

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N_2O 的排放特征及微生物特性

王楷¹, 史雷¹, 马龙¹, 王书婷¹, 张然¹, 郑伟^{1,2}, 李紫燕^{1,2}, 翟丙年^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 有机无机配施可为作物提供长效持续的营养物质来源, 研究旱地农田有机无机配施带来的环境效应和土壤酶活性及微生物特性, 对减少化肥面源污染, 改善生态环境有重要意义. 本试验以 3 个梯度氮水平 (N_0 、 N_1 、 N_2): 0、150、300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为主处理, 单施化肥和有机无机配施 (+M) 为副处理, 有机肥施用量为 30 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 测定了小麦生长季的温室气体 N_2O 排放通量和土壤酶活性, 硝态氮及铵态氮含量和土壤物理性质. 结果表明, 土壤 N_2O 排放通量最高的为 $\text{N}_2 + \text{M}$ 处理, 排放通量达到 0.190 4 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, $\text{N}_2 + \text{M}$ 处理较 N_0 累计排放量提高了 255%; N_2 和 $\text{N}_2 + \text{M}$ 处理 N_2O 的排放通量和增温潜势高于 N_1 和 $\text{N}_1 + \text{M}$ 处理, 而产量低于 N_1 和 $\text{N}_1 + \text{M}$ 处理; 微生物量碳氮以 $\text{N}_2 + \text{M}$ 处理分蘖期最多, 分别为 346.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 33.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $\text{N}_2 + \text{M}$ 处理的土壤酶活性较高, 其次是 N_2 处理, N_0 和 $\text{N}_0 + \text{M}$ 处理土壤酶活性较低; 通径分析表明, 铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、土壤磷酸酶 (AKP) 和微生物量氮 (MBN) 对 N_2O 排放通量的直接影响较大, 其他间接影响较小可不予以考虑. 研究旱地麦田有机无机配施的环境效益, 与多方面因素相关, 合理地配施有机肥可以平衡产量与土壤环境的综合效益.

关键词: 西北旱地; N_2O 排放通量; 有机无机配施; 土壤理化性质; 土壤酶活性

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-6038-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103224

Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N_2O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid

WANG Kai¹, SHI Lei¹, MA Long¹, WANG Shu-ting¹, ZHANG Ran¹, ZHENG Wei^{1,2}, LI Zi-yan^{1,2}, ZHAI Bing-nian^{1,2*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract: The combined application of organic and inorganic fertilizers can provide long-term and sustainable sources of nutrients for farmland. It is of great significance to study the environmental effects and soil enzyme activity microbial characteristics of farmland soil under this fertilization method for the development of dryland soil fertilization measures. In this experiment, three gradient nitrogen levels (N_0 , N_1 , and N_2 : 0, 150, and 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively) were used as the main treatment, and chemical fertilizer alone and the combined application of organic and inorganic fertilizer (+M) were used as the secondary treatment. The N_2O emission flux, soil enzyme activity, nitrate ammonium nitrogen content, and soil physical properties during the wheat growing season were measured. The results showed that the soil N_2O emission flux under the $\text{N}_2 + \text{M}$ treatment was 0.190 4 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, which was 255% higher than that of the N_0 treatment. The maximum microbial biomass C and N were 346.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 33.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, at the tillering stage when treated with $\text{N}_2 + \text{M}$. The soil enzyme activities under the $\text{N}_2 + \text{M}$ treatments were highest, followed by those under the N_2 treatments, and the soil enzyme activities under the N_0 and $\text{N}_0 + \text{M}$ treatments were lowest. Path analysis showed that the direct factors were ammonium nitrogen, AKP, and MBN, which had a greater contribution on N_2O emission flux; the effects from indirect factors were small and can be ignored. The emission flux and warming potential of N_2O in the N_2 and $\text{N}_2 + \text{M}$ treatments were higher than those in the N_1 and $\text{N}_1 + \text{M}$ treatments; however, the yield was lower than that in the N_1 and $\text{N}_1 + \text{M}$ treatments. The environmental benefits of organic and inorganic fertilizer application in dryland wheat fields are related to many factors. Rational application of organic fertilizer can balance the comprehensive benefits of yield and soil environment.

Key words: northwest dryland; N_2O emission flux; combination of organic and inorganic application; physical and chemical properties of soil; soil enzyme activity

小麦作为西北旱区主要粮食作物之一, 麦田种植面积占西北地区耕地总面积的 44%^[1], 在保障我国农业生产和粮食安全等方面发挥着重要作用. 同时, 广大的种植面积也造成了大面积过量施肥现象, 近几年国家统计局数据统计, 中国化肥用量已达 5 900 万 t 左右, 每 hm^2 用量是世界平均水平的 4 倍以上. 而肥料的供应超出了作物的需求将导致农业土壤 N_2O 排放进一步升高^[2]. 据估算全球生态系统排放的 N_2O , 38% 以上来自于人为活动^[3]. 每施用 1 000 kg 商业氮肥将导致大约 10 ~ 50 kg 氮以 N_2O 的形式从土壤损失^[4]. 农田 N_2O 的排放主要是由土壤

微生物反硝化和硝化作用驱动的, 并与矿质氮肥料的施用量密切相关. 旱地农田土壤是 N_2O 的源, 同时也是 CH_4 的汇^[5]. 如何减少土壤 N_2O 的排放还需进一步研究土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 氮肥过度施用会导致土壤剖面中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的积累. 施肥对温室气体排放的影响

收稿日期: 2021-03-26; 修订日期: 2021-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31772389); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200403); 国家科技支撑计划项目 (2015BAD23B04); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503124); 国家小麦现代产业技术体系建设专项 (Z225020803)

作者简介: 王楷 (1992 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为旱地施肥调控与环境, E-mail: kai_wang029@126.com

