

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀	(1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹	(9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦	(18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽	(27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹	(38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波	(49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松	(57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊	(68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男	(77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途	(89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛	(99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖	(109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅	(117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛	(123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁	(130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚	(137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭	(145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬	(152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚	(161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰	(170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛	(179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭	(187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里	(195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英	(202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军	(212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅	(219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦	(227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰	(232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良	(239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞	(247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航	(256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民	(263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪	(269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建	(276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎	(284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华	(292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川	(300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰	(310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰	(321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水	(331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial	(339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬	(348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成	(355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标	(363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁	(371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊	(379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥	(389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华	(399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒	(406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶	(415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰	(422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水	(430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功	(438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛	(450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁	(460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶	(467)

3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响

武岩^{1,4}, 红梅^{1,4*}, 林立龙², 刘梅³, 刘宇杰³

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010010; 2. 内蒙古土壤肥料工作站, 呼和浩特 010011; 3. 杭锦后旗农业推广中心, 巴彦淖尔 015000; 4. 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 呼和浩特 010010)

摘要: 为研究膨润土、生物炭和聚丙烯酸钾等土壤改良剂对农田温室气体排放的影响, 采用静态暗箱-气相色谱法研究了5种不同施肥处理(不施肥、常规施肥、常规施肥+膨润土、常规施肥+生物炭、常规施肥+聚丙烯酸钾, 分别标记为NF、CK、B、C和PAM)下河套灌区2015、2016两年玉米田温室气体排放动态变化。结果表明, 玉米生育期内, 河套灌区农田 N_2O 呈双峰型排放规律, 各处理于追肥灌水后5~7 d出现 N_2O 排放峰值; 农田 CH_4 排放无明显规律, 个别处理于追肥灌水后6 d左右出现 CH_4 排放峰值, 其余时期均表现为土壤对 CH_4 的吸收作用; CO_2 呈单峰型排放规律, 于玉米拔节期出现排放峰值。相关性分析表明, 土壤温度的升高, 可显著增加土壤 N_2O 和 CO_2 的排放速率。与CK相比, B和PAM处理可显著降低 N_2O 累计排放量($P < 0.05$), 降幅分别为38.59%和45.35%; B、C处理可显著增强土壤对 CH_4 的吸收作用($P < 0.05$), 累计吸收量分别增加144.44%和172.22%; B、C处理 CO_2 累计排放量与CK差异显著($P < 0.05$), 与CK相比分别降低25.40%和22.21%。总体来说, B、C和PAM处理下综合增温潜势较CK分别降低27.77%、19.61%和12.16%, 温室气体排放强度降低35.20%、26.65%和13.36%。与CK相比, B、C处理下玉米产量显著提高11.33%和9.59%, 净生态系统经济预算显著增加16.15%和12.65% ($P < 0.05$)。综上所述, 对河套灌区玉米种植体系而言, 常规施肥基础上添加膨润土、生物炭是提高作物产量、降低增温潜势的有效农业措施。

关键词: 膨润土; 生物炭; 聚丙烯酸钾; 河套灌区; 温室气体

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0310-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201706110

Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District

WU Yan^{1,4}, HONG Mei^{1,4*}, LIN Li-long², LIU Mei³, LIU Yu-jie³

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Soil and Fertilizer Station in Inner Mongolia, Hohhot 010011, China; 3. Hangjinhouqi Agricultural Extension Center, Bayinnaoer 015000, China; 4. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Hohhot 010010, China)

Abstract: In order to study the effects of soil amendments on greenhouse gas emissions, five different fertilization treatments (no fertilization, conventional fertilization, conventional fertilization + bentonite, conventional fertilization + biochar, and conventional fertilization + potassium polyacrylate, labeled as NF, CK, B, C, and PAM) were applied on corn fields in the Hetao irrigation district during the maize growing seasons of 2015 and 2016, and the samples were analyzed by static chamber- gas chromatography. The results showed that N_2O had a bimodal emission pattern in the Hetao Irrigation Area, and the N_2O emission peak appeared five to seven days after topdressing and irrigating (d. p. ti). The CH_4 emission had no apparent pattern. While the CH_4 emission peak appeared with a few treatments after 6 d. p. ti, the rest of the period indicated the CH_4 absorption in the soil. CO_2 had a unimodal emission pattern, and the CO_2 emission peak appeared during the jointing stage of maize growth. In addition, the correlation analysis indicated that an increase in soil temperature could significantly increase the N_2O and CO_2 emission rates. Moreover, compared with the CK treatment, the B and PAM treatments could significantly decrease the cumulative emission of N_2O ($P < 0.05$), with a decline of 38.59% and 45.35%, respectively. The B and C treatments could significantly enhance the soil uptake of CH_4 ($P < 0.05$), and the cumulative absorption of CH_4 increased 144.44% and 172.22%, respectively. The B and C treatment results were significantly different from the CK treatment based on the cumulative emission of CO_2 ($P < 0.05$), with a decrease of 25.40% and 22.21%, respectively. In general, compared with the CK treatment, the comprehensive warming potential of the B, C, and PAM treatments declined by 27.77%, 19.61%, and 12.16%, respectively. The greenhouse gas emission intensity of the B, C, and PAM treatments decreased by 35.20%, 26.65%, and 13.36%, respectively. The maize yield with the B and C treatments was significantly increased by 11.33% and 9.59%, respectively; and the economic budget of net ecosystem was increased by 16.15% and 12.65%, respectively ($P < 0.05$). In summary, adding extra bentonite and biocarbon to the conventional fertilization was an effective agricultural measure for improving crop yield and reducing the global warming potential for the corn planting system in the Hetao irrigation area.

收稿日期: 2017-06-12; 修订日期: 2017-07-19

基金项目: 内蒙古“青年科技英才支持计划”项目(NJYT-15-A11); 内蒙古自治区科技创新引导奖励资金项目

作者简介: 武岩(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: wuyan19911120@vip.qq.com

* 通信作者, E-mail: nmhm1970@sina.com

Key words: bentonite; biocarbon; potassium polyacrylate; Hetao Irrigation Area; greenhouse gas

全球变暖是当今世界面临的重大环境问题,已对人类生产、生活造成了严重的影响^[1]. N_2O 、 CH_4 和 CO_2 被认为是最重要的 3 种温室气体,2011 年大气中 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 体积分数分别为 324、1 803 和 391 $\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$,较 1760 年增长了 0.21、1.52 和 0.4 倍,每年还以 0.23%、0.28% 和 0.51% 的速度在持续增长^[1]. 目前,农业生产排放的温室气体占人类活动温室气体排放总量的 14% 左右^[1,2], CH_4 和 N_2O 在农业中的排放量分别占人类活动产生总量的 52% 和 65%^[3~5],如何采取有效措施减少农业温室气体排放成为各国政府和科学界研究的热点.

