Wang S P, Wang X L, et al. Process design of the NO. 4 wastewater treatment plant in Xi'an City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, **33**(11): 27-31.
- [17] 李志安, 邹碧, 曹裕松, 等. 地面氧化亚氮排放静态箱测定技术[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(4): 413-416.
Li Z A, Zou B, Cao Y S, et al. Technique of static chamber in determining nitrous oxide emission from land surface [J]. Soil

- and Environmental Sciences, 2002, **11**(4): 413-416.
- [18] 顾帅, 周凌晔, 刘立新, 等. 静态箱-气相色谱法 CO_2 和 CH_4 通量观测的质控方法研究[J]. 气象, 2010, **36**(8): 87-91.
- Gu S, Zhou L X, Liu L X, *et al.* Research of quality control measures in greenhouse gas flux observation using static closed chamber-GC technique[J]. Meteorological Monthly, 2010, **36**(8): 87-91.
- [19] 王跃思, 郑循华, 王明星, 等. 静态箱法气相色谱法自动检测农田 N_2O 排放[J]. 分析测试技术与仪器, 1997, **3**(1): 10-15.
- Wang Y S, Zheng X H, Wang M X, *et al.* Automatic system composed of static chamber and gas chromatograph for in-situ measurement of N_2O emission from cropland[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 1997, **3**(1): 10-15.
- [20] Keller M, Veldkamp E, Weitz A M, *et al.* Effect of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica[J]. Nature, 1993, **365**(6443): 244-246.
- [21] 张艳艳, 韩秀丽. 气相色谱法测定沼气中的甲烷[J]. 环境工程, 2010, **28**(3): 113-114.
- Zhang Y Y, Han X L. Determination of methane component in biogas by gas chromatography[J]. Environmental Engineering, 2010, **28**(3): 113-114.
- [22] 张锐, 常毅. 气相色谱法测定沼气中甲烷含量[J]. 甘肃科学学报, 1990, **2**(3): 79-82.
- Zhang R, Chang Y. Determination of the methane content in marsh gas by the gas chromatographic method[J]. Journal of Gansu Sciences, 1990, **2**(3): 79-82.
- [23] Hou Y P, Peng D C, Xue X D, *et al.* Hydrogen utilization rate: a crucial indicator for anaerobic digestion process evaluation and monitoring[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, **117**(4): 519-523.
- [24] 吴唯民, 胡纪萃, 顾夏声. 厌氧污泥中的辅酶 F_{420} 及其紫外-可见分光光度法测定[J]. 中国环境科学, 1986, **6**(1): 65-68.
- Wu W M, Hu J C, Gu X S. Coenzyme F_{420} in anaerobic sludge and its measurement with spectrophotometry[J]. Environmental Science in China, 1986, **6**(1): 65-68.
- [25] von Schulthess R, Kühni M, Gujer W. Release of nitric and nitrous oxides from denitrifying activated sludge[J]. Water Research, 1995, **29**(1): 215-266.
- [26] Burgess J E, Colliver B B, Stuetz R M, *et al.* Dinitrogen oxide production by a mixed culture of nitrifying bacteria during ammonia shock loading and aeration failure[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2002, **29**(6): 309-313.
- [27] Kampschreur M J, Tan N C G, Kleerebezem R, *et al.* Effect of dynamic process conditions on nitrogen oxides emission from a nitrifying culture[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(2): 429-435.
- [28] Watanabe A, Yamada H, Kimura M. Analysis of temperature effects on seasonal and interannual variation in CH_4 emission from rice-planted pots[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, **105**(1-2): 439-443.
- [29] 亓鹏玉, 张建, 王金鹤, 等. 城市污水处理厂甲烷的释放通量[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(3): 843-847.
- Qi P Y, Zhang J, Wang J H, *et al.* Methane emissions from municipal wastewater treatment plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(3): 843-847.
- [30] 郭宁, 张建, 孔强, 等. 温度对亚硝化及氧化亚氮释放的影响[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(4): 1308-1312.
- Guo N, Zhang J, Kong Q, *et al.* Effect of temperature on ammonification and nitrous oxide emission in partial nitrification[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(4): 1308-1312.
- [31] 张婷婷, 张建, 杨芳, 等. 温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1283-1287.
- Zhang T T, Zhang J, Yang F, *et al.* Effect of temperature on pollutant removal and nitrous oxide emission of wastewater nitrogen removal system[J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1283-1287.
- [32] 王亚宜, 陈玉, 周东, 等. 温度对滴滤池硝化过程氧化亚氮释放的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(11): 2796-2804.
- Wang Y Y, Chen Y, Zhou D, *et al.* Impact of temperature on nitrous oxide emission in a trickling filter[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(11): 2796-2804.
- [33] 黎秋华, 李平, 朱萍萍, 等. SBR 工艺中 pH 值与 DO 对硝化过程中 N_2O 释放的影响[J]. 水处理技术, 2008, **34**(4): 52-55, 60.
- Li Q H, Li P, Zhu P P, *et al.* The effect of pH and DO on N_2O emission during the nitrification process in a SBR[J]. Technology of Water Treatment, 2008, **34**(4): 52-55, 60.
- [34] 刘秀红, 彭轶, 马涛, 等. DO 浓度对生活污水硝化过程中 N_2O 产生量的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 660-664.
- Liu X H, Peng Y, Ma T, *et al.* Effects of DO concentration on N_2O production during nitrification for treating domestic wastewater[J]. Environmental Science, 2008, **29**(3): 660-664.
- [35] Tallec G, Garnier J, Billen G, *et al.* Nitrous oxide emissions from secondary activated sludge in nitrifying conditions of urban wastewater treatment plants: effect of oxygenation level[J]. Water Research, 2006, **40**(15): 2972-2980.
- [36] Foley J, de Haas D, Yuan Z G, *et al.* Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2010, **44**(3): 831-844.
- [37] Jiang G M, Gutierrez O, Sharma K R, *et al.* Effects of nitrite concentration and exposure time on sulfide and methane production in sewer systems[J]. Water Research, 2010, **44**(14): 4241-4251.
- [38] Wang J H, Zhang J, Xie H J, *et al.* Methane emissions from a full-scale A/A/O wastewater treatment plant[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(9): 5479-5485.
- [39] 于莉芳. 污泥水富集硝化菌添加强化污水处理系统硝化的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- Yu L F. Enhancing nitrification in wastewater treatment plant through bioaugmentation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Fouling Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)