

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中CH ₄ 、CO ₂ 和N ₂ O浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512)	《环境科学》征稿简则(4735)
信息(4696, 4790, 4887)	

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响

张少宏^{1,2}, 王俊^{1,2,3*}, 方震文^{1,2}, 付鑫⁴

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 4. 河北农业大学国土资源学院, 保定 071001)

摘要: 利用田间试验研究了冬季绿肥对旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响。试验设燕麦、小扁豆、燕麦与小扁豆混播和裸地休闲共4个处理, 采用静态箱-气相色谱法对冬闲期和春玉米生长期土壤温室气体(CO_2 、 N_2O 和 CH_4)排放通量进行观测。结果表明, 旱作春玉米-冬季绿肥种植系统土壤是 CO_2 、 N_2O 的排放源和 CH_4 的吸收汇。与裸地休闲相比, 燕麦和小扁豆在冬闲期对土壤 CO_2 累积排放量没有影响, 但在春玉米生长期导致土壤 CO_2 累积排放量分别增加了7.77%和25.7% ($P < 0.05$), 混播导致冬闲期和春玉米生长期土壤 CO_2 累积排放量分别增加了19.1%和14.5% ($P < 0.05$)。种植燕麦后冬闲期和春玉米生长期土壤 N_2O 累积排放量较裸地休闲分别降低了11.6%和14.7% ($P < 0.05$), 而小扁豆分别增加了31.9%和14.9% ($P < 0.05$); 混播导致冬闲期土壤 N_2O 累积排放量降低了19.2% ($P < 0.05$), 但在春玉米生长期差异不显著。与裸地休闲相比, 燕麦、小扁豆和混播冬闲期土壤 CH_4 累积吸收量分别降低了37.9%、23.6%和29.6% ($P < 0.05$), 春玉米生长期分别降低了19.4%、33.5%和31.5% ($P < 0.05$), 其中小扁豆和混播在冬闲期和春玉米生长期差异均不显著。燕麦较裸地休闲在农田综合增温潜势(GWP)、春玉米产量和温室气体排放强度(GHGI)差异均不显著。小扁豆和混播显著提高了GWP, 其中小扁豆显著高于混播。而与裸地休闲相比, 小扁豆和混播分别提高了春玉米产量的20.3%和15.4% ($P < 0.05$), 但对GHGI没有显著影响。综合考虑GWP、春玉米产量和GHGI, 本地区冬闲期间将小扁豆和燕麦二者混播能增加春玉米产量的同时有效降低土壤温室气体排放强度。

关键词: 绿肥作物; 温室气体排放; 增温潜势; 春玉米; 黄土高原

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4848-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111311

Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China

ZHANG Shao-hong^{1,2}, WANG Jun^{1,2,3*}, FANG Zhen-wen^{1,2}, FU Xin⁴

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 4. College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: A field experiment was carried out to study the effects of winter cover cropping on soil greenhouse gas emissions in dryland maize. Four cover crop treatments, namely oat, lentil, a mixture of oat and lentil, and no cover crops (CK), were included during the winter fallow period. Greenhouse gas emission fluxes from soil were measured using the static chamber-gas chromatograph technique. The results showed that: both soil CO_2 and N_2O were emitted, but the soil acted as a sink for CH_4 . Compared with the that in CK, oat and lentil had no effect on the cumulative amount of soil CO_2 emissions during the winter fallow period and increased the cumulative amount of soil CO_2 emissions by 7.77% and 25.7% ($P < 0.05$) in the spring maize growing period, respectively; the mixture increased the cumulative amount of soil CO_2 emissions by 19.1% and 14.5% ($P < 0.05$) during the winter fallow and spring maize growing periods. In the winter fallow and spring maize periods, compared with that in CK, oat declined the cumulative amount of soil N_2O emissions by 11.6% and 14.7% ($P < 0.05$), and lentil increased the cumulative amount of soil N_2O emissions by 31.9% and 14.9% ($P < 0.05$), respectively. Compared to that in the CK, the mixture declined the cumulative amount of soil N_2O emissions by 19.2% ($P < 0.05$) in the winter fallow period but had no effect in the spring maize period. Compared with the CK, oat, lentil, and their mixture resulted in a declined cumulative amount of soil CH_4 uptake by 37.9%, 23.6%, and 29.6% ($P < 0.05$) in the winter fallow period and by 19.4%, 33.5%, and 31.5% ($P < 0.05$) in the spring maize growing period, respectively. Compared with the CK, oat had no effect on global warming potential (GWP), maize yield, and greenhouse gas intensity (GHGI). Lentil and the mixture increased GWP, and lentil showed a greater increase in GWP than that of the mixture. Compared with the CK, lentil and the mixture increased maize yield by 20.3% and 15.4% ($P < 0.05$), respectively, and had no effect on GHGI. The findings from this study show that the lentil and oat mixture can significantly increase maize yield and decrease GHGI.

Key words: cover crop; greenhouse gas emissions; global warming potential (GWP); spring maize; the Loess Plateau

黄土高原地区是我国典型的旱作农业区, 受水热条件限制, 粮食作物多为一年一熟或两年三熟, 粮

食作物收获到下一季播种存在一定时间的休闲期。在休闲期间播种覆盖作物(cover crop or catch crop)

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-01-13

基金项目: 中国科学院“西部之光”西部引进人才项目; 国家自然科学基金项目(31570440); 陕西省国际科技合作与交流计划重点项目(2020KWZ-010); 陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-XA-005)

作者简介: 张少宏(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为旱作农田土壤温室气体排放, E-mail: 864646641@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangji@nwu.edu.cn

一方面覆盖地表保护土壤,另一方面其翻压还田用作绿肥(green manure)提升土壤肥力^[1].有研究发现^[2~5],这种绿肥填闲种植方式能够促进土壤团聚作用、控制土壤侵蚀、减少养分淋溶以及抑制杂草和害虫,在土壤质量提升和农田固碳减排方面具有巨大潜力.

与传统裸地休闲相比,绿肥种植增加了有机输入,能够刺激土壤微生物活动^[3,4,6],进而影响土壤温室气体排放过程^[7~10].Muhammad 等^[6]的研究表明,全球尺度上绿肥种植导致土壤 CO₂ 排放量增加了 33%,变异因素主要源于绿肥种类及其生物量.例如 Sainju 等^[11]在北美平原的研究表明,种植非豆科绿肥土壤 CO₂ 排放量高于豆科绿肥.绿肥种植对土壤 N₂O 排放的影响存在较大变异^[12,13].豆科绿肥生长期间通过生物固氮作用增加氮输入,且较低的碳氮比使其残余养分释放快,促进土壤 N₂O 排放,而非豆科绿肥通常具有更高的生物量,会减少其生长期土壤矿质氮含量,抑制土壤 N₂O 排放^[14].Basche 等^[13]基于 26 篇文献的 Meta 分析发现,60% 的研究结果认为绿肥种植增加土壤 N₂O 排放,其余 40% 的研究结果则相反.这种种植方式同样也影响土壤 CH₄ 排放/吸收过程.例如 Gong 等^[15]在日本茨城的研究发现,与非豆科绿肥相比,豆科绿肥能显著减少土壤 CH₄ 吸收,主要原因在于豆科或者包含豆科的混播会抑制与土壤 CH₄ 氧化有关的酶活性.