农田温室气体排放主要受到气候因素、土壤因素和农业措施等方面的影响,而采用合理的施肥措施是减少农业温室气体排放的主要手段. 膨润土、聚丙烯酸钾和生物炭是 3 种改土材料,它们固有的结构特征和理化特性使其拥有了较强的吸附性、粘结性和可塑性,对农田温室气体减排有很好的应用前景^[6~9]. 膨润土的主要成分是蒙脱石,对土壤的改良效果被很多研究结果证实^[10,11]. 在不同的土壤环境中,膨润土可以起到不同的改良效果,在沙地中膨润土可减少肥料损失,增强肥料利用率;在肥力较低、有机质含量低的农田中,膨润土可增加土壤有机质含量,提高作物产量;在被重金属污染的土壤中,膨润土的离子交换性可固定重金属,降低其有效性,以达到修复土壤的作用^[7]. 蒙脱石的间层结构决定了膨润土对土壤中碳、氮有较强的吸附作用^[12],其对农田温室气体究竟产生何种影响,目前资料较少,值得深入研究. 聚丙烯酸钾是一种颗粒状水溶性高分子聚合物,除具备高吸水性外,还有生产简单、性质稳定、分解产物对环境无害等特点^[13]. 聚丙烯酸钾施入土壤后,可降低土壤容重,提高土壤孔隙度,改善土壤通透性,减少 CH_4 和 N_2O 产生需要的厌氧状态^[13,14]. 目前,关于聚丙烯酸钾的研究主要集中于施用方式、保水保肥效果、与其他有机或无机材料合成的新型保水剂及保水性能的研究等^[13~15],针对农田温室气体减排的研究还少见报道. 目前,生物炭对农田温室气体减排的研究已进入较为成熟的阶段,Zhang 等^[16]通过对玉米田的研究发现,生物炭施用量达到 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时可显著降低 N_2O 排放,施用量达到 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时对 N_2O 的排放降幅达到 54.3%~56.7%. 刘玉学等^[17]和王欣欣等^[18]通过对稻田土壤的研究发现,生物炭的施入不

仅改善了土壤的理化性质,还增强了土壤对 NO_3^- 的吸附能力,进而对稻田 N_2O 的排放产生了抑制作用. 国外的研究表明,生物炭可增加土壤中有机的热解温度,降低有机物的分解速率,延缓了土壤中碳、氮养分的释放,从根本上减弱了 CH_4 和 N_2O 的产生^[19]. Zhang 等^[16]研究了生物炭用量对农田温室气体排放的影响,刘玉学等^[17]和王欣欣等^[18]研究了生物炭对稻田土壤温室气体排放的影响,而在北方旱地农田,温室气体对膨润土、聚丙烯酸钾和生物炭等多种土壤改良材料的响应研究还尚未见到相关报道.

河套灌区是中国三大灌区之一,是内蒙古重要的粮食生产基地^[20]. 灌区施肥后以黄河水漫灌的田间管理方式增加了农田 N_2O 排放和氮素的淋溶损失,氮肥的大量损失引起了温室气体排放、土壤和水体氮素富营养化、土壤酸化等环境问题^[20]. 目前,针对河套灌区玉米-土壤体系温室气体排放的研究还少见报道. 因此,本研究结合了河套灌区现有的耕作条件和田间管理措施,在常规施肥的基础上添加膨润土、生物炭和聚丙烯酸钾等土壤改良剂,并对河套灌区玉米种植模式下温室气体排放展开系统的研究,明确不同土壤改良剂对河套灌区农田温室气体排放的影响,对提供科学的施肥措施、保护和改善河套灌区生态环境,促进农业持续健康发展具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古巴彦淖尔市杭锦后旗头道桥镇联增村($40^\circ26'\sim41^\circ13'\text{N}$, $106^\circ34'\sim107^\circ34'\text{E}$),地处河套平原,海拔 1 032~1 050 m,属温带大陆性气候. 年均气温 7.9°C ,年均降雨量 136.5 mm,土壤以硫酸盐-氯化物盐化潮土为主,供试土壤(0~20 cm)的基本理化性质为 pH 8.2,有机质 $12.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $8.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $102.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱化度 233.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,盐度 5.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮 $7.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮 $3.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2 试验设计

试验于 2015 年 4 月~2015 年 10 月、2016 年 4 月~2016 年 10 月进行,供试作物为玉米,品种为内单 314,玉米行距 60 cm,株距 20 cm,种植密度为 $82\,500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$. 试验共设 5 个处理,具体为:① 不

施肥,处理编号 NF; ② 常规施肥(磷酸二铵 600 kg·hm⁻²做基肥+尿素 825 kg·hm⁻²做追肥),对照,处理编号 CK; ③ 常规施肥+膨润土(6 t·hm⁻²),膨润土仅第一年施用,处理编号 B; ④ 常规施肥+生物炭(1.5 t·hm⁻²),处理编号 C; ⑤ 常规施肥+聚丙烯酸钾(75 kg·hm⁻²),处理编号 PAM,以上土壤改良剂用量均按照商品推荐用量施用,每个处理 3 次重复,共 15 个小区,随机排列,每个小区面积为 133 m²(19 m×7 m),各小区间以土垄分割。

田间管理:在玉米生育期内施肥、灌水 3 次,氮肥的 50% 与全部磷肥在播种前基施(5 月 3 日),6 月 19 日第一次追肥,7 月 9 日第二次追肥,追肥种类为尿素,第一次追施全部氮肥的 30%,第二次追施全部氮肥的 20%,所有土壤改良剂随基肥施于土壤表层,后用旋耕机将肥料与耕层土壤充分混匀。试验田年灌溉用水量 750~900 m³·hm⁻²,第一次灌水在 6 月 20 日;第二次灌水在 7 月 10 日,第三次灌水在 8 月 15 日,两年施肥灌水日期大体一致。玉米 9 月 15 日左右进行收获,测产。

1.3 样品的采集及测定项目

温室气体的采集与监测:静态暗箱由箱体和底座两部分组成,箱体使用 1.2 mm 厚不锈钢板焊接制成,长、宽、高为 50 cm×50 cm×50 cm,在一侧距底部约 25 cm 处接取气三通阀,在其旁有温度探测口,箱外层包覆泡沫层用来保温,箱内顶部安装小型风扇用以混匀箱内气体。底座长、宽、高为 50 cm×50 cm×15 cm,底座下连接长度为 12 cm 的楔子,底座上有高 3 cm 的水槽用于注水,以密封箱体。每个处理共设 3 个采样箱重复,与各处理小区重重复一一对应。在玉米播种前,选每个小区中心位置安装底座。底座插入土层 12 cm 深处,使水槽与地表平行,整个生长季不再移动,底座内不种植玉米。在玉米播种后,每 7 d 采集 1 次温室气体样品,追肥后 2 d 采集 1 次,1 周后恢复 7 d 采集 1 次。每次于上午 08:30~11:30 进行,所有处理同时采样,分别于关箱后的 0、10、20、30 min 用注射器采气,同时用温度计测定箱内温度,用地温计测定 0~10 cm 土层温度。收集的气体用 300 mL 气袋保存,气体样品带回实验室采用美国 Picarro 公司生产的 Picarro G2308 N₂O CH₄H₂O 分析仪测定 N₂O、CH₄ 含量,用 Picarro G2301CO₂ CH₄H₂O 分析仪测定 CO₂ 含量。

