

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琄(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	《环境科学》征稿简则(5039)
信息(4782, 4979, 5056)	

黄土高原地区两种土地利用方式 CO₂和N₂O排放特征

韩佳乐^{1,2}, 郝珊^{1,2}, 刘振杰^{1,2}, 张曼^{3*}, 张阿凤^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 为探究黄土高原地区两种不同土地利用方式下二氧化碳(CO₂)和氧化亚氮(N₂O)的排放特征, 在长武黄土高原农业生态试验站, 分别以15 a树龄的果园和麦田为研究对象, 采用静态暗箱-气相色谱法对土壤CO₂和N₂O的排放进行了周年(2017年7月~2018年7月)田间原位观测。试验共设置果园施肥(AF)、果园对照(ACK)、小麦施肥(WF)和小麦对照(WCK)这4个处理。结果表明, 土壤CO₂和N₂O排放随季节变化明显, 降雨和施肥后均出现明显排放峰。AF处理的CO₂和N₂O累积排放量比WF处理高7.14%和461.4%。但ACK的CO₂累积排放量比WCK低10.41%, 而N₂O的累积排放量比WCK高109.5%。果园N₂O的排放通量与表层土壤温度、水分显著正相关($P < 0.01$), 果园和麦田的CO₂排放通量均与表层土壤温度显著正相关($P < 0.05$), 而与表层土壤水分相关性不显著。因此, 田间管理和环境因素综合影响土壤CO₂和N₂O排放, 施肥量和土壤水热是造成两种土地利用方式CO₂和N₂O的排放特征和温室效应差异的主要因素。

关键词: 土地利用方式; 二氧化碳; 氧化亚氮; 土壤养分; 综合温室效应

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-5164-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904206

Characteristics of CO₂ and N₂O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China

HAN Jia-le^{1,2}, HAO Shan^{1,2}, LIU Zhen-jie^{1,2}, ZHANG Man^{3*}, ZHANG A-feng^{1,2*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To evaluate the emission characteristics of carbon dioxide (CO₂) and nitrous oxide (N₂O) in the Loess Plateau, a field in situ study was conducted from July 2017 to July 2018 under two land-use types (15 year old apple orchard and wheat field) using static chamber-gas chromatographic techniques. Four treatments were conducted in this experiment as follows: apple orchard with fertilization (AF), apple orchard without fertilization (ACK), wheat field with fertilization (WF), and wheat field without fertilization (WCK). The results showed that CO₂ and N₂O emissions varied significantly with the season, and the emission peaks appeared after rainfall and fertilization. The cumulative amount of CO₂ and N₂O emissions from the AF treatment were 7.14% and 461.4% higher than that of the WF treatment, respectively. However, the cumulative amount of CO₂ emissions under the ACK treatment was 10.41% lower than that of the WCK treatment, whereas the cumulative amount of N₂O emissions was 109.5% higher than that of the WCK treatment. The N₂O emission flux from the orchard was significantly positively correlated with soil temperature and moisture ($P < 0.01$). The CO₂ emission fluxes from the orchard and wheat field were significantly positively correlated with topsoil temperature ($P < 0.05$) but were not correlated with topsoil moisture. Thus, the combination of field management and environmental factors affected soil CO₂ and N₂O emissions. The fertilizer regime and soil hydrothermal conditions were the main factors influencing the characteristics of CO₂ and N₂O emissions under different land-use types.

Key words: land use patterns; carbon dioxide; nitrous oxide; soil nutrient; global warming potential

大气中温室气体浓度的升高是全球气候变化的主要原因, 人类活动是导致温室气体浓度增加的主要因素^[1]。农业生产在全球是一种主要的、规模庞大的人类活动, 农田土壤也是重要的温室气体源汇^[2], 占据全球人为活动产生温室气体的50%^[3]。Schaufler等^[4]在欧洲对不同土地利用类型的研究表明, 土地利用方式是土壤温室气体排放通量的一大影响因素, Snyder等^[5]的研究也表明, 土地利用方式变化是温室气体浓度增加的重要原因之一, 仅次于化石能源燃烧所造成的温室效应。农田不同土地利用方式的作物类型^[6], 根系密度, 养分输入^[7]以

及管理方式^[8]均有很大不同, 环境因素和生物因素也将随着土地利用方式的变化而改变^[9], 导致土壤中碳氮循环过程发生变化, 从而影响了土壤温室气体的排放。

黄土高原位于中国西北部, 是我国典型的干旱

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200106); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601321); 中国科学院“西部青年学者”B类项目(XAB2016B09); 西北农林科技大学基本科研业务费专项(2452017188)

作者简介: 韩佳乐(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为果园氮素循环与温室气体, E-mail: hanjiale730@163.com