黄土高原地区受水热条件限制,绿肥种植多集中在夏季进行,且多关注绿肥的水肥效应,但对冬季绿肥种植的产量效应及其对土壤温室气体排放的影响较少涉及.本文基于一个春玉米-冬季绿肥定位试验,系统观测了种植不同绿肥条件下土壤温室气体(CO₂、N₂O 和 CH₄)排放过程,以期为绿肥填闲种植系统在黄土高原地区的推广应用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西长武农田生态系统国家野外科学观测站(35°12'N, 107°44'E, 海拔高度 1 200 m),属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,年平均气温 9.2℃,全年无霜期 171 d,多年平均降水量 584 mm,降水多集中在 7、8 和 9 月,约占全年降水量一半以上,属于典型的旱作雨养农业区.供试土壤为黏壤质黑垆土,土质疏松,土层深厚,肥力中等.试验区耕层土壤钾素丰富,试验前 0~20 cm 土层土壤 ω (有机碳)为 9.10 g·kg⁻¹, ω (全氮)为 0.78 g·kg⁻¹, ω (速效磷)为 5.24 mg·kg⁻¹, ω (速效钾)为 180 mg·kg⁻¹, pH 值为 8.4. 试验期间的降水如图

1 所示.

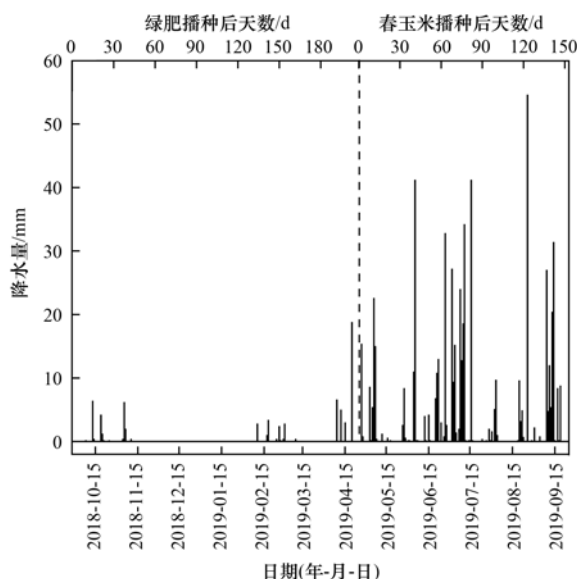


图1 试验期间降水量

Fig. 1 Precipitation during the experimental period

1.2 试验设计

本试验开始于 2017 年 10 月.采用完全随机区组试验设计,绿肥作物包括燕麦(oat)、小扁豆(lentil)、燕麦与小扁豆混播(mixture)和裸地休闲(CK),总计 4 个处理,每处理重复 3 次,共 12 个小区,小区面积 21 m²,小区间距为 0.5 m,四周设有 1 m 的保护行.

供试玉米品种为先玉 335,每年 4 月下旬播种,行距 60 cm,株距 30 cm,同年 10 月初收获(小区面积仅 21 m²,春玉米整区收获并测产,使其产量数据具有较好的代表性).绿肥作物于春玉米收获后播种,其中燕麦单播处理播量为 150 kg·hm⁻²,小扁豆单播处理播量为 75 kg·hm⁻²,二者混播时播量各自减半.每年 4 月上旬用旋耕机将绿肥作物翻压还田,腐解两周后播种春玉米.试验区常见管理措施为粮食作物播前补充一定量的氮肥与磷肥(当地土壤钾素丰富),考虑到本研究仅探究冬季绿肥对温室气体排放的影响,而且冬闲期间低温会限制其生物量,较低的生物量可能会造成温室气体排放的差异较小,另外,施加无机氮肥会显著影响农田生态系统温室气体的排放,为避免后期观测与处理分析的困难,本研究春玉米播前不施加氮肥,按 90 kg·hm⁻²施入磷肥(以 P₂O₅ 计)作为基肥.作物生长期间无灌溉,其他田间管理措施与当地保持一致.

1.3 样品采集与测定

温室气体测定采用静态箱-气相色谱法^[16].静态箱包含两部分^[17]:静态箱气室(具有通风口和采样口)和固定基座(采样期间一直安置在各小区固

定位置,地下 8 cm,地上 4 cm)。两部分均由聚乙烯化合物制成(高 12 cm、直径 21 cm),用反光锡纸包裹外层起到隔热作用,在底部装有与固定基座密封的软橡胶圈。采样时将静态箱气室罩在固定基座上,用软橡胶圈固定密封,同时用 TDR100 便携式土壤水分速测仪和 TP3001 数字温度传感器测量固定基座外侧边缘的 5 cm 深土壤水分(%)和温度(℃)。在 2018 年 10 月至 2019 年 9 月采样,每周 1~2 次,时间为 09:00~11:00^[18]。选择晴朗无雨雪天进行,如遇雨雪等天气延期采样(降雨较少时平衡至少 2 d 采样,降雨较多时视田间情况延期采样。降雪当天不进行采样)。使用注射器(20 mL)在第 0、20 和 40 min 这 3 个时间点采样并存于气体储存瓶,使用气相色谱仪(安捷伦 7890B,美国)测定样品中的 CO₂、N₂O 和 CH₄ 浓度,并利用 HM 模型计算气体通量^[17]。

全球增温潜势(global warming potential, GWP)是估算不同温室气体对气候系统潜在效应的指标,表示同质量的不同温室气体对温室效应增加的相对辐射效应^[17]。

$$GWP = GWP_{\text{soil export}} + GWP_{\text{indirect}} - GWP_{\text{residue}} \quad (1)$$
式中, GWP 为农田综合增温潜势(kg·hm⁻²,以 CO₂ 计); GWP_{soil export} 为土壤温室气体排放增温潜势; GWP_{indirect} 为农业活动投入所引起的间接增温潜势,包括机械燃油、化肥投入和人工劳动,其中人工劳动忽略不计,呼吸排放 CO₂ 是人生存基本的特征; GWP_{residue} 为前一年返回到土壤的作物残余固定的 CO₂,前一年返回到土壤的作物残余包括绿肥地上及地下生物量和玉米根系。

由于 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的增温效应不同,根据 IPCC 报告^[19]以 100 年影响尺度计,一般以 CO₂ 为标准,用 CO₂ 当量表示,计算公式如下:

$$GWP_{\text{soil export}} = CO_2 \times \frac{44}{12} + CH_4 \times \frac{16 \times 28}{12} + N_2O \times \frac{44 \times 265}{28} \quad (2)$$

式中, GWP_{soil export} 为土壤温室气体排放增温潜势(kg·hm⁻²), CO₂、N₂O 和 CH₄ 分别为试验期间土壤 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的累积排放量(kg·hm⁻²)。

$$GWP_{\text{indirect}} = \sum_{i=1}^n N_i \times F_i \quad (3)$$

式中, GWP_{indirect} 为农业活动投入所引起的间接增温潜势(kg·hm⁻²), N_i 和 F_i 分别为第 i 种农业活动耗用物质的用量和 CO₂ 等当量排放系数。参照文献[20, 21], 机械燃油耗能 CO₂ 等量排放系数为 2.59 kg·L⁻¹, 磷肥耗能 CO₂ 等量排放系数为 0.61 kg·L⁻¹。