土壤样品的采集与监测:于每次收集气体后,用直径 5 cm 的土钻多点采集 0~10 cm 土层土样,采用烘干法测定其土壤含水量。于玉米收获后,多点

采集 0~20 cm 的土壤样品,形成混合土样,以 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 溶液作为浸提液(水土比 10:1),用连续流动分析仪(FIAstar5000)测定其硝态氮和铵态氮含量;用重铬酸钾容量法测定土壤有机质;半微量开氏法测定土壤全氮;1 mol·L⁻¹ NH₄OAC 浸提火焰光度法测定土壤速效钾;0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提分光光度法测定土壤速效磷;电位法(土水比 1:5)测定土壤 pH。

1.4 数据处理与分析方法

1.4.1 N₂O、CH₄ 和 CO₂ 排放通量的计算

N₂O、CH₄ 和 CO₂ 排放通量根据下式进行计算^[21]:

$$F = \rho \times h \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中, F 为被测气体排放通量,单位为 mg·(m²·h)⁻¹; ρ 为被测气体标准状态下的气体密度(kg·m⁻³); h 为采样箱的有效高度(m); dc/dt 为箱体内被测气体的浓度变化率; T 为采样时箱内平均气温(℃),用各重复的平均值表示各处理每次排放通量。

1.4.2 N₂O、CH₄ 和 CO₂ 累计排放量的计算

气体排放总量的计算公式如下:

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i \times d_i}{d}$$

$$G = (\bar{F} \times 24 \times d) / 100$$

式中, G 为温室气体排放总量(kg·hm⁻²); F_i 为第 i 次采样时气体排放通量[mg·(m²·h)⁻¹]; d_i 为第 i 次采样至下一次采样的间隔天数; d 为生育期总天数,100 为单位转换系数。

1.4.3 综合增温潜势计算

综合增温潜势(GWP)的计算公式如下:

$$GWP = 298R_{N_2O} + 34R_{CH_4} + R_{CO_2}$$

$$= GWP_{N_2O} + GWP_{CH_4} + GWP_{CO_2}$$

式中, R_{N_2O} 为 N₂O 生育期累计排放量(kg·hm⁻²); R_{CH_4} 为 CH₄ 生育期累计排放量(kg·hm⁻²); R_{CO_2} 为 CO₂ 生育期累计排放量(kg·hm⁻²); GWP_{N_2O} 为 N₂O 增温潜势; GWP_{CH_4} 为 CH₄ 增温潜势; GWP_{CO_2} 为 CO₂ 增温潜势,在 100 a 的时间尺度下,CH₄ 和 N₂O 的增温潜势分别是 CO₂ 的 34 倍和 298 倍^[22]。

1.4.4 温室气体排放强度计算

温室气体强度表示农业单位产量与气候变化的关系,是将环境效益和经济效益相协调的综合评价指标^[23]。

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / \text{yield}$$

式中, GHGI 为温室气体强度 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$), 产量为单位面积平均产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

1.4.5 净生态系统经济预算

净生态系统经济预算 (NEEB) 是作物生产和农业活动的重要参考指标^[24], 计算公式如下:

$$\text{NEEB} = \text{产量收益} - \text{种植成本} - \text{GWP 成本}$$

式中, NEEB 单位为 $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$; 产量收益为当前玉米价格 ($2 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与玉米籽粒产量乘积来获得; 种植成本包括机械翻耕费用 ($1400 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)、机械收获 ($1000 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)、农药和除草剂 ($1400 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)、氮肥 ($1056 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)、磷肥 ($1530 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)、膨润土 ($1200 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)、秸秆生物炭 ($600 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$)、聚丙烯酸钾 ($525 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$); GWP 成本以碳交易价格 ($103.7 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 以 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 计) 与 GWP 的乘积计算^[25].

1.4.6 数据处理

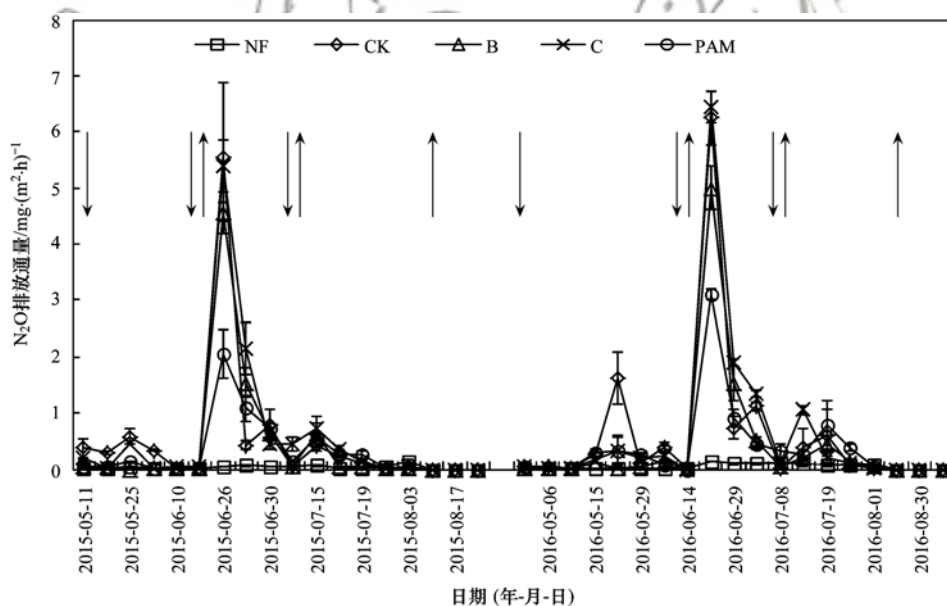
运用 Excel 软件和 SAS9.2 软件进行数据统计与分析, 所有数据结果均以两年平均值 $\pm$ 标准差的形式表示, 用 LSD 法进行差异显著性检验.

2 结果与分析

2.1 土壤改良剂对玉米田 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 排放通量的影响

如图 1 所示, 除 NF 外, 各处理 N_2O 排放通量变化趋势基本一致, 呈现双峰型排放规律, 各施肥处理均于追肥灌水后 5~7 d 出现 N_2O 排放峰值, 随后逐渐降低. 施入基肥后, 各处理 N_2O 排放通量较小, 且变化平稳, 未出现排放峰值. 各处理 N_2O 排放通量最高峰出现于第一次追肥灌水后 7 d 左右, 于峰值后 3~4 d 降低至较低水平. 第二次追肥灌水后 7 d 左右, 各施肥处理 N_2O 排放通量稍有所升高, 随后逐渐降低, 至玉米成熟期, N_2O 排放通量几乎为零. 如表 1 所示, NF、CK、B、C 和 PAM 处理 N_2O 平均排放通量分别为 0.04 、 0.57 、 0.43 、 0.61 和 $0.35 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 与对照相比, B 和 PAM 处理 N_2O 平均排放通量显著降低了 24.56% 和 38.60% . C 处理 N_2O 平均排放通量与 CK 无显著差异.

