

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 PM₁₀ 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 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 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, 张扬, 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)

过渡金属掺杂对镉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-C₃N₄ 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, 周国田, 苏雪莹, 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 CH₄ 厌氧去除特性 王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)

应用铅铋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, 吕幽, 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 N₂O 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其相关性分析 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)

施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响

杨雨滢¹, 易建婷¹, 张成^{1,2*}, 陈宏^{1,2}, 木志坚^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 通过田间试验, 分别施加两种不同的污泥堆肥品(A: 含生物质炭堆肥品, B: 不含生物质炭堆肥品)和不同施肥量, 分析土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 动态变化特征和排放系数, 研究施用污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响. 结果表明, 土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放主要集中在生长期, 生物质炭堆肥品低施用量能减少 CO₂ 排放, 而高施肥量增加 CO₂ 排放. CH₄ 排放主要为负值, 总体表现为土壤吸收 CH₄, 对照处理吸收量远高于其他处理 ($P < 0.01$), A 组处理 CH₄ 吸收量随施肥量的增加而增加 ($P < 0.05$). N₂O 排放集中在发芽期和幼苗期, 施肥量越高, 排放量越大 ($P < 0.01$). 污泥堆肥品农用过程排放的温室气体主要是 N₂O, 施用 A、B 两种污泥堆肥品的土壤 N₂O 排放系数分别为 1.02% ~ 1.90% 和 1.28% ~ 2.93%. 生物质炭堆肥品具有显著的碳减排效果, 其温室气体排放量比不含生物质炭堆肥品的土壤低 19.49% ~ 35.56%, 且对于 N₂O 的减排效果较 CH₄ 更为显著.

关键词: 污泥堆肥品; 土壤; 温室气体; 排放特征; 生物质炭

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1647-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606060

Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil

YANG Yu-han¹, YI Jian-ting¹, ZHANG Cheng^{1,2*}, CHEN Hong^{1,2}, MU Zhi-jian^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China)

Abstract: Effect of application of sewage sludge compost on the emission of greenhouse gas from soil was investigated by analyzing the dynamic characteristics and emission factor of CO₂, CH₄ and N₂O in soil after spiking two different composts (A: compost with biochar, B: compost without biochar) with varying fertilizing amount into soil. The results indicated that emissions of CO₂ and CH₄ mainly occurred in the plant growth period with low fertilizer amount of biomass charcoal compost reducing CO₂ emissions, and high application content increasing CO₂ emissions. CH₄ emission fluxes showed negative values, indicating that soil could adsorb CH₄, and the adsorbing amount for control was significantly higher than those for other treatments ($P < 0.01$). The absorbing amount in treatment A increased with the fertilizing amount ($P < 0.05$). N₂O emissions mainly occurred at the germination and seedling stages, and emission fluxes increased with the fertilizing amount ($P < 0.01$). N₂O was considered as the main generated greenhouse gas during agricultural process with sludge compost, and its emission factor from sludge compost soil was 1.02% - 1.90% (A compost) and 1.28% - 2.93% (B compost), respectively. Biochar could significantly reduce the carbon emission, as the total greenhouse gas released from soil with biochar compost was 19.49% to 35.56% less than that in soil without biochar, which was more obvious for N₂O emission reduction (compared with CH₄ mitigation).

Key words: sludge compost product; soil; greenhouse gas; emission characteristics; biochar

我国城市污水处理规模连年增长, 污泥产量已突破 3 000 万 t (含水率 80%)。污泥成分复杂, 含多种有害成分, 未经处理会对环境产生二次污染^[1]。在现有的处置方式中, 污泥堆肥处置被认为是适合我国国情的处置方式之一^[2], 堆肥及其土地利用也被认为是一种具有成本效益的有机废物处理和再利用的方式^[3]。污泥经堆肥处置后可应用于农田^[4]、菜地^[5]、林地^[6]等, 不仅能够保水保肥、增强土壤养分、改善土壤性状^[7]、为作物提供充分的 N、P、K 等植物营养元素和有机质^[8], 还能促进土壤有机碳积累, 提高地上生物量, 促进作物生长。

随着我国新环保法的颁布和“水十条”的实施,

污泥堆肥后进行土地利用将是我国污泥处理处置与资源化的主要方式之一。但污泥堆肥品施入土壤后也可能产生二次污染, 如增加土壤重金属含量, 同时由于污泥堆肥品富含 C、N 等有机物质, 施入土壤后会在一定程度上增加 CH₄、CO₂ 和 N₂O 等温室气体排放。农业土壤固碳是一种有效的温室气体减排手段^[9], 而生物质炭因其含碳量高、比表面积大、

收稿日期: 2016-06-11; 修订日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208426); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015B036)