* 通信作者, E-mail: zmccoco0203@nwsuaf.edu.cn; zhangafeng@nwsuaf.edu.cn

半干旱地区，主要农地利用方式为草地、林地、耕地和园地。20 世纪 70 年代起黄土高原地区土地利用方式发生了很大变化，到 2015 年黄土高原地区已成为中国苹果主产区之一，栽培面积达到 130 万 hm^2 ，占全国苹果栽培总面积的 60%^[10]。陕西省长武县王东沟是典型的耕地向果园流转的地区^[11,12]，1986~2006 年 20 年间，黄土高原王东沟流域耕地减少 175.17 hm^2 ，占总面积的比例由 32.85% 下降到 11.75%；果园面积由 27.4 hm^2 增加到 225.3 hm^2 ，占总面积的比例由 3.30% 增长到 27.14%^[12]，果园已成为该地区的主要土地利用类型。有研究表明，王东沟的果园全氮、土壤水分、土壤微生物量碳和土壤酶活性大于农田，但有机碳含量略小于农田^[13]，果园和农田土壤性质的差异可能会引起该地区两种土地利用方式下温室气体排放的差异。在黄土高原地区展开不同土地利用方式下温室气体排放的特征的研究，是评估该地区农用地流转对气候变化影响的重要基础。

针对黄土高原地区土地利用方式变化的特点，本文以长武县王东沟流域麦田和果园为研究对象，探究麦田向果园流转后温室气体的排放特征变化以及综合温室效应变化，以期为评估麦田转向果园种植后的温室效应提供数据支持，也为减少温室气体排放方案提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 1.1 试验地概况

试验区位于中国科学院水利部水土保持研究所长武黄土高原农业生态试验站，东经 107°41′，北纬 35°14′。该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候，年均降雨量 582 mm，集中在 7~9 月，年均气温 9.1℃，地下水位 50~80 m，年蒸发量高达 1 565 mm，属于典型的旱作农业区。该区域地带性土壤为黑垆土，土质均匀疏松，表层土壤(0~10 cm)基本

理化性质如表 1。试验地气象资料获取自陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站，试验期间降雨和气温情况如图 1。

表 1 试验地表层土壤(0~10 cm)基础理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of topsoil (0-10 cm)					
作物类型	土壤容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	pH	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	矿质氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
苹果	1.29	8.55	14.44	1.30	33.22
小麦	1.27	8.52	12.58	0.96	4.63

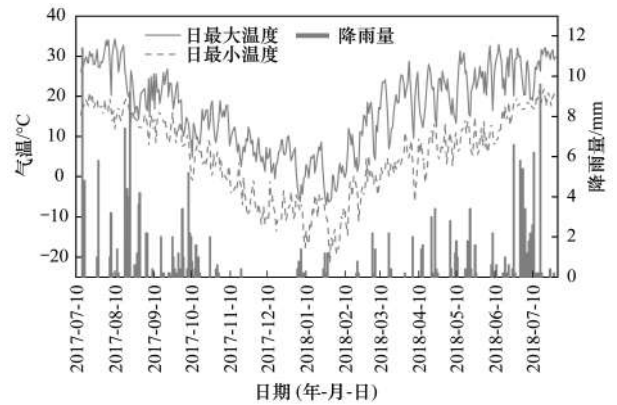


图 1 试验区降雨量和气温动态变化

Fig. 1 Rainfall and temperature in the experimental area

1.2 试验设计

本试验于 2017 年 7 月~2018 年 7 月进行，选取具有代表性的传统麦田和种植密度一致的 10~15 a 树龄的果园，全年均无灌溉。所选传统麦田为长武试验站长期定位试验田，种植作物为冬小麦，品种为长旱 58；果园种植苹果前种植作物为小麦和玉米，苹果品种为红富士 (*Malus pumila* Mill)。试验共设置果园施肥 (AF)、果园对照 (ACK)、小麦施肥 (WF) 和小麦对照 (WCK) 这 4 个处理，每个处理设置 3 次重复。试验期间果园共施肥 3 次，采用条沟施肥方式，在距果树一侧 1 m 的位置开沟 (沟宽约 30 cm，沟深约 20 cm) 撒入肥料后与土壤混匀填埋，麦田施肥采用撒施，具体施肥情况如表 2。

表 2 不同日期试验区施肥情况

Table 2 Fertilization in the experimental area on different dates									
作物类型	N/kg·hm ⁻²			P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²			K ₂ O/kg·hm ⁻²		
	2017-11-04	2018-04-05	2018-07-14	2017-11-04	2018-04-05	2018-07-14	2017-11-04	2018-04-05	2018-07-14
苹果	487.48	347.98	337.48	194.99	—	93.75	487.48	—	412.29
小麦	70.00	70.00	—	—	—	—	—	—	—

1.3 样品采集与测定

采用静态暗箱-气相色谱法定期监测果园和麦田 CO₂ 和 N₂O 排放，采样箱体由 PVC 材料制成，分顶箱和底座两部分。顶箱规格为 50 cm×50 cm×50 cm，箱内安装风扇以混匀气体。底座有高 3 cm 的水槽用于注水，密封箱体。底座安置于各试验小

区，果园内采样箱布置于施肥条沟 (距果树 1 m) 和果树间无肥区域 (如图 2)，麦田采样箱布置于施肥小区和无肥小区 (如图 3)。每 7 d 采集一次样品，采样时间为上午 08:00~11:00，箱体密封后在 0、10、20 和 30 min 分别用注射器采集 4 个连续样品，密封保存在玻璃瓶中带回实验室测定。采集气体样