* 通信作者, E-mail: bingnianzhaitg@126.com

很大,而有机肥对农田土壤碳转化的影响最大^[6]. 土壤 C/N 对自养硝化产生 N_2O 的影响也较大,有机肥料可以改善土壤微生物环境,提高作物生产力,但也会导致稻田 GWP 的增加. 因而,在进行有机无机配施的农田管理时,应考虑到产量,土壤生态环境和温室气体排放之间的平衡关系^[7]. 有研究通过对陆地生态系统中碳循环的总结分析,认为农业土壤在降低温室气体升高和减缓温室效应方面具有很大潜力^[8]. 土壤温室气体的排放与土壤碳氮循环关系密切,生物有机肥能够改善根际土壤微生物群落的数量和结构,增加土壤微生物量,提高土壤微生物的多样性和土壤酶活性,对土壤碳氮循环和土壤微生物的活性和功能都有重要影响^[9,10]. 水解酶能够将大分子物质水解成易被植物吸收的小分子物质,对于土壤中的 C、N 循环具有重要意义^[11]. 蔗糖酶可以将土壤中高分子的糖分解为葡萄糖,为微生物的活动提供能量来源,促进碳循环. 土壤纤维素酶有助于腐殖质的形成和碳素养分的释放,纤维二糖酶和 β 葡萄糖苷酶是表征土壤碳循环的重要酶,参与土壤纤维素降解,乙酰氨基葡萄糖苷酶参与氮循环中几丁质和肽聚糖的降解,碱性磷酸酶可水解土壤磷循环中的重要底物磷酸多糖和磷酸酯^[12]. 不同的酶活性之间也存在一定的促进和抑制关系,微生物的代谢限制之间相互影响^[13]. 因为试验处理为有机无机配施,而有机肥中的有机碳和磷含量都较高,考虑到 N_2O 的排放与微生物量以及 C/N 密切相关,因此对碳循环相关酶和磷酸酶活性也进行了测定. 这些酶都在土壤碳氮磷循环中起重要作用,土壤酶活性的动态特征与温室气体排放之间的关系尚不清楚. 本试验通过对西北旱区温室气体排放、土壤酶活性、硝态氮及铵态氮和土壤物理性质的研究,探讨了有机无机配施所产生的环境效应,以及温室气体排放与土壤酶活性化学性质之间的相互关系,以期对西北旱地麦田土壤生态环境改良与农业温室气体减排提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验地点位于陕西省杨凌示范区西北农林科技大学农作一站(北纬 $34^{\circ}18'$,东经 $108^{\circ}05'$),海拔 525 m,年平均气温 $12.9^{\circ}C$,年均降雨量 650 mm 左右,且分布不均,60%左右集中在 7~9 月,年均蒸发量为 1 400 mm. 本试验始于 2014 年 10 月,已经持续定位近 5 年. 试验采用裂区设计,设 3 个氮水平为主处理(N0、N1 和 N2),施氮量分别为 0、150 和 300 $kg \cdot hm^{-2}$,设配施和不施有机肥 2 个副处理,共 6

个处理,重复 3 次,小区面积为 28 m^2 ,磷肥和钾肥施用量分别为 90 和 60 $kg \cdot hm^{-2}$. 有机肥为牛粪堆肥,施用量均为 30 $t \cdot hm^{-2}$, ω (有机质)、 ω (氮)、 ω (磷)和 ω (钾)分别为 187.6、17.6、15.4 和 16.9 $g \cdot kg^{-1}$. 氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾. 有机肥和磷、钾肥作为肥底,均在播前一次施入. 氮肥 70% 在播前撒施,30% 在拔节期结合降雨追施. 供试小麦品种为小偃 22,播种量为 150 $kg \cdot hm^{-2}$. 整个生育期雨养无灌溉,收获后田间休闲,田间管理与当地农户一致. 本研究自 2018 年 10 月至 2019 年 6 月进行,播前试验地土壤 ω (有机质)、 ω (全氮)、 ω (速效磷)和 ω (钾)分别为 13.9 $g \cdot kg^{-1}$ 、0.83 $g \cdot kg^{-1}$ 、9.17 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 155.7 $mg \cdot kg^{-1}$.

1.2 温室气体采集

温室气体采用静态箱集气法采集^[14],在冬小麦生育期内,施肥后采样时间间隔为 2 d 连续 2 次,越冬期 13~20 d,其他时期每隔 6~11 d 测定一次温室气体,采气时间集中在 9:00~11:30 之间. 采气箱由不锈钢铁皮制成,尺寸为 50 cm $\times$ 50 cm $\times$ 50 cm,箱外覆盖隔热泡棉,防止箱内温度过高. 本试验设置 6 个处理,每个处理 3 次田间重复,共设 18 个采气箱. 采气箱布置在每个小区中间,每套箱体都带有一个底座框和一个加高的无顶盖箱体,底座框在播种后安置,确保采气时框内小麦和土壤环境与外界一致,采气时箱体罩住小麦,气体采集后立即装入集气袋内带回,用气相色谱仪 AG7980B 进行分析,气体排放通量和累计排放量计算方式如下:

$$F = H \times \frac{M \times p}{R \times (273 + T)} \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为温室气体排放通量 [$mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]; H 为静态箱的高度 (m); M 为气体分子的摩尔质量 ($g \cdot mol^{-1}$); p 表示标准大气压 (1.013×10^5 Pa); R 是普适气体常数 [$8.314 J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$]; T 表示采样时静态箱中的平均温度 ($^{\circ}C$); dc/dt 表示气体的排放速率 [$mL \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$].

$$f_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(F_i + F_{i-1})}{2} \times d \times 24 \times 10^{-2} \right] \quad (2)$$

式中, f_i 为第 i 次与第 $i-1$ 次时间间隔内气体累积排放量 ($mg \cdot m^{-2}$); F_i 为第 i 次所测气体排放通量; F_{i-1} 为第 $i-1$ 次所测气体排放通量; d 为相邻两次采集气体相隔天数; n 为同一生育期气体测定总次数.

气体收集同时,记录日平均气温,0~10 cm 土层土壤温度,以及集气箱内的温度,如图 1 所示,其中,箱温高于土温和气温.