作者简介: 杨雨滢(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理与处置, E-mail: 765772897@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhcheng@126.com

疏松多孔等特性,已成为农田固碳减排研究中的热点. Zhang 等^[10]在施加氮肥的水稻土中添加 40 t·hm⁻²麦秆生物质炭,发现其比未添加生物质炭的土壤 CH₄ 排放量增加 34%, N₂O 则降低了 40% ~ 50%;张斌等^[11]连续两年观测发现,在施氮肥条件下生物质炭能连续显著减排 N₂O,且降幅高达 66%. 目前关于污泥堆肥后施入土壤的重金属污染问题进行了较多的研究^[12~14],而针对污泥堆肥品施入土壤后温室气体排放方面的研究还很缺乏. 因此,本文通过施用两种污泥堆肥品,探讨不同污泥堆肥品对土壤温室气体(CH₄、N₂O 和 CO₂)排放的影响,分析其排放特征和排放系数,以期为研究不同污泥堆肥品农过程中温室气体的排放特征和控制提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

本试验于 2015 年 7 月 10 日~8 月 14 日于西南大学试验大棚中进行,选用耐热且早熟的不结球白菜(*Brassica campestris* ssp. *chinensis* Makino)为供试蔬菜,播种前浸种催芽. 试验周期为 35 d,分为发芽期(1~5 d)、幼苗期(6~18 d)、生长期(19~33 d)以及收获期(34~35 d). 按照施肥、间苗、翻耕、灌溉等传统管理模式管理菜地,播种当天堆肥品以基肥的形式一次性施入土壤表层 15 cm 以上,后期不追肥. 种植密度为 40 穴·m⁻²,每穴 3 株,播种至出苗期间覆盖遮阳网,分别于发芽期第 1 d 和第 3 d 间苗,每天上午 08:00 前浇水灌溉,作物成熟后收割.

试验堆肥品为自制污泥堆肥产品,按照质量比分别将 A 类堆肥品(污泥:秸秆:生物质炭=20:5:1)、B 类堆肥品(污泥:秸秆=4:1)混合后放入自制堆肥箱(有效尺寸为 0.90 m×0.45 m×0.71 m),采用强制通风+人工翻堆的方式进行好氧堆肥,堆肥产品仅限于本次试验使用.

试验所用污泥取自重庆市某污水处理产脱水污泥,秸秆来自西南大学农场,水稻生物质炭为市面販售. 结合试验土壤肥力设置 8 种处理(以施氮量计):CK1、CK2(不施肥),A1、A2、A3(施氮量分别为 100、200、300 kg·hm⁻²),B1、B2、B3(施氮量分别为 100、200、300 kg·hm⁻²). 试验小区面积为 1 m²,试验小区之间用 PVC 板隔开深入土壤表层 30 cm,板隔绝地表径流. 除 CK1 处理,其他处理均种植供试蔬菜,两种堆肥品及原材料基本性质如表 1 所示.

表 1 堆肥品与原材料的基本性质

类别	pH 值	TOC/g·kg ⁻¹	TC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹
A 类堆肥品	7.58	319.43	414.98	24.34
B 类堆肥品	7.33	250.02	338.73	26.92
供试土壤	7.93	10.50	64.4	1.39
水稻生物质炭	10.24	—	578.35	0.94

1.2 气体样品采集与分析

温室气体采集采用组合静态箱^[15],由箱体和底座两部分构成,箱体由不透明 PVC 圆柱管制成,内径为 39 cm,高 30 cm. 箱面上分别开有小孔连接气压缓冲袋与三通阀,以便维持气压平衡与气体采集. 采样时将采样箱扣在底座凹槽部位,液封以隔绝箱体内外气体交换. 蔬菜种植第 1 周每天采样,之后每 3 d 采一次. 气样由 60 mL 注射器进行采集,每间隔 5 min 采集 1 次,共采集 4 次,20 h 内完成气样测定. 采用日本岛津 GC-2014 气相色谱仪进行测定,定量分析检测污泥堆肥品施入土壤后 CH₄、CO₂ 和 N₂O 浓度,结合色谱峰面积和标气浓度计算出样品中各气体浓度,从而得出气体排放通量(f)和累积排放量(Q),计算公式^[15]如下:

$$f = h \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{M \times 273}{22.41 \times \left(273 + \frac{T_1 + T_2}{2}\right)} \times 60$$

$$Q = A \times \sum \Delta f_i t_i$$

式中, f 为气体排放通量,mg·(m²·h)⁻¹; Q 为气体累积排放量,mg·kg⁻¹; h 为静态箱的高度,m; $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间内气体样的浓度变化值; M 为 1 mol CH₄、CO₂ 或 N₂O 对应的 C 或者 N 的摩尔质量,g·mol⁻¹; $273/\left(273 + \frac{T_1 + T_2}{2}\right)$ 为绝对温度的校正系数; T_1 、 T_2 分别为采集第一个、最后一个样品时采样箱内的气体温度,℃; i 为取样次数; t 为相邻两次测定的时间间隔,h; A 为表面积,m².