品的过程中同步测定采样箱内的温度、气温、0~10 cm 的地温。如遇施肥则需加密采样,施肥后的第 1 d 开始连续隔天采样,持续 7~10 d。采集的样品应在 24 h 内用气相色谱仪(安捷伦 7890A)测定 CO_2 和 N_2O 气体浓度, CO_2 使用 FID 检测器,温度为 200℃, N_2O 使用 ECD 检测器,温度为 300℃,色谱柱为 80/100 目的 SS-2 m×2 mm Porapak Q,用体积分数为 5% 的氩甲烷作为载气,流速为 $40 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。气体排放通量由 4 个气体样品的浓度值和采样时间经过线性回归方程的斜率得出, CO_2 和 N_2O 的排放通量根据 3 个重复平均所得。由于果

园采用条沟施肥, AF 的 CO_2 和 N_2O 的累积排放量通过加权平均求得, ACK、WF 和 WCK 的 CO_2 和 N_2O 的累积排放量仅由 3 个重复平均求得。

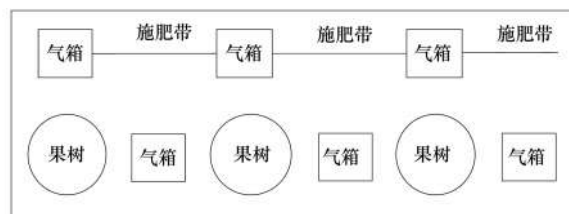


图 2 果园静态暗箱装置布置示意

Fig. 2 Schematic diagram of static chamber device arrangement in orchard

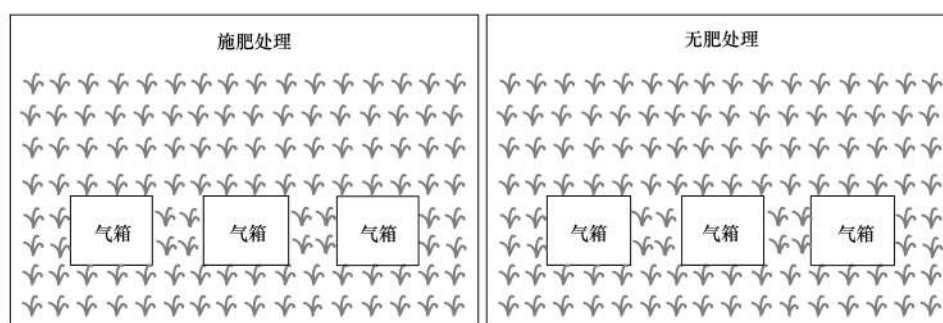


图 3 麦田静态暗箱装置布置示意

Fig. 3 Schematic diagram of the static chamber device arrangement in the wheat field

本试验期间土壤采集与气体采集同步进行,每次收集气体后,用直径 5 cm 的土钻多点采样,烘干法测定土壤含水量。布置试验前和试验结束后在试验区内多点采集 0~10 cm 土层土样,形成混合土样带回实验室分析硝、铵态氮($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液作为浸提液,土水比 1:10, AA3 连续流动分析仪测定);全氮(半微量开氏法,开氏定氮仪测定);有机质(重铬酸钾容量法);土壤 pH 值(土:去离子水=1:5)。

1.4 气体指标计算

1.4.1 CO_2 和 N_2O 浓度和排放通量的计算

使用气相色谱仪测得样品的气体峰面积 A_s 后,采用以下公式计算出样品的气体含量 c_s (CO_2 : $\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$; N_2O : $\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$):

$$c_s = \frac{A_s \times c_o}{A_o}$$

式中, c_o 为标准气样含量 (CO_2 : $499.5 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$; N_2O : $365 \mu\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$); A_o 为标准气样所测峰面积。

气体排放通量由 4 个连续样品浓度的斜率线性回归分析得出。排放通量计算公式为:

$$F = \frac{M}{22.4} \times H \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中, F 表示 CO_2 排放通量 [以 C 计, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 或 N_2O 排放通量 [以 N 计,

$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; M 表示 CO_2 -C 和 N_2O -N 中含 C 或 N 的摩尔质量,分别为 $12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; H 为采样箱的有效高度 (m); dc/dt 为气体排放速率,即每次 4 个时间 (0、10、20 和 30 min) 采集的 4 个样品的气体含量与时间进行一次线性回归所得的回归方程系数; T 为采样时箱内的平均气温 (℃)。

1.4.2 CO_2 和 N_2O 累积排放量的计算

气体累积排放量的计算公式如下:

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

$$G_{\text{CO}_2} = \frac{\bar{F} \times 24 \times d}{100}$$

$$G_{\text{N}_2\text{O}} = \frac{\bar{F} \times 24 \times d}{100\,000}$$

式中, G_{CO_2} 为 CO_2 排放总量 (以 C 计, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), $G_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 排放总量 (以 N 计, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); F_i 为第 i 次采样时气体排放通量 [CO_2 以 C 计, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, N_2O 以 N 计, $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; d_i 为第 i 次采样至下一次采样的间隔天数; d 为总天数, 100 和 100 000 分别为 CO_2 和 N_2O 的单位转换系数。