玉米田 CH_4 排放通量季节变化如图 2 所示, 在灌水后 5~7 d, 个别处理出现 CH_4 排放峰值, 这是



向下箭头表示施肥, 向上箭头表示浇水, 误差线为标准误差, 下同

图 1 不同处理玉米田 N_2O 排放通量季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of N_2O emission flux in the maize field with different treatments

因为玉米田灌水后, 土壤含水量增大 (图 3), 土壤环境剧烈变化, 形成了有利于 CH_4 产生所需要的厌氧环境, 促进了 CH_4 的形成. 其余时期土壤含水量变化较为平稳, 各处理 CH_4 排放通量均为负值, 即土壤吸收大气中 CH_4 . NF、CK、B、C 和 PAM 处理 CH_4 平均排放通量分别为 -4.46 、 -5.30 、 -14.83 、

-16.66 和 $-4.77 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 与 CK 相比, B、C 处理 CH_4 平均排放通量显著降低了 179.81% 和 214.34% , 其余处理无显著差异.

图 4 中, 各处理 CO_2 排放通量变化趋势大体相同, 呈单峰型排放规律, 于 6 月末达到 CO_2 排放峰值. 玉米播种初期, 由于土壤温度较低 (图 5), 微生

表 1 不同处理温室气体平均排放通量¹⁾

Table 1 Average emission flux of greenhouse gases with different treatments			
处理	$\text{N}_2\text{O}/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	$\text{CH}_4/\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	$\text{CO}_2/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$
NF	$0.04\pm0.003\text{C}$	$-4.46\pm0.12\text{A}$	$225.99\pm5.45\text{C}$
CK	$0.57\pm0.048\text{A}$	$-5.30\pm0.30\text{A}$	$446.22\pm14.42\text{A}$
B	$0.43\pm0.022\text{B}$	$-14.83\pm0.44\text{B}$	$333.04\pm6.62\text{B}$
C	$0.61\pm0.034\text{A}$	$-16.66\pm0.85\text{C}$	$349.04\pm5.57\text{B}$
PAM	$0.35\pm0.030\text{B}$	$-4.77\pm0.09\text{A}$	$414.32\pm33.64\text{A}$

1) 平均值±标准差, $n=3$; 同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

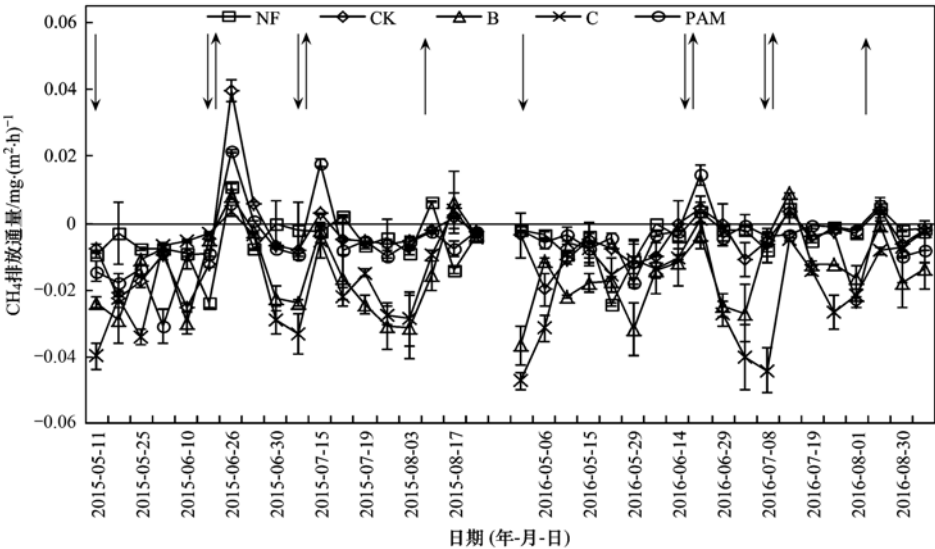


图 2 不同处理玉米田 CH₄ 排放通量季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of CH₄ emission flux in the maize field with different treatments

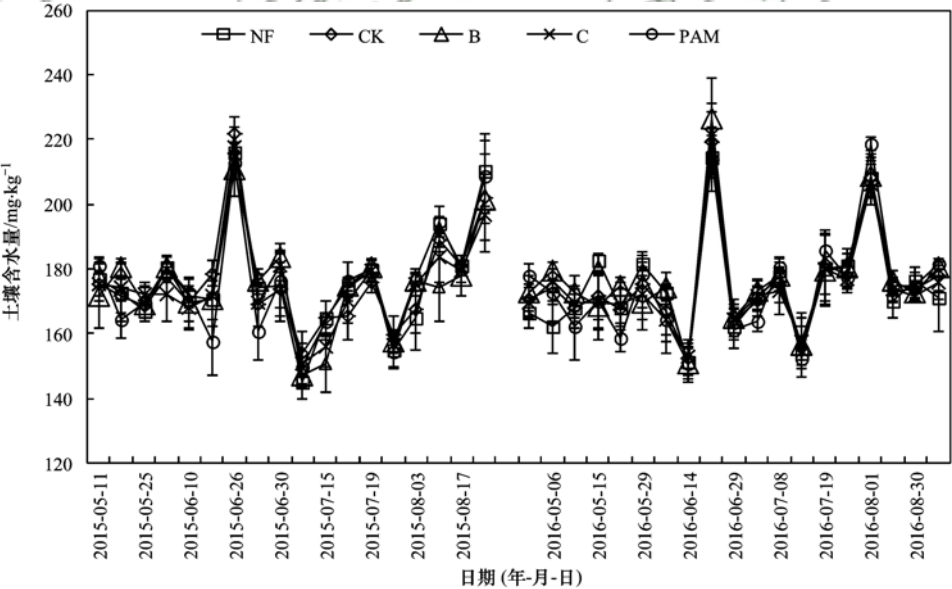


图 3 玉米生长季土壤含水量的动态变化

Fig. 3 Dynamic change of soil water content during the growing season of maize

物活性较弱,各处理 CO_2 排放通量较低,且维持在较为平稳的状态;随后,土壤温度逐渐回升, CO_2 排放通量逐渐升高,于 6 月末达到 CO_2 排放峰值;此后各处理呼吸速率逐渐降低,至玉米成熟期,土壤

CO_2 排放通量维持在 $133.10 \sim 513.52 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 范围内. 由表 1 可知,各处理 CO_2 平均排放通量分别为 225.99 、 446.22 、 333.04 、 349.04 和 $414.32 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. B、C 处理 CO_2 平