1.3 土壤样品采集与分析

土壤样品分别在试验开始前、施加堆肥品后和不结球白菜收获时采集. 采用五点“X”法采集土样,混合均匀后采用四分法取样,测定土壤 pH 值、总碳(TC)、总氮(TN)和总有机碳(TOC)等指标.

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 SAS 21 分别进行 Duncan's 多重比较和单因素方差分析,采用 Excel 2007 进行数据整理与统计分析,采用 Origin 8.5 绘制图形.

2 结果与讨论

2.1 土壤 TN、TC、TOC 等变化特征及作物生长情况

不同处理土壤理化指标如表 2 所示. 作物收获时, 土壤 TOC 含量较施肥初期下降 29.46% ~ 41.79%, TN 含量则下降 20.07% ~ 41.44%, TC 含量较原始土壤增加 3.26% ~ 10.09%. 污泥堆肥施用土壤后使其深度稳定化和矿化, 使得有机质含量增加^[16], 有利于土壤改良和植物生长. 施加两种堆肥品后, 作物生长情况有一定差异. 其中, CK1 处理

未种植作物, CK2 处理作物生长稀疏, 种子发芽率仅为 10% ~ 20%, 约 4% ~ 6% 的作物株高达 18 cm. A1 和 B1 处理的作物生长较为茂盛, 约 60% ~ 75% 的作物株高达 18 cm. A3 和 B3 处理的作物生长茂盛, 约 75% ~ 85% 的作物株高达 18 cm. A2 和 B2 处理的作物生长最茂盛, 约 85% ~ 100% 的作物株高达 18 cm. 两种堆肥品处理中, 施氮量为 200 kg·hm⁻² 的作物生长最为茂盛, 表明污泥堆肥品能增加土壤肥力, 促进作物生长, 但施肥量超过一定程度反而会影响作物生长.

表 2 土壤 pH 值、TN、TC、TOC 等变化特征¹⁾

采样时间	处理方式	pH 值	TC/g·kg ⁻¹	TOC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹
2015-07-09 (刚施入堆肥品)	CK1	7.75 ab	61.2 e	10.50 e	1.38 g
	CK2	7.71 ab	66.4 de	10.82 e	1.40 g
	A1	7.08 b	76.4 bc	24.97 d	2.86 f
	A2	7.20 ab	87.1 a	35.40 c	3.34 d
	A3	7.29 ab	82.1 ab	42.20 ab	4.32 b
	B1	7.78 a	67.2 de	26.32 d	3.04 e
	B2	7.32 ab	70.5 cd	38.91 bc	3.62 c
	B3	7.21 ab	71.8 cd	44.20 a	4.68 a
2015-08-13 (蔬菜收获时)	CK1	7.83 a	67.9 e	10.57 d	1.37 d
	CK2	7.81 a	73.9 cde	10.21 d	1.22 d
	A1	7.11 b	80.4 bc	17.14 c	2.23 bc
	A2	7.44 ab	89.2 a	24.97 b	2.08 c
	A3	7.90 a	86.2 ab	29.20 a	2.87 a
	B1	7.84 a	71.1 de	15.32 c	2.43 b
	B2	7.62 ab	76.2 cd	27.11 ab	2.12 bc
	B3	7.51 ab	78.3 c	30.56 a	3.19 a

1) 同列数值后的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 CH₄ 排放通量和累积排放量

各处理中 CH₄ 平均排放通量在 -0.078 ~ 0.006 mg·(m²·h)⁻¹ 之间, 总体上在发芽期波动较大, 幼苗期变化幅度相对较小 (图 1). 除 CK1、CK2 处理外, CH₄ 排放总体上集中在生长期, 第 18 ~ 24 d 排放速率较高, 这与钟佳等^[17] 关于污泥堆肥品施用于樱桃萝卜地的研究结果相似. A1、B2 处理 CH₄ 累积排放量分别为 6.73 mg·kg⁻¹ 和 2.20 mg·kg⁻¹, 整个土地利用过程表现为排放 CH₄ (图 2). A2、A3、B1、B3、CK1、CK2 处理 CH₄ 累积排放量均为负值, CH₄ 吸收量分别为 1.05、39.49、39.26、29.49、71.39、36.62 mg·kg⁻¹. 这与环境条件有关, 试验在 7 月进行, 土壤通透性较好, 甲烷氧化细菌活性高, 导致 CH₄ 排放主要为负值, 表现为土壤吸收 CH₄ 能力增强且呈弱吸收状况. 其中 CK1 处理 CH₄ 吸收量远高于其他处理 ($P < 0.01$), 说明裸地主要是 CH₄ 的“汇”, 而种植作物具有促进 CH₄

排放的功能.