施肥果园 (AF) 的 CO_2 和 N_2O 的累积排放量由 AF 和 ACK 的累积排放量分别乘施肥和无肥面积的权重加和得到, ACK 的累积排放量不使用面积权重。

1.4.3 N₂O 排放系数计算

$$EF_d = \frac{F_N - F_{CK}}{N} \times 100\%$$

式中, EF_d 为 N₂O 的排放系数 (%), F_N 和 F_{CK} 分别为施肥和不施肥处理 N₂O 排放总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N 为氮肥施用量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

1.4.4 CO₂ 和 N₂O 增温潜势 (GWP) 计算

增温潜势 (GWP) 的计算公式如下:

$$GWP = R_{\text{CO}_2} + 298 R_{\text{N}_2\text{O}}$$

式中, $R_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N₂O 的累积排放量 (以 N 计 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); R_{CO_2} 为 CO₂ 累积排放量 (以 C 计, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $GWP_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N₂O 增温潜势; GWP_{CO_2} 为 CO₂ 增温潜势, 在 100 a 的时间尺度下, N₂O 的增温潜势是 CO₂ 的 298 倍.

1.5 数据处理

采用 Microsoft excel 2016 进行数据处理, 使用

SPSS 22.0 对 CO₂ 和 N₂O 排放通量与表层土壤温度、含水量和硝态氮含量分析, 比较不同处理 CO₂ 和 N₂O 累积排放量的差异显著性 (LSD 法). 使用 Origin 2018 进行作图.

2 结果与分析

2.1 果园和麦田的土壤理化性质

本试验期间, 该地最高气温、最低气温和平均气温分别为: 34.3、-21.4 和 10.4℃, 总降水量为 685.6 mm (图 1). 表层 (0~10 cm) 土壤温度的总体变化趋势一致, 受气温和降水影响, 季节性变化明显, 变化幅度均为 26.1℃ (图 4), 果园和麦田土壤平均温度分别为 13.5℃ 和 14.5℃, 麦田略高于果园. 果园和麦田土壤水分变化趋势大致相同, 受降雨影响而产生明显波动, 变化范围分别为 11.7%~26.0% 和 7.7%~24.7% (图 5).

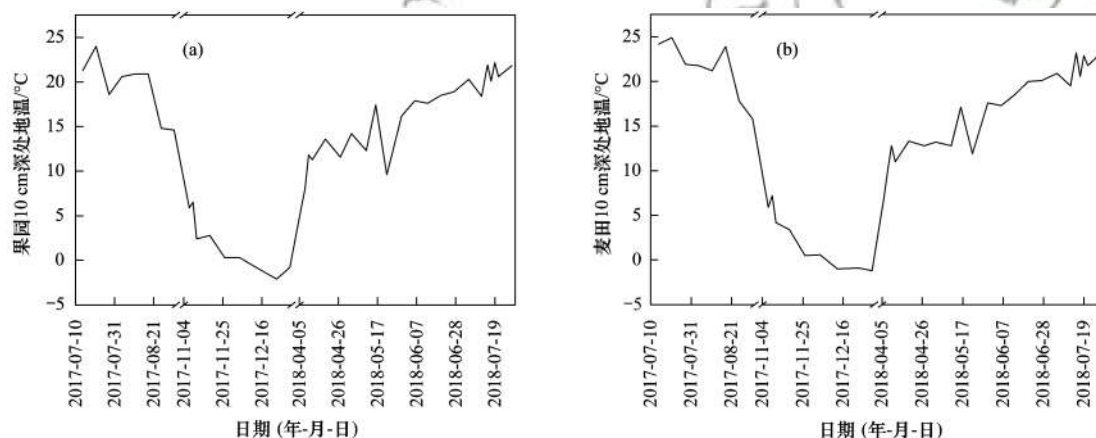


图 4 果园和麦田土壤表层 (0~10 cm) 温度动态变化

Fig. 4 Dynamic change of soil surface (0-10 cm) temperature in the apple orchard and wheat field