1.3 土壤样品测定及数据分析

试验采用改进的荧光微孔板检测技术^[15]测定

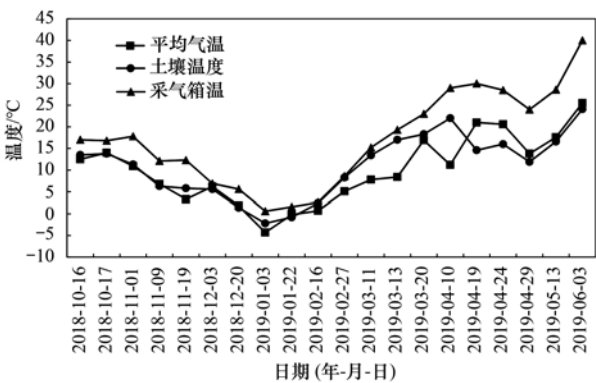


图1 小麦生长季平均气温、耕层土壤温度和采气箱内温度
Fig. 1 Average temperature, soil temperature, and box temperature during wheat growing season

表1 土壤酶活性信息

Table 1 Soil enzyme activity information

酶种类	名称	Abbr	酶学编码	底物 ¹⁾
碳转化酶	纤维二糖水解酶 (Cellobiohydrolase)	CBH	3. 2. 1. 91	4-MUB-cellobioside
	β -1,4-葡萄糖苷酶 (β -1,4-glucosidase)	β G	3. 2. 1. 21	4-MUB- β -D-glucoside
氮转化酶	β -1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶 (β -1,4-N-acetylglucosaminidase)	NAG	3. 6. 1. 1	4-MUB-N-acetyl- β -D-glucosaminidase
磷转化酶	碱性磷酸酶 (Alkaline phosphatases)	AP	3. 1. 3. 2	4-MUB-phosphate

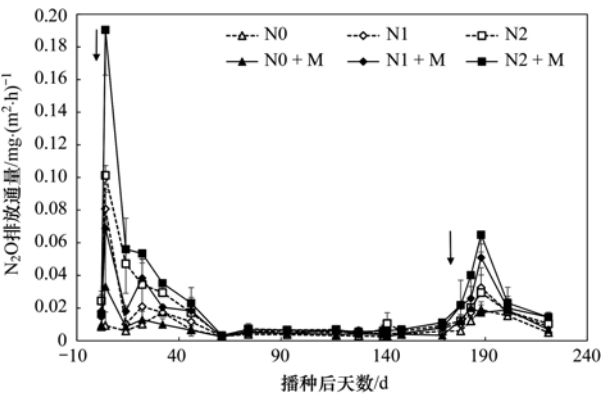
1) 4-MUB 表示 4-甲基伞形酮

(NH_4^+ -N) 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提 (土水比为 1:10, 振荡 1 h), 过滤后用连续流动分析仪 (AA3) 测定; 微生物量碳氮 (MBC, MBN) 采用氯仿熏蒸 K_2SO_4 提取法. 用 Excel 2019 进行数据整理、作图; SPSS 22.5 和 DPS 9.5 进行数据分析, 通过单因素方差分析比较各处理间的差异性, 用 SPSS 22.5 对酶活性、微生物量碳氮和土壤化学性质对 N_2O 排放通量的影响进行途径分析.

2 结果与分析

2.1 N_2O 排放通量动态变化

从土壤 N_2O 排放通量动态变化可知 (图 2), N_2O

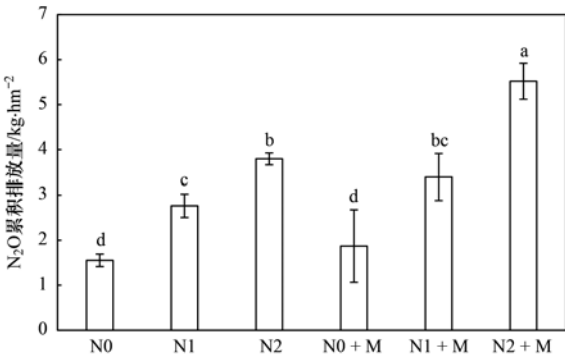


黑色的箭头表示肥料施入, 下同
图2 小麦生育期内 N_2O 排放通量变化动态
Fig. 2 Dynamic variation in N_2O emission flux during wheat growth period

了 β -1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶 (NAG)、 β -1,4-葡萄糖苷酶 (β G)、纤维二糖水解酶 (CBH) 和碱性磷酸酶 (AKP) 这 4 种酶活性. 具体方法为: 土壤样品 4 次重复, 标准和阴性 3 次重复, 空白和淬灭 3 次重复. 该方法是在低底物浓度条件下, 通过检测酶裂解释放荧光基团 (4-甲基伞形酮酰) 所发出的荧光强度进行测定微生物胞外酶活性, 较传统培养比色法更加快速和灵敏^[16]. 4 种酶活性的信息如表 1.

本试验还测定了小麦生长 4 个关键生育期的土壤硝态氮及铵态氮含量和微生物量碳氮, 以便更准确地分析有机无机配施以及不同环境条件下的土壤微生物特性的改变. 土壤硝态氮 (NO_3^- -N) 和铵态氮

的排放通量的峰值出现在施肥后, 为 $\text{N}_2 + \text{M}$ 处理, 排放通量达到 $0.1904 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 在追肥时也出现了排放峰, 但较基肥施用后的峰值要低很多, 也是出现在 $\text{N}_2 + \text{M}$ 处理, 排放通量为 $0.0649 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 约为第一次峰值的 1/3, 由此可见, 氮肥的施用会直接影响 N_2O 的排放. 而第二次峰值出现的时期除了 N 肥的投入外, 雨热条件也对 N_2O 的排放产生了一定影响. 两次排放峰值之间, 小麦处于冬季休眠期, 土壤微生物活性由于低温的影响而非常缓慢. 从土壤 N_2O 累积排放量可以看出 (图 3), 添加有机肥料的处理 N_2O 的排放总量整体要高于单施化肥的处理. 单施化肥的处理 N_1 和 N_2 的 N_2O 累积排放量分别比 N_0 提高了 78% 和 144%, 而有机无机配施的处理 $\text{N}_1 + \text{M}$ 和 $\text{N}_2 + \text{M}$ 的 N_2O 累积排放量



图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)
图3 生育期 N_2O 累积排放量
Fig. 3 Cumulative N_2O emission during growth period

分别比 N0 + M 提高了 82% 和 195%; 可知不同施氮水平下, 施氮量高的处理 N₂O 排放量更高; 有机添加的情况下, 3 个施氮水平的 N₂O 累积排放量都有所增加, 但是, 只有 N2 + M 处理累积排放量显著高于 N2 处理(提高了 255%), 而 N1 + M 和 N0 + M 处理与 N1 和 N0 处理之间差异并不显著。

2.2 温室气体增温潜势和排放强度

通过计算各个处理的产量, 从全球变暖潜势值

(global warming potential, GWP) 和温室气体排放强度(greenhouse gas emission intensity, GHGI) 可以看出(表 2), 配施有机肥的处理产量有所提高, 但 N2 和 N2 + M 处理 N₂O 的排放通量高于 N1 和 N1 + M 处理, 而产量低于 N1 和 N1 + M 处理; 温室气体的增温潜势也显著增加, 从排放强度来看, 在保证产量的情况下, N1 和 N1 + M 施氮处理下旱地麦田的环境效益和经济效益最为合理。