A1、A2、A3 处理的 CH₄ 累积排放量随施肥量

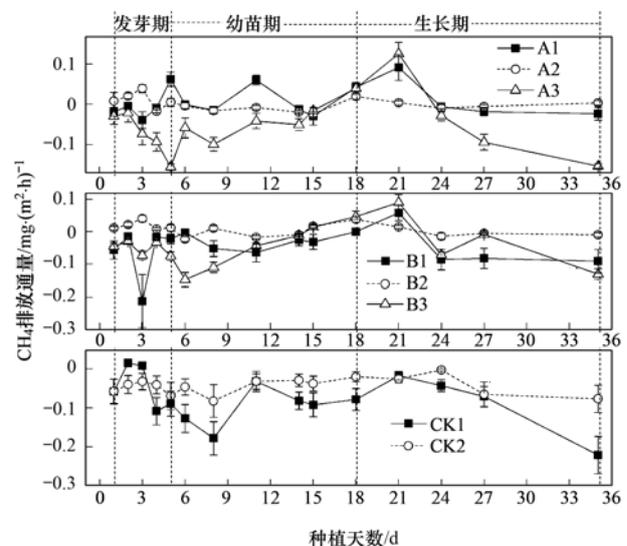


图 1 不同施肥处理 CH₄ 排放通量

Fig. 1 Emission fluxes of CH₄ under different fertilization treatments

的增加呈递减趋势 ($P < 0.05$), 即 CH_4 吸收量随施肥量的增加而增加. 这主要是由于生物质炭通过自身固碳作用将土壤碳素稳定化, 同时, 随着施肥量的增加, 较多的生物质炭为甲烷氧化细菌供能, 土壤 Eh 下降, 甲烷氧化细菌活动旺盛, 大部分 CH_4 被氧化. 刘皓等^[18]关于生物质炭施用于菜地的研究表明, 在相同原料情况下, CH_4 吸收量随生物质炭添加量的增加而增加, 增大生物质炭含量能增强其固碳效果. A1 处理 CH_4 累积排放量比 B1 处理高 82.86%, 而 A2、A3 处理 CH_4 累积排放量分别比 B2、B3 处理低 52.27% 和 25.32%. 秦晓波等^[19]认为生物质炭能改善土壤通透性能、降低水溶性有机碳, 从而有效减少稻田 CH_4 排放, 而 Zhang 等^[10]、张斌等^[11]的研究表明低生物质炭施用量能显著促进土壤 CH_4 排放, 这可能与土壤 pH 值升高, 产甲烷菌活性增强有关.

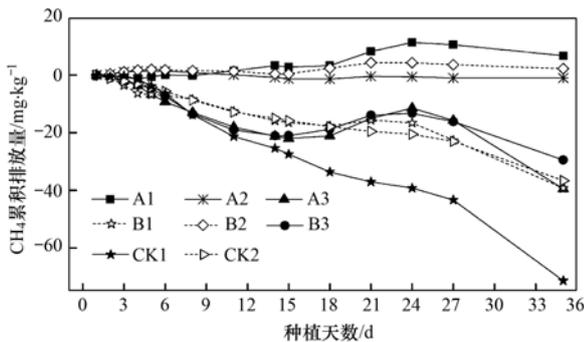


图 2 不同施肥处理 CH_4 累积排放量

Fig. 2 Cumulative emissions of CH_4 under different fertilization treatments

2.3 CO_2 排放通量和累积排放量

各处理 CO_2 排放通量总体呈现先增加后减小的变化趋势 (图 3), 平均排放通量在 $0.214 \sim 0.796 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间. CO_2 排放量主要集中在生长期 (18 d 以后), 在 18 ~ 27 d 内具有较高的排放速率, 可能是由于蔬菜作物随生长周期变化而不断增大, 土壤呼吸速率随之增强^[20]. 生长期的 CO_2 排放量约占总排放量的 48% ~ 67%, 污泥施肥量越高, CO_2 排放量越大.