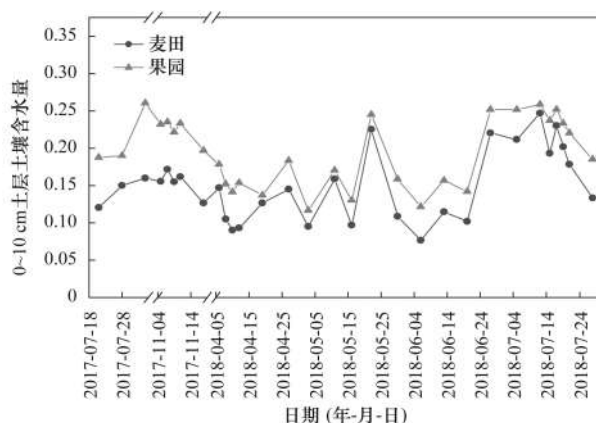


图 5 果园和麦田土壤表层 (0~10 cm) 含水量

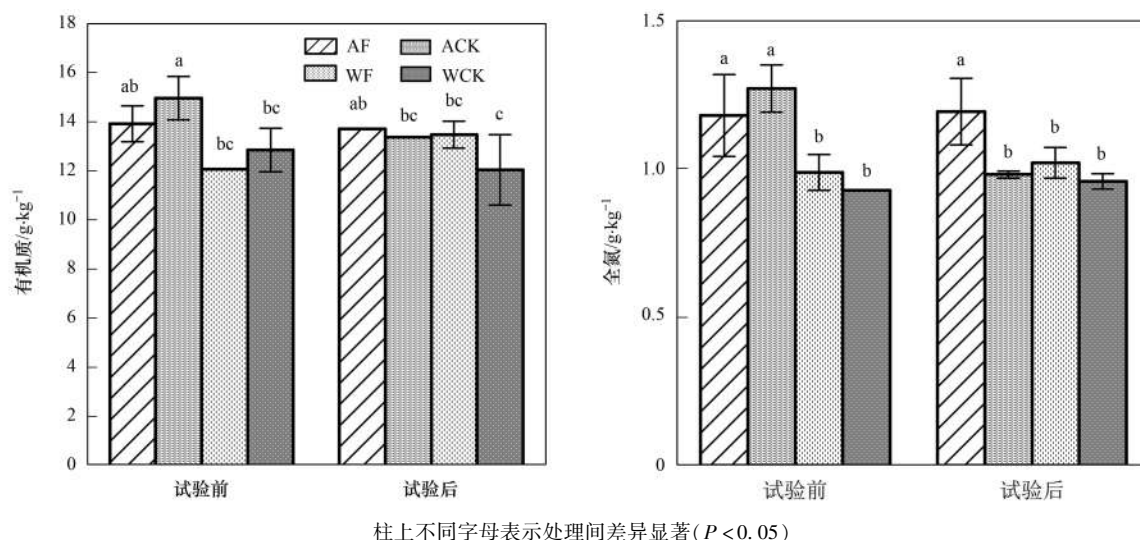
Fig. 5 Soil surface layer (0-10 cm) water content in the apple orchard and wheat field

如图 6, 各处理表层土壤全氮和有机质含量试验前后有动态变化, 本试验初期果园土壤全氮和有机质含量均高于麦田. 试验进行 1 a 后, AF 和 WF

土壤全氮和有机质含量均升高, ACK 和 WCK 土壤全氮和有机质含量均降低. 并且, 果园施肥处理 (AF) 的土壤全氮和有机质含量高于麦田 (WF), 果园无肥处理 (ACK) 的土壤全氮和有机质含量则与麦田相近 (WCK).

2.2 果园和麦田 CO₂ 排放特征

由图 7 可知, 无论果园和麦田, 各处理 CO₂ 排放通量变化趋势总体一致, 施肥处理高于无肥处理, 且春夏季排放旺盛, 11 月土壤冻结后排放减弱. AF、ACK、WF 和 WCK 的 CO₂ 排放通量变化范围分别为: 6.29~192.37、3.76~157.19、2.30~102.57 和 7.37~105.15 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 平均排放通量 $\text{AF} > \text{WF} > \text{WCK} > \text{ACK}$. 2017 年 11 月 4 日施肥后, 第 2 d AF 处理 CO₂ 排放通量达到峰值 [$48.83 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 后迅速回落; WF 处理的 CO₂ 排放变化较小, 于施肥后第 5 d 达到排放峰 [$34.73 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 后降低. 2018 年 4 月 5 日施



柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图6 试验前后各处理表层土壤有机质和全氮含量

Fig. 6 Content of organic matter and total nitrogen in topsoil before and after the experiment

肥后 3~5 d 内 AF 和 WF 的 CO_2 排放逐渐增加, AF 的 CO_2 在施肥后第 5 d 达到排放峰值 [$30.18 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 后下降, WF 处理的 CO_2 在施肥后第 5~7 d 保持在 $40 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右. 2018 年 7 月 14 日施肥后果园的 CO_2 排放通量均持续升高, 于第 7 d 达到排放峰值 [$192.37 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 一周后回落到较低水平, 而此时麦田无作物, WF 和 WCK 处理 CO_2 排放较低. 每次施肥后 AF 和 WF 的 CO_2 排放峰值分别占各自年累积排放量的 1.93% 和 1.13%.

2.3 果园和麦田 N_2O 排放特征

由图 7 可看出, 果园和麦田 N_2O 排放通常比较稳定, 仅在施肥和降雨后出现脉冲式上升, 果园最为明显. 本研究期内, 各处理 N_2O 排放通量变化范围分别为: AF 处理 $-6.58 \sim 677.49 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, ACK 处理 $-30.89 \sim 125.59 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, WF 处理 $-13.99 \sim 80.08 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, WCK 处理 $-11.32 \sim 56.02 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 各处理的平均排放通量大小顺序为 $\text{AF} > \text{ACK} > \text{WF} > \text{WCK}$. 2017 年 11 月 4 日施肥后果园的 N_2O 排放先升高后降低, 第 3 d 达到排放高峰 [$17.11 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], WF 处理施肥后 N_2O 排放一直缓慢升高, 第 7 d 达到最高 [$16.24 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. WCK 的 N_2O 排放未出现明显变化. 2018 年 4 月 5 日施肥后 AF 的 N_2O 排放显著高于其他处理, 第 5 d 达到排放峰值 [$51.97 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], WF 处理施肥后 N_2O 排放一直缓慢升高, 第 7 d 达到最高 [$29.8 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 后开始下降, WF 处理 N_2O 排在施肥后 7 d 内持续升高但排放量比 AF 小, 第 7 d 升高至 $29.80 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. WCK 处理 N_2O 排放平稳, 无明显变化. 2018 年 7 月