表 2 不同施氮处理的产量、温室气体增温潜势和排放强度¹⁾

Table 2 Yield, GHG warming potential, and emission intensity of different nitrogen application treatments				
处理	产量/kg·hm ⁻²	N ₂ O	GWP	GHGI
N0	2 604 (565c)	1.55 (0.14d)	66.71	0.026
N1	5 588 (333ab)	2.76 (0.26c)	418.16	0.075
N2	5 574 (225ab)	3.80 (0.13b)	693.70	0.124
N0 + M	4 635 (220b)	1.87 (0.81d)	223.54	0.048
N1 + M	6 311 (260a)	3.40 (0.52bc)	649.64	0.103
N2 + M	6 116 (263a)	5.52 (0.40a)	1 186.15	0.194

1) 括号内数字表示标准差, 同一列标注不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); GWP 表示以 100 a 为时间尺度, CH₄ 和 N₂O 的增温潜势; GHGI 是 GWP 与作物产量的比值, 表示温室气体排放强度

2.3 土壤硝态氮和铵态氮

如图 4, 对小麦整个生育期的硝态氮和铵态氮进行测定, 测定频率与气体采集频率一致. 土壤 ω (铵态氮) 变化范围是 0.13 ~ 6.5 mg·kg⁻¹, 在小麦生育前期含量较高, 后期并无显著波动. 整体看来, N2 + M 和 N2 处理的 ω (铵态氮) 最高, N0 处理铵态氮处于较低水平(变化范围在 0.16 ~ 1.67 mg·kg⁻¹), 远低于其他施肥处理. 可以很明显地看出, 整个生育期土壤 ω (硝态氮) 都是以 N2 + M 处理最高, 最大值为 265.56 mg·kg⁻¹, 其次是 N2 处理(188.75 mg·kg⁻¹), N0 和 N0 + M 处理都处于较低水平, 变化范围分别为 2.06 ~ 17.05 mg·kg⁻¹ 和 1.59 ~ 37.75 mg·kg⁻¹. 不同施肥处理土壤 ω (硝态氮) 随着施氮量的增加而增加, 呈现出的梯度较为明显, 大小为: N0 < N0 + M < N1 < N1 + M < N2 < N2 + M. 对于 ω (硝态氮) 的峰值, N2 和 N2 + M 处理分别较 N0 和 N0 + M 处理增加了 2 150% 和 2 525%, 而 N1 和 N1 + M 处理分别较 N0 和 N0 + M 处理增加了 420% 和 314%, 可知施氮水平的提高会带来土壤硝态氮大幅度地增加。

2.4 土壤微生物量碳氮

从图 5 中可以看出, 土壤微生物量碳含量(MBC) 随着施氮量的增加明显提高. 从不同生育时期可以看出, MBC 以 N2 + M 处理分蘖期最多(346.31 mg·kg⁻¹), 因为这一时期基肥的肥效正在发挥, 在成熟期含量显著减少, 且施用有机肥的处理微生物量碳的平均减幅为 39%, 而单施化肥处理 MBC 的平均减幅为 10%, 这说明有机肥料的添加对

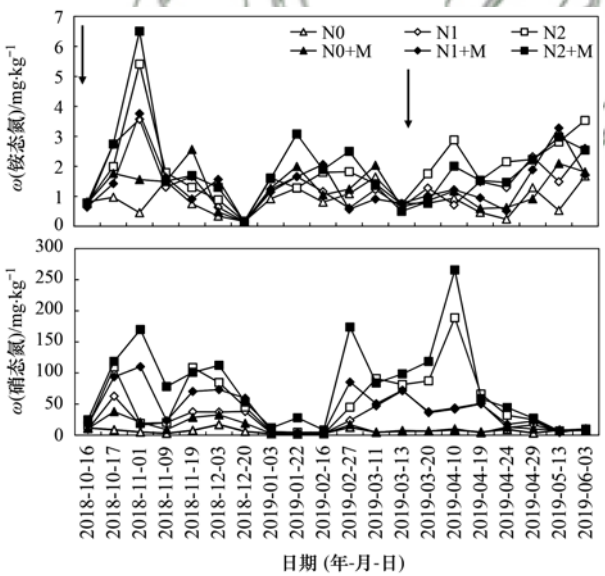
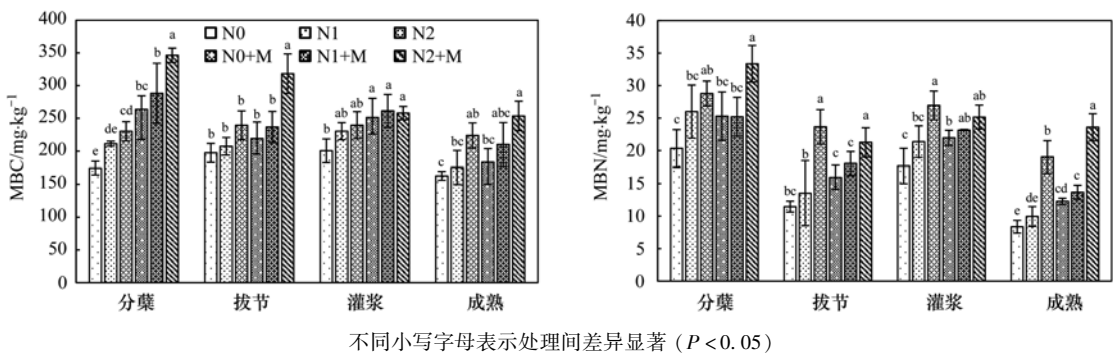


图 4 小麦生育期土壤 ω (硝态氮) 和 ω (铵态氮) 变化
Fig. 4 Changes in $\omega(\text{NO}_3^- - \text{N})$ and $\omega(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ in soil during wheat growth period

土壤微生物活性的提高有显著效果. 对于不同施氮水平, 配施有机肥的处理 MBC 较单施化肥处理提高了 11% ~ 51%. 土壤微生物量氮含量(MBN) 随着施氮量的增加也呈现增加趋势. 从不同生育时期可以看出 MBN 也是以 N2 + M 处理分蘖期最多(33.36 mg·kg⁻¹), 在成熟期含量显著减少, 单施化肥处理的 MBN 平均减幅为 119%, 而施用有机肥的处理 MBN 的平均减幅为 77%, 这与 MBC 变化并不相同, 说明有机肥料的添加并不一定会提高土壤 MBN. 从整个生育期来看, 不同施氮水平上配施有机肥的处理 MBN 较单施化肥处理提高了 7% ~ 47%.