A1 ~ A3 处理 CO_2 累积排放量分别为 362.40、589.67、770.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, B1 ~ B3 处理分别为 503.84、607.54、588.81 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4), 均高于 CK1、CK2 处理 (163.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、245.30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 表明施加污泥堆肥品增加了土壤 CO_2 排放. 其中, A1 和 A2 处理 CO_2 累积排放量分别比 B1、B2 处理降低了 28.1% 和 2.9%, 说明生物质炭

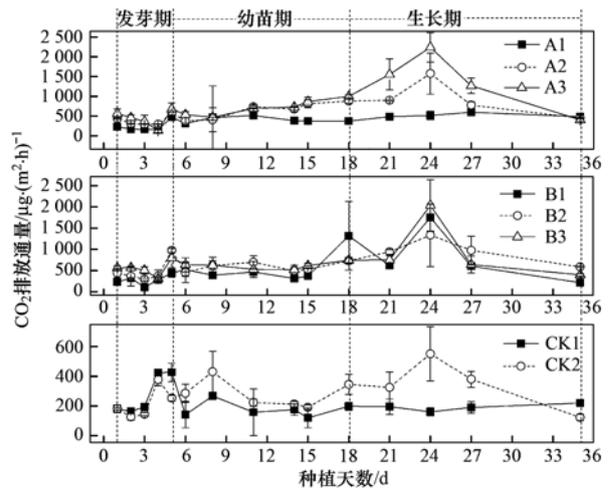


图 3 不同施肥处理下 CO_2 排放通量

Fig. 3 Emission fluxes of CO_2 under different fertilization treatments

堆肥品能减少 CO_2 排放, 这与生物质炭本身的固碳作用有关. 生物质炭通过提高土壤氧化稳定性、降低矿化速度、增加土壤有机碳库^[21], 吸附有机物、参与土壤团聚体的形成来抑制原有有机质分解, 从而抑制 CO_2 排放, 这与成功等^[22]关于添加生物质炭有利于降低农田土壤 CO_2 排放量的研究一致. 但 A3 处理 CO_2 累积排放量却比 B3 处理增加了 30.8%, 表明施肥量超过一定范围后, 由于有机质含量增多, 为微生物的活动创造了良好的条件, 增加微生物群落^[23], 促进了原有有机质的分解. 由此推测生物质炭堆肥品对土壤 CO_2 排放可能具有双重作用, 其影响作用因生物质炭种类、施加量、土壤类型等因素而异, 影响机制需要进一步研究分析.

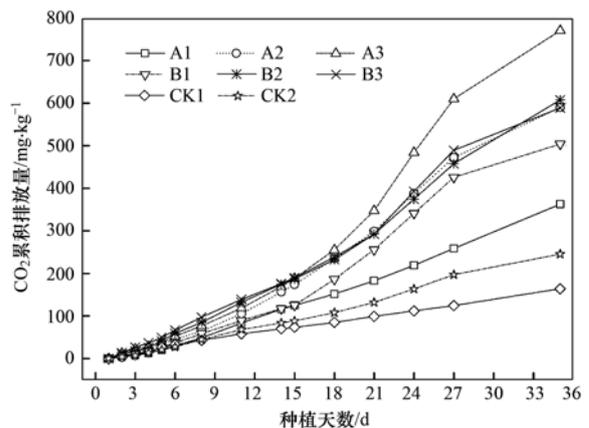


图 4 不同施肥处理下 CO_2 累积排放量

Fig. 4 Cumulative emissions of CO_2 under different fertilization treatments

2.4 N_2O 排放通量和累积排放量

各处理 N_2O 平均排放通量在 $0.226 \sim 1.062 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间 (图 5), A1、A2 和 A3 处理 N_2O

排放通量总体呈现先增后减的变化趋势, 幼苗期(6~18 d)内达到峰值后开始下降, 35 d 后排放量均趋于 0. 其累积排放量主要集中在发芽期和幼苗期(前 18 d), 分别为 202.63、278.43、378.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占总排放量的 84.13%、85.51% 和 75.92%. 何闪英等^[24]在将污泥堆肥品施用于番茄地时也发现, N_2O 排放量主要集中在前 20 d. B1、B2 和 B3 处理 N_2O 排放通量总体呈现降低趋势, 幼苗期变化平缓, 进入生长期后均持续下降, 其累积排放量主要集中在前 24 d, 分别为 255.68、363.60、584.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占总排放量的 92.4%、95.6% 和 97.4%.