绿肥地上生物量在翻压还田前用样方法测定,用 1 m×1 m 的样方将绿肥地上部分齐地刈割,然后在 105℃ 下杀青 30 min,之后 70℃ 烘干并称重,春玉米地上部分整区收获并移走,然后脱粒晒干并称重测产。

将烘干的绿肥地上部用粉碎机粉碎并过 0.15 mm 筛子,使用 EA3000 元素分析仪测定其碳含量^[22]。在未采集绿肥及玉米地下部分的情况下,参照 Sainju^[22]提供的估算方法确定其地下生物量产量及其碳含量,1.15 为地上总生物量转换植株总生物量的系数^[22, 23],这里统一取 0.15 作为根系占地上总生物量的系数;作物中平均含有 40%~45% 的碳^[22],这里统一取 43% 来估算绿肥及玉米地下的碳含量。

$$TCR = 0.001 \times \sum_{i=1}^n W_i \times C_i \quad (4)$$

式中, TCR 为前一年返回到土壤的作物残余固定的碳(total amount of previous year crop residue C returned to the soil, TCR, kg·hm⁻²), 0.001 为转换系数(1 kg/1 000 g), W_i 和 C_i 分别为前一年第 i 种作物残余量(kg·hm⁻²)及其碳含量(g·kg⁻¹)。

$$GWP_{\text{residue}} = TCR \times 3.67 \text{ (or } 44CO_2/12C) \quad (5)$$
式中, GWP_{residue} 为前一年返回到土壤的作物残余固定的 CO₂(kg·hm⁻²)。

温室气体排放强度(greenhouse gas intensity, GHGI)表示单位面积产量的温室气体排放通量(kg·kg⁻¹)^[17],计算公式如下:

$$GHGI = GWP/Yield \quad (6)$$

式中, GHGI 为温室气体排放强度(kg·kg⁻¹), Yield 为春玉米籽粒产量(kg·hm⁻²)。

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 22.0 软件处理数据和统计分析,用 Origin 2018 制图。

2 结果与分析

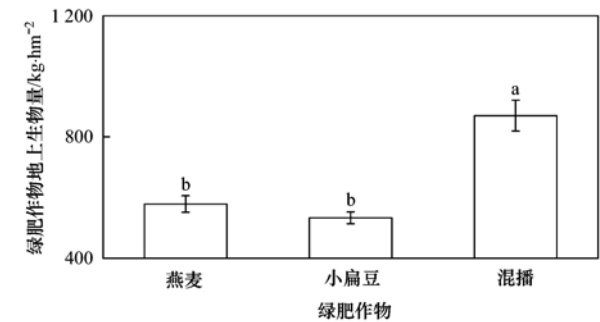
2.1 绿肥作物地上生物量

2018 年冬季绿肥播种后遭遇霜冻,通过图 2 可以看出,次年春季绿肥翻压时各绿肥作物地上生物量积累均偏低,其中混播地上生物量较燕麦和小扁豆分别提高了 50.0% 和 62.9% (P<0.05)。

2.2 冬闲期土壤温室气体通量

2.2.1 CO₂ 通量

从冬闲期土壤 CO₂ 排放通量动态来看[图 3 (a)],绿肥作物生长前期和后期土壤 CO₂ 排放通量要高于中期。绿肥作物播种 22 d 内土壤 CO₂ 排放通量逐渐减少且波动大,且 3 个绿肥处理均大于裸地休闲,第 71~154 d 各处理趋于稳定且接近于零,第



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图2 冬季绿肥作物地上生物量

Fig. 2 Winter cover crop aboveground biomass

161 d 后,各处理逐渐上升.从土壤 CO_2 累积排放通量变化来看[图 3(b)],混播在第 22 d 后显著高于其它处理,燕麦和小扁豆在第 71 d 后显著高于裸地休闲,其中小扁豆和燕麦的变化大致相同.

从表 1 可知,与裸地休闲相比,燕麦和小扁豆土壤 CO_2 累积排放通量差异不显著,而混播增加了 19.1% ($P < 0.05$).

2.2.2 N_2O 通量

从冬闲期土壤 N_2O 排放通量动态来看[图 3(c)],绿肥作物播种 3 周内土壤 N_2O 排放通量呈快速下降趋势.从土壤 N_2O 累积排放通量变化来看[图 3(d)],燕麦和混播在第 47 d 后土壤 N_2O 累积排放通量低于裸地休闲,小扁豆在第 57、71 和 89 d 低于裸地休闲,在

表 1 绿肥种植对冬闲期间土壤温室气体排放通量的影响¹⁾

Table 1 Effect of cover cropping on greenhouse gas

绿肥作物	emission fluxes during the winter fallow period		
	CO_2 累积排放 通量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O 累积排放 通量/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$	CH_4 累积排放 通量/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$
裸地休闲	648b	127b	-614c
燕麦	725b	112c	-381a
小扁豆	708b	167a	-469b
混播	772a	103c	-432b

1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

第 120 d 后高于裸地休闲.其中小扁豆在第 120 d 后高于燕麦和混播,燕麦在第 138 d 后高于混播.

从表 1 可知,与裸地休闲相比,燕麦和混播土壤 N_2O 累积排放通量分别减少了 11.6% 和 19.2% ($P < 0.05$),而小扁豆增加了 31.9% ($P < 0.05$).

2.2.3 CH_4 通量

与土壤 CO_2 和 N_2O 通量相反,土壤 CH_4 通量为负值,表明供试土壤为 CH_4 的汇.从冬闲期土壤 CH_4 吸收通量动态来看[图 3(e)],绿肥作物播种 2 个月内土壤 CH_4 吸收通量呈快速增加趋势,从第 57 ~ 89 d 土壤 CH_4 吸收通量快速减少,至第 120 d 稳定且接近于零,第 138 d 至冬闲期结束土壤 CH_4 吸收通量增加且各处理波动较大.从土壤 CH_4 累积吸收通量变化来看[图 3(f)],3 个绿肥处理土壤 CH_4 累积吸收通量始终低于裸地休闲,燕麦和混播始终