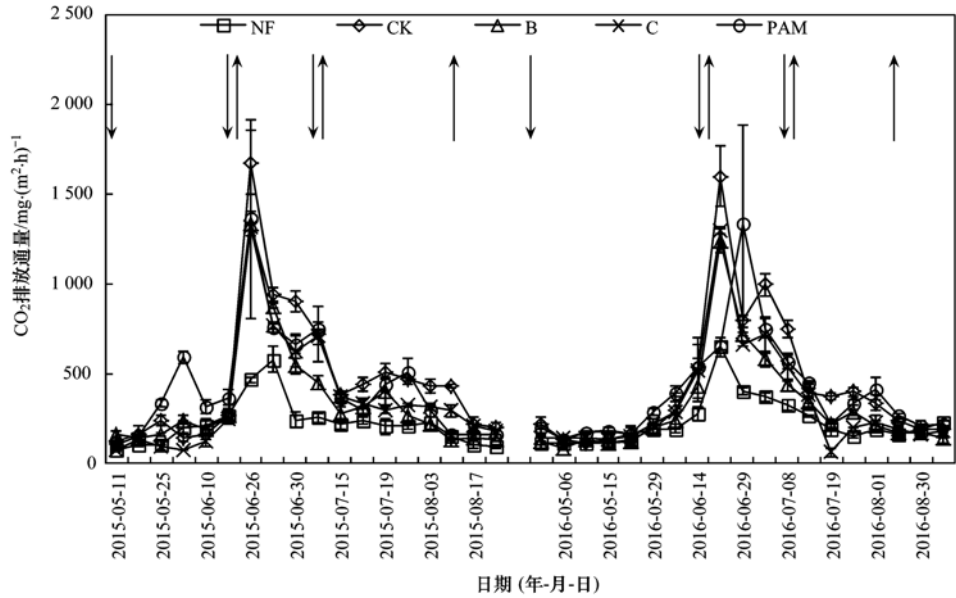


图 4 不同处理玉米田 CO₂ 排放通量季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of CO₂ emission flux in the maize field with different treatments

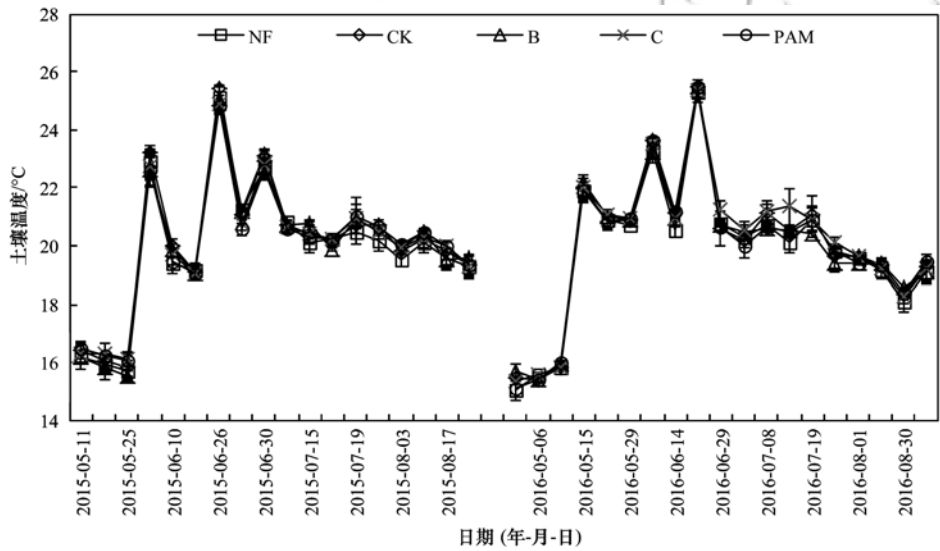


图 5 玉米生长季土壤温度的动态变化

Fig. 5 Dynamic change in the soil temperature during the growing season of maize

均排放通量较 CK 显著降低了 25.36%、21.78%，PAM 处理与 CK 无显著差异。

如表 2 所示，土壤温度与 N₂O 和 CO₂ 排放通量呈极显著正相关，相关系数分别为 0.478、0.509，土壤温度与 CO₂ 排放通量相关性较好。随着土壤温度的升高，土壤微生物活性增强，显著增加了土壤 CO₂ 排放通量。同时，土壤微生物活性的加强，促进了硝化与反硝化作用的进行，显著提高了土壤 N₂O 的排放速率。玉米生育期土壤含水量变化处于 146.98 ~ 226.43 mg·kg⁻¹，在这一范围内，土壤含水量对 N₂O、CH₄ 和 CO₂ 排放通量均无显著相关性。

2.2 土壤改良剂对温室气体累计排放量、GWP 和 GHGI、玉米产量、NEEB 的影响

如表 3 所示，不同施肥处理 温室气体累计排放量和 GWP 存在显著差异 ($P < 0.05$)。与 CK 相比，B 和 PAM 处理 N₂O 累计排放量分别降低 38.59% 和 45.39%。各处理 CH₄ 累计排放量均为负值，表现为土壤对 CH₄ 的吸收作用，B、C 处理 CH₄ 累计吸收量较 CK 分别提高 144.44% 和 172.22%。与 CK 相比，CO₂ 累计排放量以 B、C 处理下降最为明显，分别降低 25.40%、22.21%，PAM 与对照无显著差异。根据各处理温室气体累计排放量，计算出 100 a 尺度下 3 种温室气体的增温潜势，B、C 和 PAM 处

理 GWP 均显著低于 CK ($P < 0.05$), 分别降低 27.77%、19.61% 和 12.16%。可见, 在常规施肥基础上添加膨润土、生物炭和聚丙烯酸钾等改土材料, 可显著降低玉米田综合增温潜势, 其中以 B 处

表 2 温室气体平均排放通量与土壤含水量、土壤温度的相关性¹⁾

Table 2 Single Pearson correlation coefficient between average emission flux of greenhouse gases and soil water content and soil temperature

环境因子	N ₂ O	CO ₂	CH ₄
土壤含水量	-0.06	0.079	0.249
土壤温度	0.478 **	0.509 **	-0.152

1) * 表示 $P < 0.05$ 显著相关; ** 表示 $P < 0.01$ 显著相关

表 3 不同处理下温室气体累计排放量、GWP、GHGI、玉米产量和 NEEB

Table 3 Cumulative emissions of greenhouse gases, GWP, GHGI, corn yield, and NEEB with different treatments

处理	温室气体累计排放量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$			GWP / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	GHGI / $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	产量 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	NEEB / $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$
	N ₂ O	CH ₄	CO ₂				
NF	0.57 ± 0.03C	-0.14 ± 0.05A	6 374.64 ± 132.63C	6 540.43 ± 140.10D	1 026.36 ± 35.93BC	6 378.36 ± 84.50C	8 278.47 ± 183.53C
CK	8.68 ± 0.55A	-0.18 ± 0.02A	11 923.85 ± 422.87A	14 504.26 ± 575.29A	1 280.94 ± 64.72A	11 341.50 ± 272.79B	14 792.90 ± 561.79B
B	5.33 ± 0.24B	-0.44 ± 0.03B	8 895.12 ± 164.34B	10 476.41 ± 225.52C	830.06 ± 30.73D	12 626.98 ± 258.91A	17 182.49 ± 529.85A
C	8.06 ± 0.55A	-0.49 ± 0.02B	9 275.31 ± 169.35B	11 660.39 ± 224.52BC	939.60 ± 35.23CD	12 429.67 ± 295.02A	16 664.15 ± 601.18A
PAM	4.74 ± 0.49B	-0.16 ± 0.03A	11 334.15 ± 750.28A	12 740.35 ± 729.40B	1 109.84 ± 71.69B	11 491.89 ± 198.23B	14 751.61 ± 420.75B