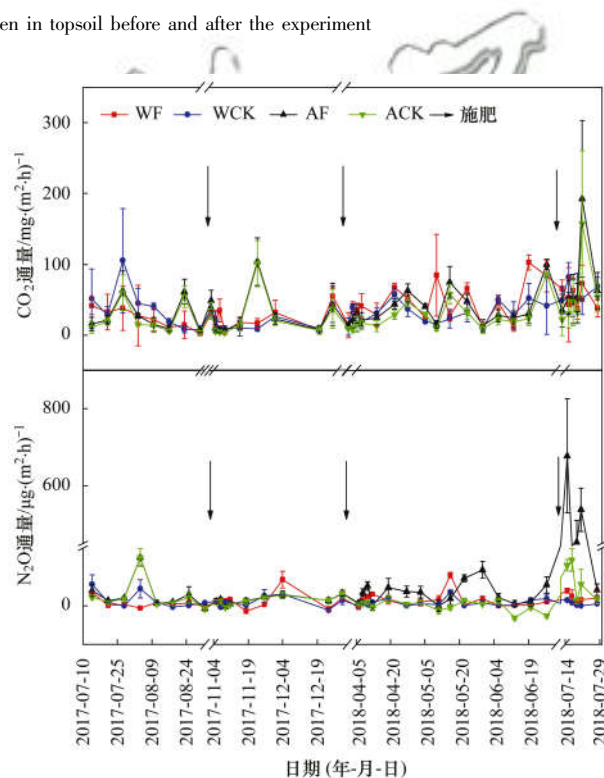


图7 苹果园和麦田中土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量

Fig. 7 Soil CO_2 and N_2O emission fluxes from the apple orchards and wheat fields

14 日施肥后第 2 d AF 处理 N_2O 通量出现极高的排放峰 [$677.49 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 随后 1 d 有所下降, 第 3~7 d 继续缓慢上升. WF 和 WCK 两个麦田处理的 N_2O 排放通量均显著低于 AF 处理, WF 处理在施肥后第 1~3 d N_2O 排放升高, 达到 $39.49 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 施肥后土壤 N_2O 排放对年累积排放的贡献较大, AF 和 WF 在 3 次施肥后 N_2O 的排放峰值分别占全年累积排放的 2.85% 和 1.83%.

2.4 土壤理化性质对 CO_2 和 N_2O 排放的影响

通过分析土壤含水量、温度与 CO_2 和 N_2O 排

放的相关性得知(表3):各处理 CO₂ 和 N₂O 的排放通量与表层地温和土壤含水量均呈正相关关系. 麦田中 WF 和 WCK 的 CO₂ 通量与气温、地温分别呈显著($P < 0.05$)和极显著正相关($P < 0.01$), 但与土壤含水量均无显著相关性. 果园中 AF 和 ACK 的 CO₂ 排放通量仅与表层地温显著相关($P < 0.05$). 果园 N₂O 排放通量与气温、地温和含水量均呈显著相关性, 其中 AF 的 N₂O 排放通量与气温、表层地温和含水量均极显著正相关($P < 0.01$); ACK 的 N₂O 排放通量与气温、表层地温显著相关($P < 0.05$), 与土壤含水量极显著相关($P < 0.01$). WF 和 WCK 的 N₂O 排放通量与气温、表层地温和含水量在 0.01 和 0.05 水平下均未体现出显著相关性. 为进一步说明各土壤理化性质对 CO₂ 和 N₂O 排放的相对贡献, 对 CO₂ 和 N₂O 的排

放量分别与气温、土壤含水量和土壤温度进行逐步回归分析, 除 WF 外各处理 N₂O 的排放均得出相应的逐步回归方程(表4). AF、ACK 和 WCK 的 CO₂ 排放通量的回归方程中只含表层土壤温度, R^2 分别为 0.155、0.153 和 0.412, 标准系数分别为 0.394、0.391 和 0.642; WF 的 CO₂ 排放通量的回归方程中只含气温, R^2 为 0.229, 标准系数为 0.479. AF 和 ACK 的 N₂O 排放通量主要受土壤温度和土壤含水量影响, AF 处理中土壤温度和土壤含水量的标准化系数分别为 0.483 和 0.460, 土壤温度对 N₂O 排放影响更大; ACK 处理土壤温度和土壤水分的标准化系数分别为 0.352 和 0.486, 土壤水分对 N₂O 排放的影响更大. WCK 的回归方程 $P > 0.05$, 气温对其 N₂O 排放的影响未达到显著水平.