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 不同处理各生育期土壤微生物量碳氮的变化

Fig. 5 Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen in different growth stages under different treatments

2.5 土壤酶活性

从图 6 中可以看出,不同处理之间,N2 + M 处理的土壤酶活性较高,其次是 N2 处理,N0 和 N0 + M 处理土壤酶活性较低.可见,氮肥施用量越高酶活性越高.分蘖期土壤磷酸酶 (AKP) 活性以 N2 + M 处理最高 [$240.01 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$],灌浆期 N1 + M 处理最低 [$84.94 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$],而在成熟期磷酸酶活性有小幅度的提高,这可能是因为成熟期温度较高,雨热条件等环境因素引起的. β -1,4-葡萄糖苷酶 (βG)、 β -1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶 (NAG)

和纤维二糖水解酶 (CBH) 的活性范围分别在 $6.19 \sim 22.79$ 、 $62.04 \sim 194.50$ 和 $11.43 \sim 63.60 \text{ nmol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,这 3 种酶都是在分蘖期活性最高,随着生育期逐渐下降,而后趋于不变.这很大原因是由于基肥的投入使土壤中积累了大量的有机碳氮和养分,为土壤酶的生物化学反应提供了充足的反应底物,且小麦生长初期根系不发达,没有将土壤养分充分吸收;从图 5 可以看出生长后期土壤中的微生物量碳氮减少,逐渐被作物吸收利用,相关的土壤酶活性由于底物的缺少活性降低.

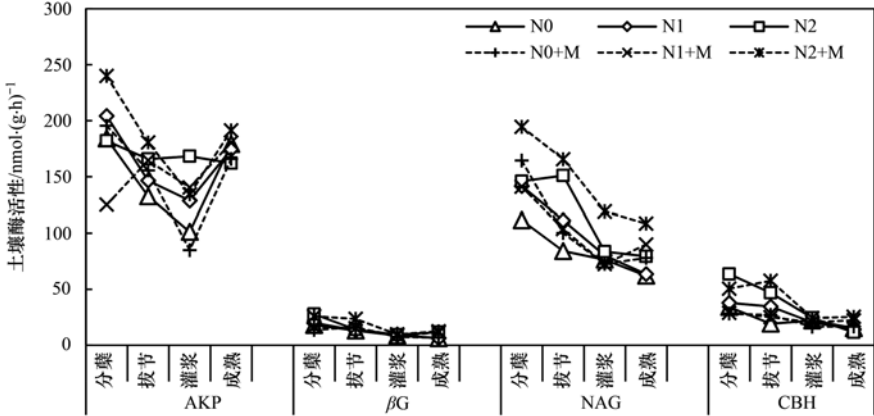


图 6 不同处理各生育期土壤酶活性的变化

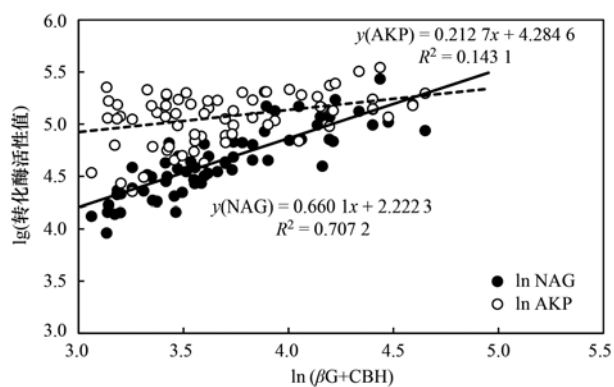
Fig. 6 Changes in soil enzyme activities in different growth stages under different treatments

不同的酶活性之间也存在一定的促进和抑制关系,因此,通过取自然对数将酶活性的数值转化,以便用科学计数法更精准地表示不同酶活性之间的关系.如图 7,酶计量学比可以看出碳转化酶与氮磷转化酶活性都有一定的正相关关系,这说明微生物的代谢限制之间相互影响.从拟合曲线可以看出,碳转化酶活性与氮转化酶活性的正相关程度高于碳转化酶活性与磷转化酶活性的正相关程度,这说明有机肥增加了土壤有机碳含量,碳氮磷循环酶活性也有所增加,从图 6 中酶活性的结果也可以看出,有机添加的处理和高氮水平处理酶活性较高.

2.6 N_2O 排放通量与土壤酶活性和化学性质的通径分析

为了深入研究旱地土壤 N_2O 排放通量与土壤酶活性、微生物量碳氮和硝态氮及铵态氮之间的相互作用,对测定结果进行通径分析.在分析前,先用 SPSS 对因变量 N_2O 排放通量进行正态检验,然后进行逐步回归分析.根据线性回归结果,回归方程引入了铵态氮、AKP 和 MBN 这 3 个自变量,回归方程的相关系数 R 和决定系数 R^2 在逐渐增大,即引入的自变量对 N_2O 排放通量的作用在增加.表 3 是引入自变量的回归系数.

由通径系数可以看出自变量 x_1 、 x_2 和 x_3 对因



纵坐标表示氮和磷转化酶活性值的自然对数
图 7 碳转化酶与氮和磷转化酶活性的关系

Fig. 7 Correlation between carbon invertase and activities of nitrogen and phosphorus invertase

表 3 回归系数

Table 3 Regression coefficients				
自变量	模型	非标准化系数	标准系数	显著性
	常量	153.214		0.015
x_1	铵态氮	-75.746	-0.646	0
x_2	AKP	0.953	0.402	0.008
x_3	MBN	-49.702	-0.395	0.008

变量 y 的直接作用分别是：-0.646、0.402 和 -0.395；偏回归系数的显著性均小于 0.05,说明自变量与因变量之间差异显著. Pearson 分析相关系数

表 5 自变量的间接作用和直接作用

Table 5 Indirect and direct effects of independent variables						
自变量	简单相关系数	通径系数 (直接作用)	间接通径系数(间接作用)			
			x_1	x_2	x_3	合计
x_1	-0.589	-0.646	—	0.050 3	0.006 7	0.057
x_2	0.290	0.402	-0.080 8	—	-0.030 8	-0.112
x_3	-0.353	-0.395	-0.011 0	0.031 4	—	0.042