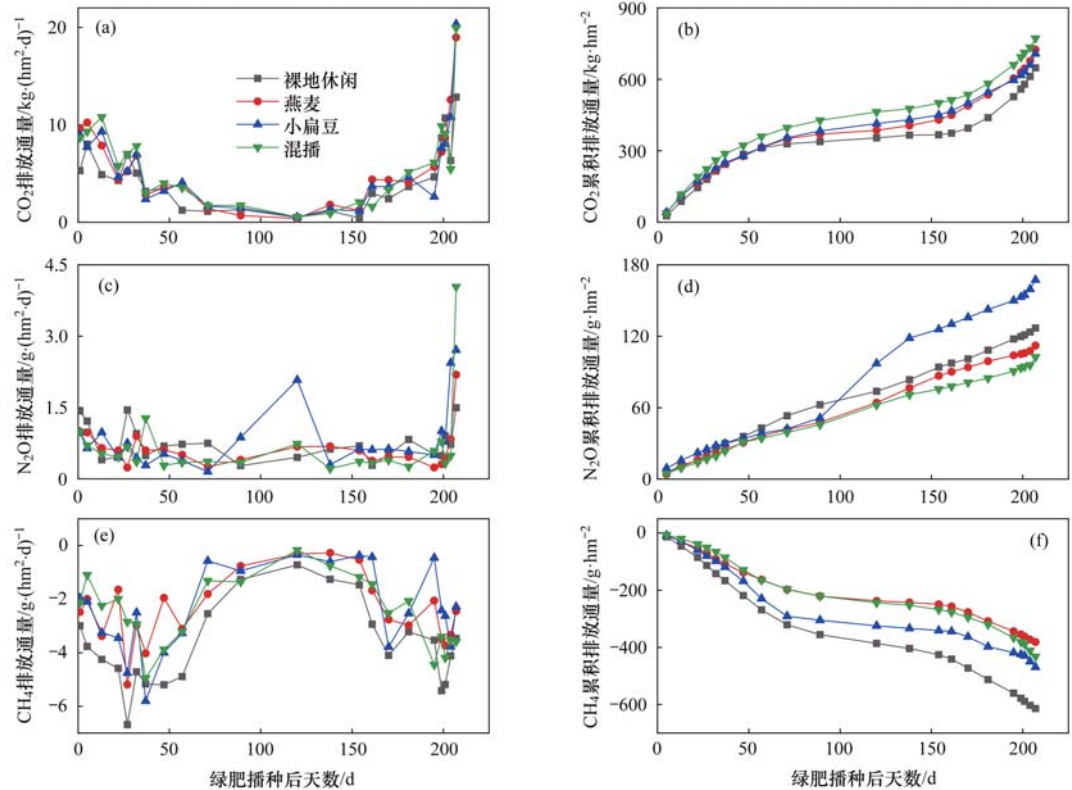


图3 不同绿肥作物处理下冬闲期间土壤温室气体排放通量

Fig. 3 Greenhouse gas emissions flux during the winter fallow period under different cover crop treatments

低于小扁豆,其中在绿肥作物播种后 120 d 内,燕麦变化与混播大致相同,第 120 d 后低于混播.

从表 1 可知,与裸地休闲相比,燕麦、小扁豆和混播处理土壤 CH_4 累积吸收通量分别减少了 37.9%、23.6% 和 29.6% ($P < 0.05$),其中燕麦和混播处理均显著高于小扁豆处理.

2.3 春玉米生长期土壤温室气体通量

2.3.1 CO_2 通量

从春玉米生长期土壤 CO_2 排放通量动态来看[图 4(a)], 3 个绿肥处理在春玉米播种后第 15、23、28 和 42~70 d 较裸地休闲增加了土壤 CO_2 排放通量.从土壤 CO_2 累积排放通量变化来看[图 4(b)],小扁豆在第 23 d 后高于其它处理,燕麦和混播在第 42 d 后高于裸地休闲,其中混播在第 70 d 后高于燕麦.

从表 2 可知,与裸地休闲相比,燕麦、小扁豆和混播土壤 CO_2 累积排放通量分别增加了 7.77%、25.7% 和 14.5% ($P < 0.05$),其中 3 个绿肥处理间差异显著.

2.3.2 N_2O 通量

从春玉米生长期土壤 N_2O 排放通量动态来看[图 4(c)],小扁豆在春玉米播种后第 3~42 d 和 53~105 d 土壤 N_2O 排放通量高于裸地休闲,而燕麦在第 7、34、47 和 84~148 d 低于裸地休闲.从土壤

表 2 绿肥种植对春玉米生长期土壤温室气体排放通量的影响¹⁾

绿肥作物	fluxes during the spring maize growing period		
	CO_2 累积排放 通量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O 累积排放 通量/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$	CH_4 累积排放 通量/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$
裸地休闲	2 104d	185b	-758c
燕麦	2 268c	158c	-611b
小扁豆	2 644a	213a	-504a
混播	2 410b	184b	-519a

1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

N_2O 累积排放通量变化来看[图 4(d)],小扁豆在第 7 d 后始终高于裸地休闲;燕麦在第 7~84 d 高于裸地休闲,从第 98 d 至春玉米收获低于裸地休闲;混播在第 3~98 d 与裸地休闲大致相同,从第 105 d 至春玉米收获高于裸地休闲.小扁豆在春玉米生长期土壤 N_2O 累积排放通量始终大于燕麦和混播,其中混播在第 105 d 后高于燕麦.

从表 2 可知,与裸地休闲相比,小扁豆土壤 N_2O 累积排放通量增加了 14.9% ($P < 0.05$),燕麦减少了 14.7% ($P < 0.05$),而混播的差异不显著,其中 3 个绿肥处理间差异显著.

2.3.3 CH_4 通量

从春玉米生长期土壤 CH_4 吸收通量动态来看[图 4(e)], 3 个绿肥处理在春玉米播种后第 3、7、

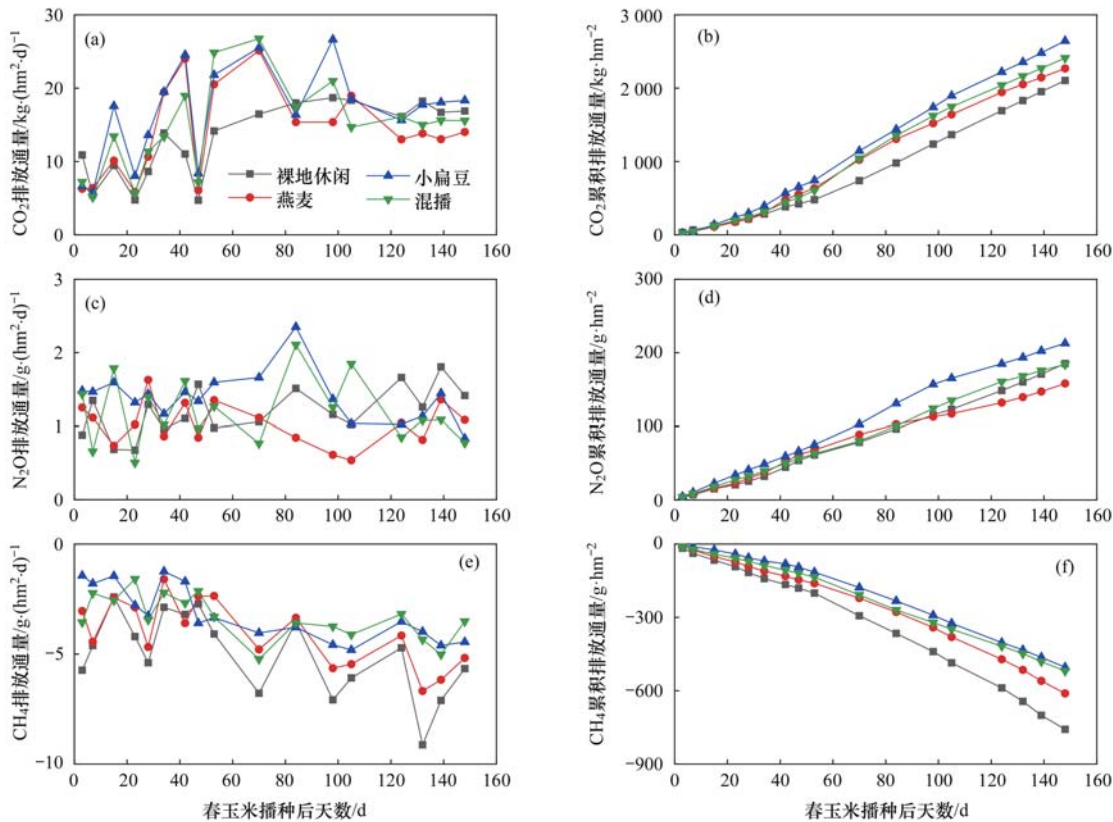


图 4 不同绿肥作物处理下春玉米生长期土壤温室气体排放通量

Fig. 4 Greenhouse gas emission fluxes during the spring maize growing period under different cover crop treatments

23、28、34、53、70 和 98 d 至春玉米收获,土壤 CH₄ 吸收通量低于裸地休闲. 从土壤 CH₄ 累积吸收通量变化来看[图 4(f)],绿肥处理土壤 CH₄ 累积吸收通量始终大于裸地休闲,3 个绿肥处理表现为:小扁豆>混播>燕麦.