表 3 表层土壤理化性质与 CO₂ 和 N₂O 排放相关分析 ($n=30$)¹⁾

处理	CO ₂			N ₂ O		
	气温	地温	含水量	气温	地温	含水量
AF	0.357	0.394 *	0.247	0.503 **	0.512 **	0.491 **
ACK	0.335	0.391 *	0.247	0.367 *	0.383 *	0.508 **
WF	0.479 *	0.428 *	0.327	0.250	0.173	0.013
WCK	0.565 **	0.642 **	0.352	0.327	0.253	0.014

1) * * 表示在 0.01 水平下极显著相关; * 表示在 0.05 水平下显著相关

表 4 表层土壤理化性质与 CO₂ 和 N₂O 排放的逐步回归分析¹⁾

Table 4 Stepwise regression analysis of physical and chemical properties of surface soil and CO ₂ and N ₂ O emissions						
温室气体	处理	逐步回归方程	R^2	F	P	标准系数
CO ₂	AF	$y_1 = 8.507 + 2.246x_2$	0.155	5.147	0.031	x_2 : 0.394
	ACK	$y_1 = 3.310 + 1.885x_2$	0.153	5.048	0.033	x_2 : 0.391
	WF	$y_1 = 15.632 + 1.579 x_1$	0.229	8.337	0.007	x_1 : 0.479
	WCK	$y_1 = 1.338 + 2.285 x_2$	0.412	19.631	0.000	x_2 : 0.642
N ₂ O	AF	$y_2 = -445.260 + 14.008x_2 + 1.834.037x_3$	0.473	12.106	0.000	x_2 : 0.483, x_3 : 0.460
	ACK	$y_2 = -88.974 + 2.117 x_2 + 401.78 x_3$	0.382	8.330	0.002	x_2 : 0.352, x_3 : 0.486
	WF	—	—	—	—	—
	WCK	$y_2 = 0.861 + 0.47 x_1$	0.107	3.347	0.078	x_1 : 0.327

1) y_1 表示 CO₂ 排放通量; y_2 表示 N₂O 排放通量; x_1 表示气温; x_2 表示表层土壤温度; x_3 表示表层土壤含水量

2.5 果园和麦田中 CO₂ 和 N₂O 的综合温室效应

为评估该地区果园代替麦田后, 温室气体排放对气候变化的效应, 分别计算各处理 CO₂ 和 N₂O 的累积排放量和综合温室效应 (GWP) 以及 N₂O 的排

系数(表5). 在果园和麦田中 CO₂ 和 N₂O 为主要的温室气体, 通过差异显著性分析表明果园 (AF) 的 CO₂ 和 N₂O 累积排放量均高于麦田处理, 而果园对照 (ACK) 的 CO₂ 低于麦田, N₂O 高于麦田. 各处理

表 5 果园和麦田 CO₂ 和 N₂O 年累积排放量、排放系数及增温潜势¹⁾

Table 5 Annual cumulative emissions, emission factors and warming potential of CO ₂ and N ₂ O in the apple orchards and wheat fields				
处理	CO ₂ 累积排放量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O 累积排放量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放系数 /%	CO ₂ 和 N ₂ O 增温潜势 /kg·hm ⁻²
AF	3 375.04 ± 50.83 a	6.28 ± 0.36 a	0.40	5 246.48 ± 158.11 a
ACK	2 673.31 ± 119.16 c	1.54 ± 0.03 b	—	3 132.23 ± 128.10 b
WF	3 150.18 ± 203.42 ab	1.12 ± 0.03 c	0.27	3 483.94 ± 212.36 b
WCK	2 951.69 ± 261.45 bc	0.74 ± 0.06 d	—	3 172.21 ± 279.33 b

1) 同一列标注不同小写字母的表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); CO₂ 和 N₂O 累积排放量分别以 C 和 N 计

CO₂ 累积排放量的大小关系为 AF > WF > WCK > ACK; 各处理N₂O气体累积排放量的大小关系为 AF > ACK > WF > WCK. 通过计算果园和麦田 CO₂ 和 N₂O的增温潜势, 发现果园总体增温潜势显著高于麦田, 各处理增温潜势大小关系为: AF > WF > WCK > ACK, 麦田改种苹果后大幅增加了农田温室效应. AF 的N₂O排放系数高于 WF, 分别为 0.40% 和 0.27%.

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对 CO₂ 排放的影响

两种土地利用方式下的土壤 CO₂ 排放具有不同的特征, 排放量差异显著. 果园 CO₂ 排放量高且波动较大, 麦田排放量低且相对稳定, 这与 Wang 等^[13]的研究结果一致. 其中 AF 的 CO₂ 排放显著高于 WF, 但 ACK 的 CO₂ 排放低于 WCK. AF 排放高于麦田与其高施肥量有关, 如图 8 所示, CO₂ 的累积年排放与年施氮量存在一定的正相关关系, 与前人研究结果一致^[14]. 这一方面是因为土壤呼吸排放的 CO₂ 中有 30% ~ 50% 来自于作物根系活动或自养呼吸作用, 肥料的施用增加了土壤矿质氮等养分的含量, 促进了作物根系呼吸^[15]; 另一方面, 土壤微生物异养呼吸作用也是土壤 CO₂ 主要来源^[16], 长期施用化肥保证了土壤有机质含量, 充足的有机质可为微生物活动提供底物, 进而促进了土壤微生物活性, 增加土壤 CO₂ 排放, 所以土壤氮素可能是造成不同土地利用方式 CO₂ 排放差异的主导因素. 随有机质含量升高各处理 CO₂ 累积排放量也升高, 土壤有机质含量的变化是影响土壤 CO₂ 排放的因素之一^[17,18]. 造成两种土地利用方式有机质含量差异的原因一方面果园表层土壤的枯枝落叶丰富, 且果树根系生长发达, 根系分泌物也较多, 使有机质得到累积; 另一方面, 麦田翻耕可使土壤有机质的分解速率加快, 促进了碳的分解^[19]. 但本研究中, 除 AF 和 WCK 外, 各处理的有机质含量差异不显著, 所以单以有机质含量并不能完全解释两种土地利用方式下土壤 CO₂ 排放的差异.