2.3 土壤改良剂对土壤养分的影响

各处理土壤养分情况如表 4 所示。B、C 处理土壤有机质含量较 CK 分别提高 24.43% 和 17.88%, PAM 与 CK 无显著差异。与 CK 相比, B、C 和 PAM 处理可显著增加土壤全氮和硝态氮含量 ($P < 0.05$), 全氮提高 9.15%、8.54% 和 7.93%, 硝态氮提高 18.85%、15.65% 和 11.30%; 铵态氮、速效

理降幅最为明显。

由表 3 可知, 温室气体排放强度大小顺序为 CK > PAM > C > B > NF, PAM、C 和 B 处理相比 CK 分别降低 13.36%、26.65% 和 35.20%, 均达到显著性差异 ($P < 0.05$)。B、C 处理与 CK 相比, 玉米产量分别提高 11.33%、9.59%, 净生态系统经济预算显著增加 16.15%、12.65%。由此可知, B 和 C 处理可显著提高玉米产量和净生态系统经济预算, 减少温室气体排放强度。PAM 处理虽对产量无显著提升作用, 但对 N₂O 排放的抑制作用显著减少了温室气体排放强度, 其净生态系统经济预算与 CK 无显著差异。

钾和速效磷含量虽高于 CK, 但未达到显著水平。C 处理 pH 值显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 由原来的 8.2 提升至 8.63。综上所述, 添加膨润土和生物炭可显著提高土壤有机质、全氮、硝态氮含量; 添加聚丙烯酸钾对土壤有机质含量无显著影响, 但提高了土壤中全氮和硝态氮的含量; 生物炭的施入可显著提高土壤 pH。

表 4 不同处理土壤养分状况

Table 4 Soil nutrient status with different treatments

处理	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	硝态氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	铵态氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH
NF	12.69 ± 0.64C	1.55 ± 0.01C	13.47 ± 0.49C	3.46 ± 0.18B	96.19 ± 3.21A	13.68 ± 0.82B	8.17 ± 0.10B
CK	14.82 ± 0.52B	1.64 ± 0.03B	16.29 ± 0.35B	5.35 ± 0.83A	104.95 ± 3.03A	19.36 ± 0.55A	8.11 ± 0.10B
B	18.44 ± 0.46A	1.79 ± 0.02A	19.36 ± 0.81A	5.72 ± 0.59A	106.76 ± 3.62A	19.58 ± 0.43A	8.19 ± 0.12B
C	17.47 ± 0.16A	1.78 ± 0.02A	18.84 ± 0.34A	6.31 ± 0.34A	106.11 ± 4.83A	19.94 ± 0.53A	8.63 ± 0.19A
PAM	16.69 ± 0.41AB	1.77 ± 0.02A	18.13 ± 0.27A	5.92 ± 0.72A	105.90 ± 3.33A	19.41 ± 0.85A	8.14 ± 0.07B

由表 5 可知, 土壤有机质、全氮和硝态氮含量与 CO₂、CH₄ 累计排放量均呈显著或极显著负相关, 与 N₂O 累计排放量无显著相关性, 但均呈负相关关系; 其他养分指标与温室气体累计排放量均无显著相关性。土壤有机质、全氮和硝态氮含量的提升, 改善了土壤理化性质, 增强了土壤通透性, 减弱了土壤微生物的矿化作用, 对于降低 CO₂ 排放、提高 CH₄ 吸收有显著作用。

表 5 温室气体累计排放量与土壤养分的相关性

Table 5 Single Pearson correlation coefficient between cumulative emissions of greenhouse gases and soil nutrients

养分指标	N ₂ O	CO ₂	CH ₄
有机质	-0.460	-0.867 **	-0.721 **
全氮	-0.555	-0.692 *	-0.608 *
硝态氮	-0.382	-0.611 *	-0.643 *
铵态氮	-0.221	-0.317	-0.196
速效磷	-0.050	-0.255	-0.249
速效钾	-0.307	-0.201	-0.055
pH	0.207	-0.299	-0.502

3 讨论

3.1 土壤改良剂对 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 排放的影响

生物炭对农田温室气体的减排效应一直是环境学界研究的热点,Cayuela 等^[26]的研究表明,施用生物炭可显著降低农业 N_2O 排放,降幅在 54% 左右,生物炭的施用提高了土壤 pH 值,通过对土壤理化性状和微生物数量的影响,减少了 N_2O 排放. 本研究未发现生物炭对土壤 N_2O 排放有抑制作用. 生物炭施入土壤后,提高了土壤中氨氧化细菌和氨氧化古菌的数量^[27],加速了硝化作用的进行,间接促进了 N_2O 的排放. 其次,生物炭提高了土壤 pH 值,由背景值的 8.2 提升至 8.63,Dandie 等^[28]的研究表明,土壤中亚硝酸盐还原菌与土壤 pH 值呈显著正相关,pH 的升高会显著增加亚硝酸盐还原菌数量. 在灌水期间,土壤水分条件剧烈变化,为反硝化作用提供了严格的厌氧环境,亚硝酸盐还原菌数量的增加,促进了 NO_2^- 转化为 NO ,间接增加了反硝化过程中 N_2O 的产生. 再次,生物炭施入土壤后,提高了土壤有机质含量,较 CK 处理增加了 17.88%. Dambreville 等^[29]的研究表明,土壤有机质含量是影响反硝化细菌丰度变化的主要因素,与氧化亚氮还原菌数量有显著相关性. 氧化亚氮还原菌可以促进 N_2O 转化为 N_2 ,从根本上减少了土壤 N_2O 排放. 此消彼长之下,生物炭的施用未能对土壤 N_2O 排放产生抑制作用. 土壤 CH_4 的排放是甲烷菌和甲烷氧化菌共同作用的结果. Neue 等^[30]的研究表明,土壤有机质是产生甲烷菌的重要底物,有机质含量的增加可显著促进 CH_4 的产生. 本研究中,添加生物炭虽然显著提升了土壤有机质含量,但土壤对 CH_4 的吸收量仍显著高于常规施肥处理. 究其原因,可能是生物炭拥有较大的比表面积和多孔的结构特征,施入土壤后,可降低土壤容重,改善土壤通透性,增强甲烷氧化菌活性,促进了 CH_4 的氧化,减少了甲烷菌产生的厌氧条件^[31]. 其次,生物炭本身性质、结构稳定,施入土壤后,甲烷菌不能迅速分解利用. 因此添加生物炭虽然提高了土壤有机质含量,但并未促进 CH_4 的产生,反而显著增强了土壤对 CH_4 的吸收作用,这与 Karhu 等^[32]的研究结果一致. Spokas 等^[33]在其研究中证实,施用生物炭可显著增加土壤 CO_2 排放,原因可能是生物炭的施入改善了土壤理化性质和生物学特征,土壤微生物活性得到增强,增加了土壤 CO_2 的排放. 本研究发现,添加生物炭可

显著降低土壤 CO_2 排放,一方面,生物炭施入土壤后,可促进土壤中腐殖质、酯类、碳水化合物等物质的形成^[34],这些物质不易被土壤微生物分解,降低了微生物对土壤有机碳的利用,导致其碳矿化速率下降,减少了 CO_2 排放^[35]. 另一方面,生物炭可吸附土壤中的有机物质,进入到生物炭孔隙中的有机物被储存起来,不易被微生物分解利用,抑制了土壤 CO_2 排放^[36].