从表 2 可知,与裸地休闲相比,燕麦、小扁豆和混播土壤 CH₄ 累积吸收通量分别减少了 19.4%、33.5% 和 31.5% ($P < 0.05$),其中燕麦分别与小扁豆和混播差异显著,而小扁豆和混播差异不显著.

2.4 土壤水分、温度与土壤 CO₂、N₂O 和 CH₄ 排放的相关性分析

从图 5(a)和图 5(b)可知,土壤水分和温度与冬闲期、春玉米生长期和全年土壤 CO₂ 排放通量均呈正相关. 从图 5(c)和图 5(d)可知,冬闲期和全年的土壤 N₂O 排放通量与土壤水分均呈正相关,但春

玉米生长期土壤 N₂O 排放通量与土壤水分不相关,而土壤温度与冬闲期、春玉米生长期和全年土壤 N₂O 排放通量均呈正相关. 从图 5(e)和图 5(f)可知,土壤水分和温度与冬闲期、春玉米生长期和全年土壤 CH₄ 吸收通量均呈正相关,随土壤水分和温度增加,会促进土壤 CH₄ 吸收.

2.5 周年综合增温潜势(GWP)、玉米产量和温室气体排放强度(GHGI)

从表 3 可知,本研究 GWP 中 CO₂ 的贡献率最高,其次是 N₂O, CH₄ 对 GWP 的贡献为负效应,而机械燃油和肥料投入的碳排放占较小比例. 与裸地休闲相比,小扁豆和混播 GWP 分别提高了 23.9% 和 10.5% ($P < 0.05$),而燕麦差异不显著,其中小扁豆分别与燕麦和混播差异显著. 与裸地休闲相比,小扁豆和混播的春玉米产量分别提高了 20.3% 和

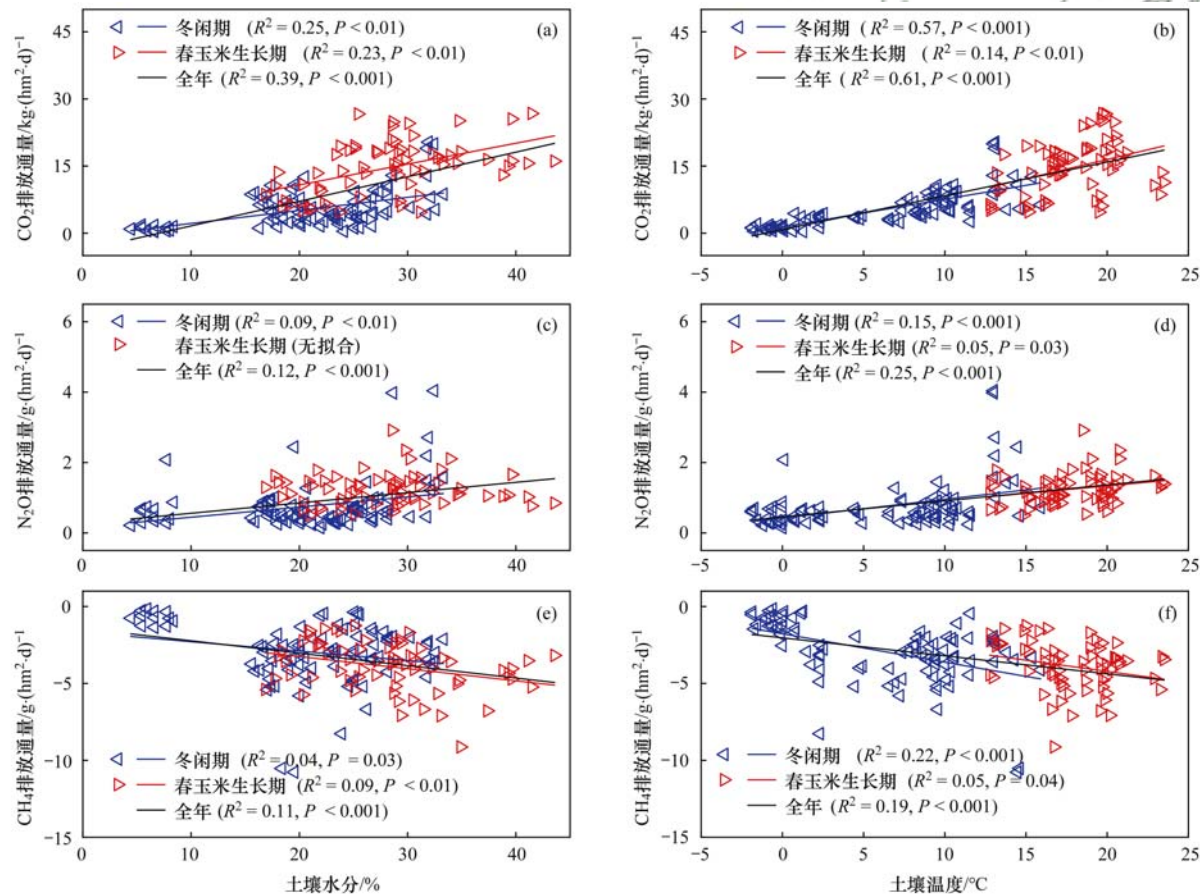


图 5 土壤水分和温度与土壤 CO₂、N₂O 和 CH₄ 排放通量的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of soil water content, soil temperature and CO₂, N₂O, and CH₄ emission fluxes

表 3 2018~2019 年绿肥种植对周年温室气体增温潜势(GWP)、玉米产量和温室气体排放强度(GHGI)的影响¹⁾

Table 3 Effect of cover cropping on global warming potential (GWP), maize yield, and greenhouse gas intensity (GHGI) from 2018-2019

绿肥作物	GWP _{residue} /kg·hm ⁻²	周年累积排放量/kg·hm ⁻²			GWP _{soil export} /kg·hm ⁻²			机械燃油 /kg·hm ⁻²	磷肥 /kg·hm ⁻²	GWP /kg·hm ⁻²	玉米产量 /kg·hm ⁻²	GHGI /kg·kg ⁻¹
		CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄					
裸地休闲	1 689	2 752d	0.31b	-1.37b	10 092d	130b	-51.2b	186	54.9	8 723c	3 959b	2.21
燕麦	2 248	2 992c	0.27c	-0.99a	10 972c	112c	-37.0a	373	54.9	9 228bc	4 049b	2.28
小扁豆	2 030	3 352a	0.38a	-0.97a	12 291a	158a	-36.3a	373	54.9	1 0811a	4 762a	2.27
混播	2 542	3 182b	0.29c	-0.95a	11 668b	119c	-35.5a	373	54.9	9 638b	4 570a	2.11

1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

15.4% ($P < 0.05$), 而燕麦对玉米产量没有影响. 不同绿肥作物处理的 GHGI 差异不显著.