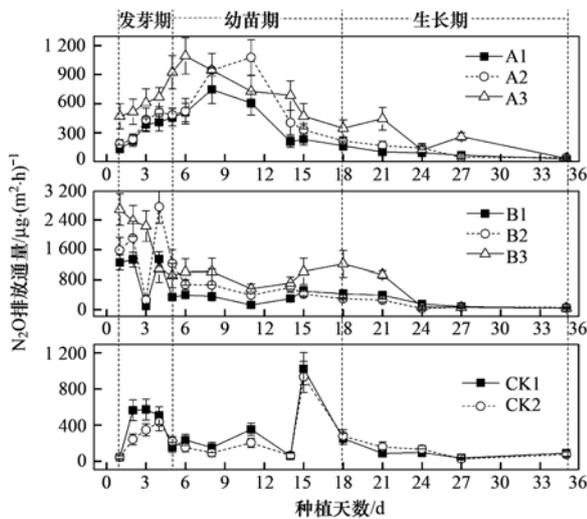


图 5 不同施肥处理下 N_2O 排放通量

Fig. 5 Emission fluxes of N_2O under different fertilization treatments

添加同种堆肥品的情况下, N_2O 排放量受施肥量影响, 施肥量越高, 排放量越大 ($P < 0.01$). 熊舞等^[25]在研究菜地氮肥用量与 N_2O 排放关系时也发现, 在氮肥施用水平小于 $1733 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 时, N_2O 总排放量与氮肥施用量呈指数函数关系, 而与是否加入硝化抑制剂无关. 这可能是由于施氮量过高, 植物系统无法全部吸收利用, 多余的氮肥进入土壤系统, 使得土壤铵态氮和硝态氮含量增加, 硝化作用和反硝化作用增强, 从而促进 N_2O 的排放.

邱炜红等^[26]在研究施加氮肥蔬菜地与裸地 N_2O 排放量时发现裸地土壤 N_2O 排放量远大于蔬菜地. 在本研究中, CK1 和 CK2 处理 N_2O 排放峰值出现在幼苗期, 生长期相对平缓, 其累积排放量为 $182.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $154.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 6), 分别占其他 6 种处理 N_2O 平均排放量的 53.13%、45.06%, 可见裸地 N_2O 排放量也不容忽视. CK1 和 CK2 处理间无显著性差异 ($P > 0.05$), 说明在不施

加污泥堆肥品的情况下, 是否种植作物对土壤 N_2O 的排放没有显著影响, 这与 López-Fernández 等^[27]关于种植玉米的研究结果一致.

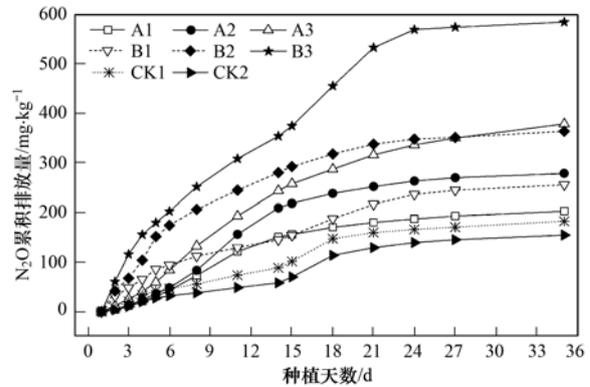


图 6 不同施肥处理下 N_2O 累积排放量

Fig. 6 Cumulative emissions of N_2O under different fertilization treatments

B1、B2 和 B3 处理的 N_2O 累积排放量分别比 A1、A2 和 A3 处理多 26.18%、30.59% 和 54.47%, 表明生物质炭堆肥品相比无生物质炭堆肥品具有一定的 N_2O 减排作用. 这与 Zhang 等^[10]、张斌等^[11]关于麦秆生物质炭减排 N_2O 的研究结果相似. 这可能是由于堆肥品中含有生物质炭的比表面积较大, N_2O 被表面吸附, 也可能是由于生物质炭引起土壤氧扩散增强或者影响了 N_2O 还原酶的活性, 从而抑制硝化反硝化作用.

2.5 温室气体排放系数和排放量

A1 ~ A3 处理 N_2O 排放系数约为 1.02% ~ 1.90%, B1 ~ B3 处理 N_2O 排放系数为 1.28% ~ 2.93%, 均随施肥量的增加而增大. N_2O 排放系数总体上 (B3 处理除外) 低于 van Beek 等^[28]估算的因施用氮肥引起的土壤 N_2O 排放系数 (2.2% ~ 2.7%), 但高于万合锋等^[29]对于猪粪堆肥品施用于蔬菜地时 N_2O 的排放系数 (0.18% ~ 0.74%), 这可能是施加了不同肥料存在的差异, 堆肥品种对于 N_2O 排放的影响机制需进一步研究. CH_4 排放主要为负, 在此不作讨论.