3 讨论

3.1 有机无机配施对旱地土壤N₂O排放的影响

有研究表明,高施氮量会增加N₂O的损失,但不会带来增产效果^[17]. 本试验结果也类似,在高施氮量下N₂O排放增加,而产量减少. 土壤中的温室气体可能受到温度、土壤呼吸作用、硝化和反硝化作用,土壤呼吸、土壤氮、土壤有机碳等因素的影响^[18,19]. 从本试验结果可知,氮肥施入后,会出现N₂O的排放峰,这与氮源的添加有关,有研究发现,添加尿素后,氨氧化细菌立即开始生长^[20,21]. 氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)可以将氨气氧化,并产生N₂O^[22]. 土壤反硝化过程中的NO₂⁻,可以在特定条件下累积,也有较大的N₂O排放潜力^[23]. 而追肥后,N₂O的峰值出现得较晚,原因可能是追肥时没有对土壤进行耕作,土壤通气透水性没有基肥施入时好,

表中,N₂O与铵态氮有显著相关性,与 AKP 和 MBN 的 Pearson 相关系数分别为 0.29 和 -0.353,无显著相关性,但对N₂O的相关性较硝态氮、βG、NAG、CBH 和 MBC 等其他自变量要高,因此,引入了回归方程进行分析. 用 Pearson 相关系数和通径系数算出自变量的间接通径系数,如表 4 和表 5,铵态氮、AKP 和 MBN 对N₂O排放通量的直接影响中,AKP 对N₂O排放有直接作用,铵态氮的直接负作用最大,MBN 次之. 分析间接通径系数发现,铵态氮通过 AKP 和 MBN 对N₂O排放有间接的正作用(0.057),但相比铵态氮对N₂O排放的负作用(-0.646)较小;AKP 通过铵态氮和 MBN 对N₂O排放的间接的作用(-0.112)以及 MBN 通过铵态氮和 MBN 对N₂O排放的间接作用(0.042)都较小,可以不予以考虑. 综上可知,铵态氮、AKP 和 MBN 对N₂O排放通量的直接影响较大.

表 4 Pearson 分析相关系数¹⁾

Table 4 Pearson analysis of correlation coefficients				
	N ₂ O	铵态氮	AKP	MBN
N ₂ O	1			
x_1	-0.589 *	1		
x_2	0.29	0.125	1	
x_3	-0.353	-0.017	0.078	1

1) * 表示 $P < 0.05$

导致尿素水解和硝化反硝化速率较慢. 从生长季排放通量动态变化和累计排放量可知,施氮量的增加会增加N₂O的排放,很多研究都有类似结果^[17,24],有机肥为土壤提供了高氨氮底物条件,更有利于 AOA 和 AOB 氧化土壤中的铵态氮^[25]. 然而,也有研究认为,有机肥作为一种缓效肥料会降低N₂O的排放^[26]. 有机无机合理的配施比例可以提高氮素利用率,从而减少土壤中氮营养以N₂O气态形式的损失.

同时,有机肥在改良土壤物理结构方面有较好的效果,de Oliveira 等^[19]的研究表明,土壤密度、渗透阻力和孔隙结构等对土壤温室气体排放有重要影响,在评价农业土壤温室气体排放变化时,还应考虑土壤的物理属性. 因此,本试验测定了土壤物理性质方面的指标,表 6 表明有机无机配施处理土壤容重降低了 4.09%,饱和导水率降低了 26.11%;而田间持水量、土壤孔隙度、含水量和土壤孔隙含水量分别

增加了 11.46%、3.64%、12.26% 和 9.35%；因此可知,有机肥的添加可以改善土壤通气透水性,有一定的保墒效果.由于有机肥中的有机质含量较高,腐殖化后的腐殖酸会较好地改善土壤团粒结构,提高

保墒蓄水能力.有研究结果表明^[27],施用生物有机肥后,土壤理化性质得到改善,容重降低 12.5%,毛管孔隙度增加 9.8%.说明有机肥可以改善土壤结构,提高土壤蓄水能力.

表 6 各处理土壤物理性质

Table 6 Physical properties of each treatment

处理	容重 /g·cm ⁻³	田间持水量 /%	总孔隙度 /%	饱和导水率 /mm·min ⁻¹	含水量 /%	土壤孔隙含水量 /%
N0	1.33	35.24	49.94	1.09	7.82	15.7
N1	1.34	37.98	49.56	0.22	7.71	15.6
N2	1.28	38.98	51.78	0.15	9.64	18.6
N0 + M	1.32	39.18	50.32	0.53	9.86	19.6
N1 + M	1.27	42.95	52.09	0.21	10.57	20.3
N2 + M	1.20	44.59	54.59	0.43	8.26	15.1

N₂O排放与土壤氮循环和土壤微生物的关系密不可分,农田土壤中的 NH₄⁺ 在硝化微生物的作用下经过硝化作用转变为 NO₃⁻,对植物生长及环境有重要影响,当碳氮比较高时,异养细菌生长更快且会与硝化细菌竞争有效氮^[28,29].因此会导致硝态氮的积累,间接导致N₂O排放量的增加.本试验结果,在有机无机配施条件下,土壤硝态氮和铵态氮含量均高于单施化肥处理,且随着施氮水平的提高而增加.不同肥料的添加会改变土壤硝态氮和铵态氮含量,影响硝化反硝化作用的强度,硝化作用的强弱影响着铵态氮和硝态氮的浓度、土壤微生物氮源以及温室气体N₂O的排放,而有机肥可以提高土壤剖面硝酸盐含量,尤其是表层土壤^[30].