3 讨论

3.1 绿肥种植对土壤 CO_2 排放的影响

春玉米-绿肥休闲种植系统土壤是 CO_2 的排放源. 本研究中, 与裸地休闲相比, 绿肥种植对土壤 CO_2 排放有不同程度的增加, 这与 Singh 等^[24] 在美国南达科他州试验结果类似. 有研究表明^[25,26], 冬季绿肥(燕麦、野豌豆和冬季油菜等)也会促进后续作物生长期间土壤 CO_2 排放. 原因可能是绿肥种植较裸地休闲能刺激微生物活性和根系呼吸^[27]. 另外, 绿肥翻压还田向土壤输入新鲜有机物料, 提高土壤有机碳含量^[28,29], 翻压增加了土壤通气性, 破坏土壤团聚体加速土壤有机碳的分解, 导致土壤 CO_2 排放增加^[13,30~32].

植物根系的呼吸受其生物量影响, 生物量越高, 土壤 CO_2 排放越高^[6,33]. 与本研究的结果一致, 在冬闲期间, 混播土壤 CO_2 排放量高于燕麦和小扁豆, 与绿肥间地上生物量大小一致; 燕麦和小扁豆在土壤 CO_2 排放量和其地上生物量均无差异. 而在春玉米生长期间土壤 CO_2 排放量表现为: 小扁豆 > 混播 > 燕麦. 原因可能是豆科碳氮比较低, 翻压还田后其腐解速率快, 更能刺激微生物活性和作物根系呼吸, 从而促进土壤 CO_2 排放^[34].

土壤水分和温度可能会影响土壤 CO_2 排放^[16,24]. 特别在干旱与半干旱地区, 低土壤水分的土壤 CO_2 排放对水分更为敏感^[35]. 由图 5(a) 和 5(b) 可知, 土壤水分和温度与全年土壤 CO_2 排放均呈正相关, 这说明土壤水分和温度是影响土壤 CO_2 排放的重要因素. 这与戈小荣等^[17] 的试验结果一致.

3.2 绿肥种植对土壤 N_2O 排放的影响

土壤 N_2O 的产生高度依赖土壤氮素的有效性^[36]. 有研究表明^[6], 绿肥种类影响土壤 N_2O 排放. 本研究中, 豆科较非豆科和混播促进土壤 N_2O 排放, 这与 Muhammad 等^[6] 基于 48 篇文献的 Meta 分析结果一致. 原因可能是, 虽然豆科和非豆科在冬闲期间都能从土壤中吸收氮, 降低土壤矿质氮含量, 但非豆科在降低硝态氮和氮淋溶方面比豆科更有效^[37~39], 另一方面豆科生物固氮及其较低的碳氮比^[6,31,38~40], 翻压还田其矿化率高, 提高土壤中速效氮含量和氮基质的有效性, 为硝化和反硝化细菌提供底物, 提高土壤微生物活性, 促进硝化和反硝化过程, 导致更多的土壤 N_2O 排放^[38~43].

土壤水分和温度是影响土壤 N_2O 产生和排放的重要因素^[42,44]. 由图 5(c) 和 5(d) 可知, 与土壤 CO_2 排放通量的相关性一致, 土壤水分和温度与全年土壤 N_2O 排放均呈正相关. 原因可能是土壤水分和温度的增加会加速氮的矿化作用或反硝化过程, 促进土壤 N_2O 排放^[11,17,43].

3.3 绿肥种植对土壤 CH_4 排放的影响

土壤可以作为大气 CH_4 的源或汇, 不同的研究时间尺度、区域和气候条件都会对其产生影响^[45,46]. 本研究中, 土壤 CH_4 通量与 CO_2 、 N_2O 通量相反, 全年均为负值, 成为大气的汇, 罗晓琦等^[18] 在陕西杨凌的研究也得出, 旱作农田土壤为 CH_4 的吸收汇. 与裸地休闲相比, 绿肥种植对土壤 CH_4 吸收有不同程度的减少, 原因可能是绿肥种植减少土壤表层水分蒸发, 改善土壤结构, 增加土壤充水空隙, 进而对 CH_4 的吸收能力减弱^[34].

本研究中, 非豆科在冬闲期土壤的 CH_4 吸收比豆科和混播更少, 与戈小荣等^[17] 在冬小麦-夏季休闲种植系统中的研究结果不同. 原因可能是冬季和夏季休闲期间气候条件的差异, 冬闲期在霜冻和积雪融化后, 特别是土壤温度和水分的变化明显^[24]. 而非豆科较豆科和混播在春玉米生长期间增加了土壤 CH_4 吸收, Gong 等^[15] 在日本茨城县的研究也有相似结果, 翻压还田后豆科较非豆科更能减少土壤 CH_4 的吸收. 另外, 因为春玉米播前不施氮肥, 所以土壤中产生 NH_4^+ 的化合物主要受绿肥残余腐解的影响, 而且非豆科碳氮比较高, 残余腐解对土壤速效氮的需求更大, 而豆科或者包括豆科的混播翻压还田后 NH_4^+ 或者产生 NH_4^+ 化合物更多, 降低土壤的氧化能力, 抑制氧化 CH_4 的酶活性, 进而影响土壤 CH_4 的吸收^[18,47].

由图 5(e) 和 5(f) 可知, 土壤水分和温度与全年土壤 CH_4 吸收呈正相关. 原因可能是随土壤温度上升能提高土壤 CH_4 的氧化率, 促进土壤 CH_4 吸收^[48]. 孙海妮等^[49] 的研究发现土壤水分与土壤 CH_4 吸收呈负相关, 原因可能是土壤水分的增加会降低土壤通气性, 减少大气向土壤的扩散, 阻碍了土壤 CH_4 的氧化, 相关结论有待进一步研究.

3.4 绿肥种植对周年综合增温潜势 (GWP)、玉米产量和温室气体排放强度 (GHGI) 的影响

GWP 是评价农田管理措施对土壤温室气体排放的影响指标. 本研究中, 绿肥种植较裸地休闲提高了 GWP. 与常单娜等^[50] 在河南信阳试验结果一致. 这可能与绿肥生物量及其碳输入量有关, 根据 Lee 等^[51] 在韩国密阳的两年试验建议, 种植生物量大、

碳输入高及其增加后续作物产量为主的绿肥可以降低 GWP。另外,在 GWP 计算中, $GWP_{\text{soil export}}$ 是通过观测土壤 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 排放通量计算得出,结果表明,土壤 CO_2 排放对 GWP 起到关键作用^[17,47] 且贡献比重较大,其次是 N_2O 排放,而土壤 CH_4 排放贡献为负效应,绿肥种植较裸地休闲增加了全年土壤 CO_2 累积排放量,3 种绿肥表现为:小扁豆 > 混播 > 燕麦,这与 GWP 表现一致。而在 GWP_{residue} 的计算中,绿肥地上生物量及其碳含量分别通过样方法和元素分析仪来测定,由于未采集绿肥和玉米的地下生物量,只能通过文献估算其地下生物量及其碳含量,虽然绿肥及春玉米地下生物量较小,但也会增加 GWP_{residue} 的不确定性,其结果有待进一步研究。