膨润土除上述中土壤有机质提高促进氧化亚氮还原菌生长,减少 N_2O 排放外,其材料本身对氮素的固持作用也是一大原因. 蒙脱石是一种 2:1 型层状结构的硅酸盐矿物,层间离子可与 NH_4^+ 发生交换反应,在有水分介质条件下,土壤中游离的 NH_4^+ 更易被膨润土吸附^[12]. 此外,膨润土阳离子交换量处于 50~90 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,较正常土壤阳离子交换量高出 5~6 倍^[11]. 大量施入膨润土后,提高了土壤阳离子交换量,进一步增强了土壤对 NH_4^+ 的吸附作用^[37],从根本上减少了硝化作用的底物浓度,抑制了 N_2O 的排放. 同时,膨润土施入土壤后,还可增强土壤有机质的稳定性,促进氨基酸和酚类反应生成腐殖质,降低土壤微生物对有机物料的分解速率^[38],减少土壤 CO_2 排放.

聚丙烯酸钾是一种人工合成的高分子聚合物,其聚合物“骨架”带有如 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ 和 $-\text{NH}_2$ 等亲水性基团,有很强的保水性,可以吸附几十倍,甚至上百倍于自身质量的水量^[13]. 聚丙烯酸钾施入土壤后,亲水性高分子部分交联形成的网络结构,可让氮肥分子或离子如 NH_4^+ 、 NO_3^- 扩散进入. 进入网络结构内部的分子或离子可以被聚合物大分子包裹起来,也可通过交换吸附、电荷激活和螯合等方式固定下来,并在后期缓慢释放,起到了明显的缓释效果^[9]. 其次,聚丙烯酸钾的活性基团可以与土壤颗粒表面的离子互相作用,形成水稳性团粒结构,进一步增加了土壤对养分的固持作用^[9,39],减少了土壤氮素的损失. 再次,施入土壤中的聚丙烯酸钾是一种阴离子树脂,可以有效吸附土壤中 NH_4^+ 等阳离子,综合表现为抑制土壤 N_2O 的排放.

3.2 土壤改良剂对净生态系统经济预算的影响

净生态系统经济预算表示某种农业措施下,经济可行性与环境可持续性之间的关系,是政府制定农业决策的重要参考指标之一^[24]. 前人对农田温室气体减排的研究中,对于经济效益的研究还局限于产量收益与农业活动成本^[13,40],未把 GWP 成本考虑在内,只能反映当前种植模式下农田温室气体

减排的经济可行性,未能把经济效益与环境成本联系起来. 王国强等^[41]对稻田温室气体减排的研究中,其净生态系统经济预算中 GWP 仅包括 $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ 和 GWP_{CH_4} , CO_2 受人为施入不同材料的影响,处理间 CO_2 累计排放量已达到显著差异,该试验条件下, CO_2 不能再当做非人为活动温室气体排放源, GWP 未包括 GWP_{CO_2} , 这样的综合增温潜势是不全面、不客观的,所得出的净生态系统经济预算也高于实际. 本研究中, GWP 包括 $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 GWP_{CH_4} 和 GWP_{CO_2} , 净生态系统经济预算主要由产量收益和 GWP 成本决定, 农业活动成本在试验设计时已经固定, B、C 和 PAM 处理因为添加不同土壤改良材料, 其农业活动成本较 CK 分别高出 600、600 和 525 $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$. PAM 处理对 NEEB 无显著影响, 其 GWP 显著低于 CK, 究其原因, 主要是 PAM 处理对玉米产量无提升作用. 与 CK 相比, B 和 C 处理可显著增加净生态系统经济预算, 这一结果表明常规施肥基础上, 添加膨润土和生物炭是当前河套灌区玉米种植模式中提高经济、环境效益较为合适的农业措施.

本研究在全球增温大背景下, 研究了生物炭、膨润土和聚丙烯酸钾这 3 种改土材料对河套灌区玉米种植模式下温室气体排放、玉米产量、GWP 和 GHGI 的影响, 解析了不同改土材料下, 农业生产力与环境可持续之间的关系, 对改良农田土壤、提高土壤肥力、减少农业温室气体排放具有重要意义. 膨润土和聚丙烯酸钾对农田温室气体减排的研究资料较少, 对其施用量和施用方式的设定未能借鉴前人研究成果, 因此, 解析 3 种改土材料处理下施用量及施用方式对农田温室气体排放的影响及减排机制将是下一步研究的重点.

4 结论

(1) 河套灌区玉米田 N_2O 呈双峰型排放规律, 于追肥灌水后 5~7 d 出现 N_2O 排放峰值; 土壤对 CH_4 的排放和吸收过程相互交替, 总体表现为土壤对 CH_4 的碳汇作用; CO_2 呈单峰型排放规律, 于玉米拔节期出现 CO_2 排放峰值. 土壤温度的升高, 可显著促进土壤 N_2O 和 CO_2 的排放.

(2) 与常规施肥相比, 添加膨润土、聚丙烯酸钾可显著降低 N_2O 排放, 聚丙烯酸钾处理对 N_2O 的减排作用强于膨润土处理; 添加膨润土、生物炭可显著增加土壤对 CH_4 的吸收作用, 显著降低土壤 CO_2 排放, 其中, 生物炭处理对 CH_4 的吸收作用最为明显, 在 CO_2 减排方面以膨润土处理效果最佳. 总体

来说, 膨润土、生物炭和聚丙烯酸钾处理下 GWP 和 GHGI 均显著低于常规施肥, 其作用效果均为膨润土 > 生物炭 > 聚丙烯酸钾.