3.2 有机无机配施下的旱地土壤微生物特性及其与N₂O排放的关系

有机肥也为土壤微生物带来了更多可利用的碳源和氮源,促进了微生物活性.显著增加了 βG、NAG 和 AKP 的活性.有机肥能够增加土壤微生物量,改善根际土壤微生物群落,提高土壤微生物的多样性和土壤酶活性^[31].但土壤酶的作用机制复杂,酶和底物之间并不是总存在相关性,会随着有机质的含量组分的改变而波动^[15].酶活性之间也会相互影响.NAG(乙酰氨基葡萄糖苷酶)参与几丁质转化氨基糖的过程,氨基糖是土壤可矿化氮的主要来源,因此 NAG 活性的高低控制着 N 循环速率^[32].CBH 酶活性的增加可能导致土壤中某些多糖的浓度降低.影响某些微生物活性,进而影响到其他酶活性^[33].实际上,微生物会分泌许多不同的酶,因为死亡的有机物,特别是植物组织具有复杂的生物化学性质,但只有少数几种酶能解释大部分可测量的活性,因为它们以环境中最丰富的底物为目标^[12].氨基酸和氨基糖的降解需要几种酶作用,但是在生态学研究中只研究终端分解产生微生物同化物含量最

多的酶^[34],微生物获取氮源的最主要酶是 LAP 和 NAG.土壤背景值氮含量较低时,外源氮的施入会增加土壤酶活性,反之,当本底氮含量较高时,外源添加氮会造成土壤 pH 降低,抑制酶活性^[35].在黄土丘陵区的研究表明土壤碳氮比与 βG、AKP、NAG 没有显著相关性,而在温带草原的研究则表明影响土壤酶化学计量的主要因素是土壤养分及其计量^[36].

李西祥等^[37]的研究发现,土壤磷酸酶活性与 N₂O排放量负相关,但相关性并不显著.虽然本试验N₂O排放与碱性磷酸酶的相关性高于其他酶,但相关性也不显著.因为有机添加的处理土壤N₂O排放量增加,而有机肥中磷的含量较高(15.4 g·kg⁻¹),势必会为磷酸酶提供大量的反应底物,促进了磷酸酶的活性,因此表现出一定的正相关关系.Zhang^[38]的研究表明,氮肥添加显著提高了土壤酸性磷酸酶(AP)和 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)活性,分别提高了 32% 和 26%.试验中铵态氮与N₂O表现出负相关性,黄土性土壤上表层土壤 N₂O 的主要来源为土壤的硝化过程^[39],N₂O排放峰值时,土壤中的铵态氮水解为微生物硝化过程提供底物 NO₃⁻,这一过程之后造成土壤中硝态氮的累积,铵态氮的减少;Malhi 等^[40]的研究还发现 NH₄⁺-N 的浓度过高会抑制硝化反应的进行.本研究因在田间进行,温度水分等条件无法控制,可能会造成硝化作用的时间延长,还有作物根系的分泌物也会影响N₂O的排放.土壤微生物生物量是土壤的重要指标,通常以微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)来衡量土壤微生物特性,从图 5 可以看出,MBN 含量在各个生育期都是随着施氮水平的提高而增加,而N₂O排放通量除了分蘖期有明显的随施氮量增加的规律外,其他生育期并无显著差异,这导致了 MBN 与N₂O排放呈现负相关,有研究结果

表明^[41], 土壤有机碳和氮矿化受土壤微生物生物量化学计量特征的负调控. 因此, 有必要从环境角度细化有机投入后温室气体的变化, 以及土壤性质和微生物特性等因素的影响.

4 结论

(1) 有机无机配施下, 旱地麦田的 N_2O 排放通量和累计排放量都高于单施化肥的处理, 但只有在 N_2 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 水平下差异显著; N_2O 排放通量随着施氮量的增加而增加, 温室气体的增温潜势和排放强度也随之增加, 而在较高氮水平下产量却有一定程度的降低. 说明不管是从经济效益还是环境影响来看, 有机肥和化肥的施用量都并非越高越好, 应控制在一定范围内.

(2) 有机无机配施处理土壤容重降低, 土壤含水量、田间持水量和土壤孔隙度增加, N_0 处理的土壤饱和渗透压最高, 可见, 施用生物有机肥后, 土壤理化性质得到改善, 养分供应能力也有所提高. 土壤酶活性、硝态氮及铵态氮含量和土壤微生物量碳氮都随着施氮水平的增加而增加.

(3) N_2O 排放通量与土壤酶活性和化学性质的通径分析表明, 铵态氮、AKP 和 MBN 对 N_2O 排放通量的直接影响较大, 其他间接影响较小可不予以考虑. 因此, 对旱地麦田 N_2O 排放的研究应该着重考虑这些因子.

参考文献:

- [1] Jin K, Cornelis W M, Schiettecatte W, *et al.* Effects of different management practices on the soil-water balance and crop yield for improved dryland farming in the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **96**(1-2): 131-144.
- [2] Oenema O, Wrage N, Velthof G L, *et al.* Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, **72**(1): 51-65.
- [3] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report [A]. In: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [4] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N_2O) emissions to fertilizer nitrogen[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(25): 9199-9204.
- [5] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. New York: Cambridge University Press, 2013. 507-509.
- [6] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: methodology for full carbon cycle analyses[J]. *Environmental Pollution*, 2002, **116**(3): 439-444.
- [7] Das S, Adhya T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice[J]. *Geoderma*, 2014, **213**: 185-192.
- [8] 曲建升, 孙成权, 张志强, 等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. *地球科学进展*, 2003, **18**(6): 980-987.
- [9] Qu J S, Sun C Q, Zhang Z Q, *et al.* Trends and advances of the global change studies on carbon cycle[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, **18**(6): 980-987.
- [10] Luo Y, Zhu Z K, Liu S L, *et al.* Nitrogen fertilization increases rice rhizodeposition and its stabilization in soil aggregates and the humus fraction[J]. *Plant and Soil*, 2019, **445**(1-2): 125-135.
- [11] Xu Y D, Ding F, Gao X D, *et al.* Mineralization of plant residues and native soil carbon as affected by soil fertility and residue type[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(3): 1407-1415.
- [12] 邵文山, 李国旗. 土壤酶功能及测定方法研究进展[J]. *北方园艺*, 2016, **40**(9): 188-193.
- [13] Shao W S, Li G Q. Research progress of soil enzymes function and its determination method[J]. *Northern Horticulture*, 2016, **40**(9): 188-193.
- [14] Sinsabaugh R L, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, **43**: 313-343.
- [15] Grandy A S, Sinsabaugh R L, Neff J C, *et al.* Nitrogen deposition effects on soil organic matter chemistry are linked to variation in enzymes, ecosystems and size fractions[J]. *Biogeochemistry*, 2008, **91**(1): 37-49.
- [16] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH_4 、 N_2O 气体排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3655-3661.
- [17] Wang X Y, Zhang R Z, Cai L Q, *et al.* Emission characteristics of CH_4 and N_2O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3655-3661.
- [18] Grandy A S, Neff J C, Weintraub M N. Carbon structure and enzyme activities in alpine and forest ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(11): 2701-2711.
- [19] Ai C, Liang G Q, Sun J W, *et al.* Responses of extracellular enzyme activities and microbial community in both the rhizosphere and bulk soil to long-term fertilization practices in a fluvo-aquic soil[J]. *Geoderma*, 2012, **173-174**: 330-338.
- [20] Xie B H, Gu J X, Yu J B, *et al.* Effects of N fertilizer application on soil N_2O emissions and CH_4 uptake: a two-year study in an apple orchard in eastern China[J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(10), doi: 10.3390/atmos8100181.
- [21] Duan P P, Zhou J, Feng L, *et al.* Pathways and controls of N_2O production in greenhouse vegetable production soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(3): 285-297.
- [22] de Oliveira Silva B, Moitinho M R, de Araújo Santos G A, *et al.* Soil CO_2 emission and short-term soil pore class distribution after tillage operations[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, **186**: 224-232.
- [23] Dong D, Kou Y P, Yang W C, *et al.* Effects of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions and nitrifying/denitrifying microbial communities in a rainfed maize soil: a 6-year field observation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, **180**: 82-90.
- [24] Kou Y P, Wei K, Chen G X, *et al.* Effects of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate and dicyandiamide on nitrous oxide emission in a greenhouse vegetable soil[J]. *Plant Soil and Environment*, 2015, **61**(1): 29-35.
- [25] Xiao R, Chen B Z, Liu Y J, *et al.* Higher abundance of ammonia oxidizing archaea than ammonia oxidizing bacteria and their communities in Tibetan alpine meadow soils under long-term nitrogen fertilization[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2014, **31**