有研究表明^[47,52],提高后续作物产量可以有效降低 GHGI。而本文发现小扁豆和混播较裸地休闲增加了春玉米产量,但对 GHGI 没有影响。另外, GWP 和 GHGI 的结果仅观测 1a 试验土壤 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 排放通量,后续需要更长的试验周期。如果仅评价 GWP,燕麦的温室气体排放相对最低,但农业生产活动需兼顾经济效益与环境效益,在考虑温室气体排放的同时,也要保证粮食作物产量。综合考虑 GWP、春玉米产量和 GHGI,混播的 GWP 较低,又能保证绿肥地上生物量和春玉米产量,且不会对 GHGI 造成影响。

考虑到本研究仅探究冬季绿肥对温室气体排放的影响,而且冬闲期间低温会限制其生物量,较低的生物量可能会造成温室气体排放差异较小^[6],春玉米播前没有添加氮肥,这对客观评价冬季绿肥对该地区土壤温室气体排放会产生一定的偏差。该地区其它研究结果表明^[53],添加氮肥增加了土壤无机氮含量,提高了粮食作物产量,显著增加土壤 CO_2 排放。另外,播前施加的氮肥与粮食作物吸收利用往往不同步,会增加微生物活动的氮源和底物,同时促进硝化和反硝化作用,增加土壤 N_2O 排放^[54,55],可能会抑制土壤 CH_4 吸收,进而提高农田温室气体增温潜势^[56]。由于本试验中没有添加氮肥,结果仅能从一定程度上反映冬季绿肥对该地区土壤温室气体排放的影响,在该地区种植绿肥是否受添加氮肥的影响而导致土壤温室气体排放增加,未来需要进行添加氮肥试验(参照当地常见施肥管理),以期更准确反映实际状况。

4 结论

(1) 春玉米-绿肥休闲种植系统土壤为 CO_2 和 N_2O 的排放源,为 CH_4 的吸收汇。

(2) 与裸地休闲相比,绿肥种植增加了土壤 CO_2 排放,但降低了土壤 CH_4 吸收。燕麦降低了土壤 N_2O 排放,而小扁豆增加了土壤 N_2O 排放。

(3) 虽然小扁豆和混播提高了 GWP,但增加了春玉米产量,且对 GHGI 没有影响。

(4) 综合考虑 GWP、春玉米产量和 GHGI,将燕麦和小扁豆二者混播可以保证春玉米产量的情况下,有效降低 GHGI。

参考文献:

- [1] 王俊, 薄晶晶, 付鑫. 休闲种植及其在黄土高原旱作农业区的可行性分析[J]. 生态学报, 2018, **38**(14): 5244-5254.
Wang J, Bo J J, Fu X. Research progress in cover cropping and its feasibility in the dryland farming systems on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(14): 5244-5254.
- [2] 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 等. 绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1114-1120.
Zhou Q, Wang L C, Xiong Y, et al. Effects of green manure intercropping and straw mulching on winter rape rhizosphere soil organic carbon and soil respiration[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1114-1120.
- [3] Garland G, Edlinger A, Banerjee S, et al. Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems[J]. Nature Food, 2021, **2**(1): 28-37.
- [4] Adetunji A T, Ncube B, Mulidzi R, et al. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: a review[J]. Soil and Tillage Research, 2020, **204**, doi: 10.1016/j.still.2020.104717.
- [5] Osipitan O A, Dille J A, Assefa Y, et al. Impact of cover crop management on level of weed suppression: a meta-analysis[J]. Crop Science, 2019, **59**(3): 833-842.
- [6] Muhammad I, Sainju U M, Zhao F Z, et al. Regulation of soil CO_2 and N_2O emissions by cover crops: a meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2019, **192**: 103-112.
- [7] Fiorini A, Maris S C, Abalos D, et al. Combining no-till with rye (*Secale cereale* L.) cover crop mitigates nitrous oxide emissions without decreasing yield [J]. Soil and Tillage Research, 2020, **196**, doi: 10.1016/j.still.2019.104442.
- [8] Skinner C, Gattinger A, Krauss M, et al. The impact of long-term organic farming on soil-derived greenhouse gas emissions [J]. Scientific Reports, 2019, **9**, doi: 10.1038/s41598-018-38207-w.
- [9] Bai X X, Huang Y W, Ren W, et al. Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2019, **25**(8): 2591-2606.
- [10] Foltz M E, Kent A D, Koloutsou-Vakakis S, et al. Influence of rye cover cropping on denitrification potential and year-round field N_2O emissions[J]. Science of the Total Environment, 2021, **765**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144295.
- [11] Sainju U M, Caesar-TonThat T, Lenssen A W, et al. Dryland soil greenhouse gas emissions affected by cropping sequence and nitrogen fertilization [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, **76**(5): 1741-1757.
- [12] Ekwunife K C, Madramootoo C A, Abbasi N A. Assessing the impacts of tillage, cover crops, nitrification, and urease