(3) 常规施肥基础上添加膨润土和生物炭可稳定提升玉米产量, 显著增加净生态系统经济预算, 在河套灌区玉米种植体系中, 是科学有效、经济可行的温室气体减排措施.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working group I contribution to the IPCC Fifth assessment Report (Ar5) [C]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2013.
- [2] Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH, *et al.* Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: summary of available measurement data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16** (4): 6-1-6-13.
- [3] Smith B P, Martino D, Cai Z, *et al.* Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363** (1492): 789-813.
- [4] Nan W G, Yue S C, Li S Q, *et al.* Characteristics of N_2O production and transport within soil profiles subjected to different nitrogen application rates in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 864-875.
- [5] Winiwarter W, Klimont Z. The role of N-gases (N_2O , NO_x , NH_3) in cost-effective strategies to reduce greenhouse gas emissions and air pollution in Europe [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011, **3** (5): 438-445.
- [6] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, *et al.* Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11** (6): 930-939.
- [7] 王文婷, 王云海. 膨润土改良土壤技术的研究进展 [J]. *环境科技*, 2011, **24** (1): 66-68, 72.
Wang W T, Wang Y H. Research progress on bentonite as soils modifier [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **24** (1): 66-68, 72.
- [8] 刘慧军, 刘景辉, 于健, 等. 土壤改良剂对燕麦土壤理化性状及微生物量碳的影响 [J]. *水土保持学报*, 2012, **26** (5): 68-72, 77.
Liu H J, Liu J H, Yu J, *et al.* Effects of soil amendment on soil physicochemical properties of oat and soil microbial biomass carbon [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26** (5): 68-72, 77.
- [9] 李亚东, 杨兰芳, 李海波, 等. 聚丙烯酸钠 (SP) 保水剂对不同基质氮、磷、钾、钠淋溶的影响 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32** (6): 1445-1453.
Li Y D, Yang L F, Li H B, *et al.* The effects of sodium polyacrylate (SP) on the leaking of N, P, K and Na in different substrates [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32** (6): 1445-1453.
- [10] 朱利中, 陈宝梁. 膨润土吸附材料在有机污染控制中的应用 [J]. *化学进展*, 2009, **21** (2-3): 420-429.
Zhu L Z, Chen B L. Use of bentonite-based sorbents in organic pollutant abatements [J]. *Progress in Chemistry*, 2009, **21** (2-3): 420-429.
- [11] Fattah M Y, Al-Lami A HS. Behavior and characteristics of compacted expansive unsaturated bentonite-sand mixture [J].

- Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, **8**(5): 629-639.
- [12] 刘海忠, 栾文楼. 膨润土固氮机理及膨润土碳铵对土壤养分的影响[J]. 河北农业科学, 2003, **7**(4): 21-24.
- Liu H S, Luan W L. Nitrogen fixation mechanism of bentonite and effect of bentonite adsorbed ammonium bicarbonate on soil nutrient[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2003, **7**(4): 21-24.
- [13] 杨彦明, 刘景辉, 李立军, 等. 聚丙烯酸钾对土壤孔隙及含水特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (4): 28-35.
- Yang Y M, Liu J H, Li L J, *et al.* Effect of potassium polyacrylate on soil porosity and moisture characteristics [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2015, (4): 28-35.
- [14] Li X J, Cui X H, Li Q S, *et al.* Improvement of sandy soil with water-conserving membrane and its effect on crop growth [J]. Chinese Geographical Science, 2005, **15**(1): 64-69.
- [15] 李云开, 许廷武, 周春发, 等. 金属离子对聚丙烯酸钾-丙烯酸酰胺共聚型 SAP 交替吸水吸盐特征的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, **26**(3): 39-42.
- Li Y K, Xu T W, Zhou C F, *et al.* Effect of metal ions on the characteristics of potassium-polyacrylate-polyacrylamide SAP under alternated water-absorbing and salinity-absorbing [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2010, **26**(3): 39-42.
- [16] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from central China Plain[J]. Plant and Soil, 2012, **351**(1-2): 263-275.
- [17] 刘玉学, 王耀锋, 吕蒙蒙, 等. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(8): 2166-2172.
- Liu Y X, Wang Y F, Lü H H, *et al.* Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(8): 2166-2172.
- [18] 王欣欣, 邹平, 符建荣, 等. 不同竹炭施用量对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1): 198-204.
- Wang X X, Zou P, Fu J R, *et al.* Effects of bamboo biochar amendments on methane and nitrous oxide emission from paddy soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(1): 198-204.
- [19] Subedi R, Taupe N, Pelissetti S, *et al.* Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: influence of pyrolysis temperature and feedstock type[J]. Journal of Environmental Management, 2016, **166**: 73-83.
- [20] 任中生, 屈忠义, 李哲, 等. 水氮互作对河套灌区膜下滴灌玉米产量与水氮利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(5): 149-155.
- Ren Z S, Qu Z Y, Li Z, *et al.* Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, Water use efficiency and nitrogen use efficiency of mulched drip-irrigated maize in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Soil and water Conservation, 2016, **30**(5): 149-155.
- [21] Lyamuremye F, Dick R P, Baham J. Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption[J]. Soil Science, 1996, **161**(7): 426-435.
- [22] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). Agriculture [A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G, *et al.*(Eds.). Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2013: 710-716.
- [23] Sainju U M, Stevens W B, Caesar-Tonthat T, *et al.* Net global warming potential and greenhouse gas intensity influenced by irrigation, tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization[J]. Journal of Environmental Quality, 2014, **43**(3): 777-788.
- [24] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, *et al.* Effects of tillage practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice-wheat cropping systems in central China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 636-644.
- [25] Li B, Fan C H, Zhang H, *et al.* Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **100**: 10-19.
- [26] Cayuela M L, van Zwieten L, Singh B P, *et al.* Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **191**: 5-16.
- [27] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(6): 1301-1310.
- [28] Dandie C E, Wertz S, Leclair C L, *et al.* Abundance, diversity and functional gene expression of denitrifier communities in adjacent riparian and agricultural zones[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2011, **77**(1): 69-82.
- [29] Dambreville C, Hallet S, Nguyen C, *et al.* Structure and activity of the denitrifying community in a maize-cropped field fertilized with composted pig manure or ammonium nitrate [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2006, **56**(1): 119-131.
- [30] Neue H U, Wassmann R, Lantin R S, *et al.* Factors affecting methane emission from rice fields [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(10-11): 1751-1754.
- [31] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, *et al.* Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **46**: 80-88.
- [32] Karhu K, Mattila T, Bergström I, *et al.* Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, **140**(1-2): 309-313.
- [33] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, *et al.* Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil[J]. Chemosphere, 2009, **77**(4): 574-581.
- [34] Cross A, Sohi S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(10): 2127-2134.
- [35] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**

- (12): 2345-2347.
- [36] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(2): 206-213.
- [37] Angar Y, Djelali N E, Kebbouche-Gana S. Investigation of ammonium adsorption on Algerian natural bentonite [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(12): 11078-11089.
- [38] Czaban J, Wróblewska B. The effect of bentonite on the survival of *Azotobacterchroococcum* in sandy soil in a long-term plot experiment[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, **26**(1): 1-8.
- [39] Liu X, Chan Z L. Application of potassium polyacrylate increases soil water status and improves growth of bermudagrass (*Cynodondactylon*) under drought stress condition[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, **197**: 705-711.
- [40] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- Wang Y L, Geng Z C, Wang Q, *et al.* Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- [41] 王国强, 常玉妍, 宋星星, 等. 稻草还田下添加 DCD 对稻田 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(12): 2431-2439.
- Wang G Q, Chang Y Y, Song X X, *et al.* Effects of DCD addition on CH₄, N₂O and CO₂ emissions from paddy field under rice straw incorporation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(12): 2431-2439.



CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i> (1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i> (27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i> (38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i> (49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i> (68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i> (109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i> (130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> (137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxysulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i> (152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i> (161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i> (170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i> (187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i> (195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i> (202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i> (212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (239)
Combined Process of DNB-F _{0.3} -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i> (247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i> (269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i> (276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i> (284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i> (292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i> (310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i> (321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i> (339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i> (355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i> (363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i> (379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i> (389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i> (399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i> (406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i> (422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i> (430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i> (438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i> (450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i> (460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i> (467)