根据 IPCC 2014 年第 5 次报告中温室气体增温潜势表示方式, 将不同处理排放的温室气体以 CO_2 当量表示 (表 3). 堆肥品农用过程中排放的温室气体排放主要是 N_2O , 8 种处理中 N_2O 排放量占温室气体排放量的百分比均高达 99.90%. 施用同种堆肥品情况下, 施肥量越大, 其排放当量越大. 同时, 在相同施肥量的情况下, 施加生物质炭堆肥品的处理 (A1、A2 和 A3) CO_2 当量比无生物质炭堆肥品的

处理 (B1、B2 和 B3) 少 19.49% ~ 35.56% ($P < 0.05$), 说明生物质炭的添加具有明显的碳减排作用, 且对于 N_2O 的减排效果较 CH_4 更为显著. CK1、

CK2 处理的 CO_2 排放当量分别占 A、B 组处理平均排放量的 51.60%、44.34%, 说明裸地温室气体减排潜力也不容忽视.

表 3 不同处理温室气体排放系数和排放量¹⁾

Table 3 Accumulative emission and emission factor of the greenhouse gas under different fertilization treatments

处理方式	CH_4		N_2O		CO_2 排放当量 / $g \cdot m^{-2}$
	排放量/ $mg \cdot m^{-2}$	排放系数/%	排放量/ $mg \cdot m^{-2}$	排放系数/%	
CK1	-71.39	—	182.68	—	52.66
CK2	-36.62	—	154.94	—	45.25
A1	6.73	0.002	202.63	1.02	60.55
A2	-1.05	—	278.43	1.40	82.94
A3	-39.49	—	378.31	1.90	111.75
B1	-39.26	—	255.68	1.28	75.21
B2	2.20	0.001	363.60	1.83	108.41
B3	-29.49	—	584.38	2.93	173.41

1) 排放系数: 以 C 或 N 计的气体排放总量占施用堆肥品初始总 C 或 N 量的百分比

3 结论

(1) CH_4 排放主要集中在生长期, CH_4 累积排放量主要为负, 总体表现为土壤吸收 CH_4 , 同时作物生长能够促进 CH_4 排放. CH_4 吸收量受施肥量的影响, 生物质炭堆肥品施用量越高, CH_4 吸收量越大.

(2) CO_2 排放主要集中在生长期, 污泥施肥量越高, CO_2 排放量越大. 生物质炭堆肥品低施用量能减少 CO_2 排放, 而高施肥量增加 CO_2 排放.

(3) N_2O 排放量主要集中在发芽期和幼苗期, 施肥量越高, 排放量越大. 施加含生物质炭堆肥品的土壤 N_2O 排放系数更低, 含生物质炭和不含生物质炭堆肥品的土壤 N_2O 排放系数分别为 1.02% ~ 1.90% 和 1.28% ~ 2.93%.

(4) 施加含生物质炭的污泥堆肥品具有一定的碳减排效果, 其 CO_2 排放当量比不含生物质炭堆肥品的土壤低 19.49% ~ 35.56%, 且对于 N_2O 的减排效果较 CH_4 更显著.

参考文献:

- [1] Yang G, Zhang G M, Wang H C. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China[J]. Water Research, 2015, **78**: 60-73.
- [2] 陈同斌, 郑国砥, 高定, 等. 城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(9): 104-108.
Chen T B, Zheng G D, Gao D, et al. Key problems in municipal sludge composting and its industrialization process[J]. China Water & Wastewater, 2009, **25**(9): 104-108.
- [3] Spinosa L. Wastewater sludge: a global overview of the current status and future prospects[M]. London: IWA Publishing, 2007.
- [4] Wei Y J, Liu Y S. Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study[J]. Chemosphere, 2005, **59**(9): 1257-1265.
- [5] Dolgen D, Alpaslan M N, Delen N. Use of an agro-industry treatment plant sludge on iceberg lettuce growth[J]. Ecological Engineering, 2004, **23**(2): 117-125.
- [6] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context[J]. European Journal of Agronomy, 2004, **20**(3): 229-236.
- [7] 张增强, 殷宪强. 污泥土地利用对环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(6): 1182-1187.
Zhang Z Q, Yin X Q. Environmental effects of sludge application on land[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, **23**(6): 1182-1187.
- [8] 郑国砥, 陈同斌, 高定, 等. 城市污泥堆肥过程中不同类型有机物的动态变化[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(11): 117-120.
Zheng G D, Chen T B, Gao D, et al. Dynamic change of organic matters during composting of municipal sludge[J]. China Water & Wastewater, 2009, **25**(11): 117-120.
- [9] 石岳峰, 吴文良, 孟凡乔, 等. 农田固碳措施对温室气体减排影响的研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, **22**(1): 43-48.
Shi Y F, Wu W L, Meng F Q, et al. Advance in evaluation the effect of carbon sequestration strategies on greenhouse gases mitigation in agriculture[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, **22**(1): 43-48.
- [10] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, **139**(4): 469-475.
- [11] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(23): 4844-4853.
Zhang B, Liu X Y, Pan G X, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, **45**(23): 4844-4853.
- [12] Méndez A, Gómez A, Paz-Ferreiro J, et al. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a mediterranean soil[J]. Chemosphere, 2012, **89**(11): 1354-