- inhibitors on nitrous oxide emissions over winter and early spring [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, doi: 10.1007/s00374-021-01605-w.
- [13] Basche A D, Miguez F E, Kaspar T C, *et al.* Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **69** (6): 471-482.
- [14] Behnke G D, Villamil M B. Cover crop rotations affect greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA [J]. *Field Crops Research*, 2019, **241**, doi: 10.1016/j.fcr.2019.107580.
- [15] Gong Y T, Li P R, Sakagami N, *et al.* No-tillage with rye cover crop can reduce net global warming potential and yield-scaled global warming potential in the long-term organic soybean field [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **205**, doi: 10.1016/j.still.2020.104747.
- [16] 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 等. 黄土高原地区两种土地利用方式 CO₂ 和 N₂O 排放特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (11): 5164-5172.
- Han J L, Hao S, Liu Z J, *et al.* Characteristics of CO₂ and N₂O emissions under two land use types in the Loess Plateau of China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (11): 5164-5172.
- [17] 戈小荣, 王俊, 张祺, 等. 不同降水格局下休闲种植对旱作冬小麦农田夏闲期土壤温室气体排放的影响 [J]. *草业学报*, 2018, **27** (5): 27-38.
- Ge X R, Wang J, Zhang Q, *et al.* Effect of cover cropping on soil greenhouse gas emissions during summer fallow under manipulated rainfall [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, **27** (5): 27-38.
- [18] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 等. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (11): 5246-5256.
- Luo X Q, Zhang A F, Chen H X, *et al.* Effects of plastic film mulching patterns and irrigation on yield of summer maize and greenhouse gas emissions intensity of field [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (11): 5246-5256.
- [19] IPCC. Climate change 2014: synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Geneva: IPCC, 2014.
- [20] Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere [J]. *Science*, 2000, **289** (5486): 1922-1925.
- [21] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, **91** (1-3): 217-232.
- [22] Sainju U M. Net global warming potential and greenhouse gas intensity [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, **84** (5): 1393-1404.
- [23] 张喜英. 作物根系与土壤水利用 [M]. 北京: 气象出版社, 1999. 35-59.
- Zhang X Y. Crop roots and soil water utilization [M], Beijing: Meteorological Press, 1999. 35-59.
- [24] Singh J, Kumar S. Responses of soil microbial community structure and greenhouse gas fluxes to crop rotations that include winter cover crops [J]. *Geoderma*, 2021, **385**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114843.
- [25] Radicetti E, Campiglia E, Langeroodi A S, *et al.* Soil carbon dioxide emissions in eggplants based on cover crop residue management [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, **118** (1): 39-55.
- [26] Negassa W, Price R F, Basir A, *et al.* Cover crop and tillage systems effect on soil CO₂ and N₂O fluxes in contrasting topographic positions [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **154**: 64-74.
- [27] Drost S M, Rutgers M, Wouterse M, *et al.* Decomposition of mixtures of cover crop residues increases microbial functional diversity [J]. *Geoderma*, 2020, **361**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114060.
- [28] Hwang H Y, Kim G W, Kim S Y, *et al.* Effect of cover cropping on the net global warming potential of rice paddy soil [J]. *Geoderma*, 2017, **292**: 49-58.
- [29] Zhang D B, Yao Z Y, Chen J, *et al.* Improving soil aggregation, aggregate-associated C and N, and enzyme activities by green manure crops in the Loess Plateau of China [J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, **70** (6): 1267-1279.
- [30] 谢燕, 陈曦, 胡正华, 等. 短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (4): 1499-1506.
- Xie Y, Chen X, Hu Z H, *et al.* Effects of short-time conservation tillage managements on greenhouse gases emissions from soybean-winter wheat rotation system [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (4): 1499-1506.
- [31] Wen Y, Zang H D, Freeman B, *et al.* Rye cover crop incorporation and high watertable mitigate greenhouse gas emissions in cultivated peatland [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, **30** (16): 1928-1938.
- [32] Ferrara R M, Carozzi M, Decuq C, *et al.* Ammonia, nitrous oxide, carbon dioxide, and water vapor fluxes after green manuring of faba bean under Mediterranean climate [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **315**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107439.
- [33] McClelland S C, Paustian K, Schipanski M E. Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: a meta-analysis [J]. *Ecological Applications*, 2021, **31** (3), doi: 10.1002/eap.2278.
- [34] 张学良, 张宇亭, 刘瑞, 等. 绿肥不同还田方式对土壤温室气体排放的影响 [J]. *草业学报*, 2021, **30** (5): 25-33.
- Zhang X L, Zhang Y T, Liu R, *et al.* Effects of green manure return regimes on soil greenhouse gas emissions [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30** (5): 25-33.
- [35] Wildung R E, Garland T R, Buschbom R L. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, **7** (6): 373-378.
- [36] Abdalla M, Hastings A, Cheng K, *et al.* A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity [J]. *Global Change Biology*, 2019, **25** (8): 2530-2543.
- [37] De Notaris C, Mortensen E Ø, Sørensen P, *et al.* Cover crop mixtures including legumes can self-regulate to optimize N₂ fixation while reducing nitrate leaching [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **309**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107287.
- [38] Hansen S, Frøseth R B, Stenberg M, *et al.* Reviews and syntheses: review of causes and sources of N₂O emissions and NO₃ leaching from organic arable crop rotations [J]. *Biogeosciences*, 2019, **16** (14): 2795-2819.
- [39] White C M, DuPont S T, Hautau M, *et al.* Managing the Trade Off between nitrogen supply and retention with cover crop

- mixtures[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **237**: 121-133.
- [40] Thomas B W, Hao X Y, Larney F J, *et al.* Non-legume cover crops can increase non-growing season nitrous oxide emissions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, **81**(1): 189-199.
- [41] Davis B W, Mirsky S B, Needelman B A, *et al.* Nitrous oxide emissions increase exponentially with organic N rate from cover crops and applied poultry litter[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, **272**: 165-174.
- [42] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, **18**(5): 1-5.
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of temperature on N_2O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, **18**(5): 1-5.
- [43] 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 等. 有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 321-330.
Hou M M, Lv F L, Zhang H T, *et al.* Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N_2O emission in the winter wheat-summer maize rotation system [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 321-330.
- [44] Kandel T P, Gowda P H, Somenahally A, *et al.* Nitrous oxide emissions as influenced by legume cover crops and nitrogen fertilization[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, **112**(1): 119-131.
- [45] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, **53**(5): 977-989.
Zhu X Q, An J, Ma L, *et al.* Effects of different straw returning depths on soil greenhouse gas emission and maize yield [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(5): 977-989.
- [46] Zhou M H, Zhu B, Wang X G, *et al.* Long-term field measurements of annual methane and nitrous oxide emissions from a Chinese subtropical wheat-rice rotation system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **115**: 21-34.
- [47] 韩雪, 陈宝明. 增温对土壤 N_2O 和 CH_4 排放的影响与微生物机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(11): 3906-3914.
Han X, Chen B M. Progress in the effects of warming on soil N_2O and CH_4 emission and the underlying microbial mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(11): 3906-3914.
- [48] 傅志强, 龙攀, 刘依依, 等. 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
Fu Z Q, Long P, Liu Y Y, *et al.* Effects of water and nitrogenous fertilizer coupling on CH_4 and N_2O emission from double-season rice paddy field [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
- [49] 孙海妮, 岳善超, 王仕稳, 等. 有机肥及补充灌溉对旱地农田温室气体排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(5): 2055-2065.
Sun H N, Yue S C, Wang S W, *et al.* Effects of manure and supplementary irrigation on greenhouse gas emission in dryland fields[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(5): 2055-2065.
- [50] 常单娜, 刘春增, 李本银, 等. 翻压紫云英对稻田土壤还原物质变化特征及温室气体排放的影响[J]. *草业学报*, 2018, **27**(12): 133-144.
Chang D N, Liu C Z, Li B Y, *et al.* Effects of incorporating Chinese milk vetch on reductive material characteristics and greenhouse gas emissions in paddy soil [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, **27**(12): 133-144.
- [51] Lee H H, Kim S U, Han H R, *et al.* Mitigation of global warming potential and greenhouse gas intensity in arable soil with green manure as source of nitrogen[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117724.
- [52] Juárez-Hernández S, Pardo C S. Assessing the potential of alternative farming practices for sustainable energy and water use and GHG mitigation in conventional maize systems [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, **22**(8): 8029-8059.
- [53] Qiu W H, Liu J S, Li B Y, *et al.* N_2O and CO_2 emissions from a dryland wheat cropping system with long-term N fertilization and their relationships with soil C, N, and bacterial community[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(8): 8673-8683.
- [54] 王楷, 史雷, 马龙, 等. 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[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 6038-6046.
Wang K, Shi L, Ma L, *et al.* Effects of manure combined chemical fertilizers on soil N_2O emission and microbial characteristics of wheat crop system in northwest arid [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 6038-6046.
- [55] Zhang Y, Liu D H, Jia Z K, *et al.* Ridge and furrow rainfall harvesting can significantly reduce N_2O emissions from spring maize fields in semiarid regions of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **209**, doi: 10.1016/j.still.2021.104971.
- [56] Lv J L, Yin X H, Dorich C, *et al.* Net field global warming potential and greenhouse gas intensity in typical arid cropping systems of China: A 3-year field measurement from long-term fertilizer experiments [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **212**, doi: 10.1016/j.still.2021.105053.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)