- (7): 597-604.
- [23] Giguere A T, Taylor A E, Suwa Y, *et al.* Uncoupling of ammonia oxidation from nitrite oxidation: impact upon nitrous oxide production in non-cropped Oregon soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **104**:30-38.
- [24] Chi Y B, Yang P L, Ren S M, *et al.* Finding the optimal fertilizer type and rate to balance yield and soil GHG emissions under reclaimed water irrigation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138954.
- [25] Di H J, Cameron K C, Shen J P, *et al.* Nitrification driven by bacteria and not archaea in nitrogen-rich grassland soils [J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 621-624.
- [26] 贾俊香, 熊正琴, 马智勇, 等. 生物炭与有机肥配施对菜地温室气体强度的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, **26**(1): 74-80.
- Jia J X, Xiong Z Q, Ma Z Y, *et al.* Effect of biochar and manure combined application on greenhouse gas intensity from vegetable ecosystems [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, **26**(1): 74-80.
- [27] 路克国, 朱树华, 张连忠. 有机肥对土壤理化性质和红富士苹果果实品质的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2003, **7**(3): 205-208.
- Lu K G, Zhu S H, Zhang L Z. The effect of bio-fertilizer on soil property and fruit quality of red Fuji apple [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2003, **7**(3): 205-208.
- [28] Das S, Ghosh A, Adhya T K. Nitrous oxide and methane emission from a flooded rice field as influenced by separate and combined application of herbicides bensulfuron methyl and pretilachlor [J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(1): 54-62.
- [29] Kindaichi T, Ito T, Okabe S. Ecophysiological interaction between nitrifying bacteria and heterotrophic bacteria in autotrophic nitrifying biofilms as determined by microautoradiography-fluorescence in situ hybridization [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(3): 1641-1650.
- [30] Li S Y, Li J J, Zhang B X, *et al.* Effect of different organic fertilizers application on growth and environmental risk of nitrate under a vegetable field [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-17219-y.
- [31] 侯会静, 韩正砥, 杨雅琴, 等. 生物有机肥的应用及其农田环境效应研究进展[J]. *中国农学通报*, 2019, **35**(14): 82-88.
- Hou H J, Han Z D, Yang Y Q, *et al.* Bio-organic fertilizer: application and farmland environmental effects [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, **35**(14): 82-88.
- [32] 张威, 张明, 白震, 等. 土壤中几丁质酶的研究进展[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(3): 569-575.
- Zhang W, Zhang M, Bai Z, *et al.* Research advances in soil chitinase [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(3): 569-575.
- [33] 鲍勇, 高颖, 曾晓敏, 等. 中亚热带3种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系[J]. *植物生态学报*, 2018, **42**(4): 508-516.
- Bao Y, Gao Y, Zeng X M, *et al.* Relationships between carbon and nitrogen contents and enzyme activities in soil of three typical subtropical forests in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, **42**(4): 508-516.
- [34] Neubauer S C, Franklin R B, Berrier D J. Saltwater intrusion into tidal freshwater marshes alters the biogeochemical processing of organic carbon [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(12): 8171-8183.
- [35] 杨小东. 长期施肥对三种土壤类型酶活性及硝化微生物丰度的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- Yang X D. Changes of enzyme activities and abundance of nitrifying microorganism of three different type soils under long-term fertilization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [36] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, *et al.* Eoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 11-21.
- [37] 李西祥, 白红英, 丁琦, 等. 黄土地区冬小麦田土壤理化性状、磷酸酶活性与氧化亚氮的排放[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(8): 1187-1192.
- Li X X, Bai H Y, Ding Q, *et al.* Soil physical and chemical properties, phosphatase activity, and N₂O emission in winter wheat field on Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(8): 1187-1192.
- [38] Zhang Y Y, Wang C M, Li Y. Contrasting effects of nitrogen and phosphorus additions on soil nitrous oxide fluxes and enzyme activities in an alpine wetland of the Tibetan Plateau [J]. *PLoS One*, 2019, **14**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0216244.
- [39] 梁东丽, 方日尧, 李生秀, 等. 硝、铵态氮肥对旱地土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, **25**(1): 67-72.
- Liang D L, Fang R Y, Li S X, *et al.* Effects of nitrogen types on N₂O emissions of dry-land soil [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, **25**(1): 67-72.
- [40] Malhi S S, McGill W B. Nitrification in three Alberta soils: effect of temperature, moisture and substrate concentration [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, **14**(4): 393-399.
- [41] Ashraf M N, Hu C, Wu L, *et al.* Soil and microbial biomass stoichiometry regulate soil organic carbon and nitrogen mineralization in rice-wheat rotation subjected to long-term fertilization [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(8): 3103-3113.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)