- 1359.
- [13] Liang Z, Peng X J, Luan Z K. Immobilization of Cd, Zn and Pb in sewage sludge using red mud [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **66**(5): 1321-1328.
- [14] Xu T F, Qiu J R, Wu Q T, *et al.* Fate of heavy metals and major nutrients in a sludge-soil-plant-leachate system during the sludge phyto-treatment process [J]. *Environmental Technology*, 2013, **34**(15): 2221-2229.
- [15] 郑嘉熹, 魏源送, 吴晓凤, 等. 猪粪堆肥过程保氮固磷及温室气体(N₂O)减排研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2047-2055.
Zheng J X, Wei Y S, Wu X F, *et al.* Nutrients conservation of N & P and greenhouse gas reduction of N₂O emission during swine manure composting [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 2047-2055.
- [16] 李宇庆, 陈玲, 赵建夫. 施用污泥堆肥对木槿生长的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(4): 894-897.
Li Y Q, Chen L, Zhao J F. Effects of application of sewage sludge compost on Hibiscus Syriacus [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(4): 894-897.
- [17] 钟佳, 魏源送, 赵振凤, 等. 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4186-4194.
Zhong J, Wei Y S, Zhao Z F, *et al.* Emissions of greenhouse gas and ammonia from the full process of sewage sludge composting and land application of compost [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4186-4194.
- [18] 刘皓, 王海龙. 生物质炭对菜地土壤甲烷和氧化亚氮及二氧化碳排放的影响[J]. *安阳工学院学报*, 2014, **13**(2): 18-22.
Liu H, Wang H L. Effect of biochar on soil greenhouse gases emission [J]. *Journal of Anyang Institute of Technology*, 2014, **13**(2): 18-22.
- [19] 秦晓波, 李玉娥, Wang H, 等. 生物质炭添加对华南双季稻田碳排放强度的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(5): 226-234.
Qin X B, Li Y E, Wang H, *et al.* Impact of biochar amendment on carbon emissions intensity in double rice field in South China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(5): 226-234.
- [20] 黄晶, 李冬初, 刘淑军, 等. 长期施肥下红壤旱地土壤 CO₂ 排放及碳平衡特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, **18**(3): 602-610.
Huang J, Li D C, Liu S J, *et al.* Characteristics of soil CO₂ emission and carbon balance under long-term fertilization in red soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, **18**(3): 602-610.
- [21] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil [J]. *Plant and Soil*, 2007, **291**(1-2): 275-290.
- [22] 成功, 张阿凤, 王旭东, 等. 运用“碳足迹”的方法评估小麦秸秆及其生物质炭添加对农田生态系统净碳汇的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(3): 604-612.
Cheng G, Zhang A F, Wang X D, *et al.* Assessment of wheat straw and its biochar effects on carbon sink in agricultural ecosystems using “carbon footprint” method [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(3): 604-612.
- [23] Graber E R, Harel Y M, Kolton M, *et al.* Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media [J]. *Plant and Soil*, 2010, **337**(1-2): 481-496.
- [24] 何闪英, 李阿南, 王雷. 污泥及其混合堆肥对番茄土壤性质和 N₂O 排放的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(15): 239-246.
He S Y, Li A N, Wang L. Effect of sewage and its mixed compost on soil properties and N₂O emission from tomato soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(15): 239-246.
- [25] 熊舞, 夏永秋, 周伟, 等. 菜地氮肥用量与 N₂O 排放的关系及硝化抑制剂效果 [J]. *土壤学报*, 2013, **50**(4): 743-751.
Xiong W, Xia Y Q, Zhou W, *et al.* Relationship between nitrogen application rate and nitrous oxide emission and effect of nitrification inhibitor in vegetable farming system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(4): 743-751.
- [26] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究 [J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(12): 2982-2985.
Qiu W H, Liu J S, Hu C X, *et al.* Comparison of nitrous oxide emission from bare soil and planted vegetable soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(12): 2982-2985.
- [27] López-Fernández S, Díez J A, Hernáiz P, *et al.* Effects of fertilizer type and the presence or absence of plants on nitrous oxide emissions from irrigated soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, **78**(3): 279-289.
- [28] van Beek C L, Pleijter M, Kuikman P J. Nitrous oxide emissions from fertilized and unfertilized grasslands on peat soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **89**(3): 453-461.
- [29] 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 等. 施用畜禽粪便堆肥品的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 892-900.
Wan H F, Zhao C Y, Zhong J, *et al.* Emission of CH₄, N₂O and NH₃ from vegetable field applied with animal manure composts [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 892-900.

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 Foulants 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 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)