两种土地利用方式表层土壤平均温度麦田高于果园 1℃, 平均土壤充水孔隙度果园 (48.84%) 高于麦田 (36.57%), 果园和麦田的 CO₂ 通量与水分无显著相关性 (表 3 和表 4), 而与地温相关性显著 ($P < 0.05$). 说明土壤水分在各因素综合影响土壤 CO₂ 排放的过程中并未起到主导作用, 而且土壤水分变化未超出极端范围则难以观测水分对土壤呼吸的影响^[20]. 程建中等^[21] 也认为, 土壤湿度和 CO₂ 排放通量之间无显著相关性. 有研究发现旱地对温

度的敏感性高于果园^[13,22], 这可能是 WF 和 WCK 的 CO₂ 通量与气温显著相关的原因. 由相关性分析 (表 3) 和逐步回归分析 (表 4) 可知, 麦田改果园后土壤 CO₂ 排放受温度的影响有所减弱.

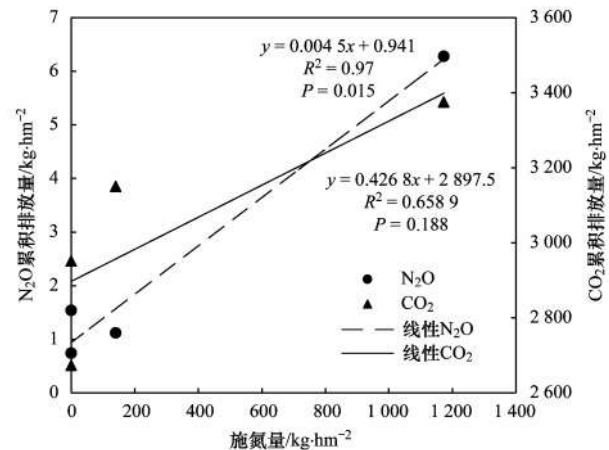


图 8 CO₂ 和 N₂O 累积年排放与年施氮量的线性相关

Fig. 8 Linear correlation between cumulative annual emissions of CO₂ and N₂O and annual nitrogen application rate

3.2 不同土地利用方式对 N₂O 排放的影响

不同土地利用方式的植被和管理措施不同, 通过影响土壤水分, 理化性质, 硝化和反硝化过程来改变土壤 N₂O 排放特征, 该研究果园的表层土壤有机质、全氮、含水量和矿质氮含量都高于麦田, 各处理的 N₂O 累积年排放量均存在显著差异 ($P < 0.05$, 表 4), 其中果园排放高于麦田. Pang 等^[23] 在黄土高原果园的研究结果表明, 夏季施用氮肥和降雨后发生 N₂O 脉冲式排放, 果园土壤 N₂O 排放显著高于麦田, 林杉等^[24] 的研究结果也表明果园的 N₂O 排放高于旱地, 这与本研究得到的结果一致. 土壤释放的 N₂O 主要是氮素在微生物作用下的硝化和反硝化过程产生^[25], 土壤中氮的富集与人为活动密切相关, 施氮肥是补充土壤氮的主要途径^[5], 果园年施氮量 (1172.95 kg·hm⁻²) 远高于麦田 (140.0 kg·hm⁻²), 因而 AF 处理全氮和矿质氮含量比麦田高. 土壤氮素除依靠施肥补充外还与动植物残体的分解有关, 果园土壤表层的枯枝落叶是土壤氮素的来源之一, 因而也是造成果园和麦田氮素累积量差异的关键因素之一. 此外, 由于果园高施氮量使可供微生物利用的底物充足, 使得微生物活性增强, 促使 N₂O 的排放大幅升高^[26], 使 AF 处理的 N₂O 排放显著高于其他 3 个处理. Shi 等^[15] 的研究表明, N₂O 的排放随有机质和全氮含量的增加而增加. 本研究中各处理土壤有机质含量差异较小, 但果园土壤的矿质氮含量明显高于麦田, 故认为导致果园与麦田 N₂O 排放差异的关键因素是土壤氮素

含量。

果园 N₂O 的排放系数为 0.40%，麦田 N₂O 的排放系数为 0.27%，均低于全球平均水平 1.16%^[27]。Lin 等^[28]的研究表明随施氮量的增加 N₂O 的排放也会增加，本研究中果园氮肥施用量大，导致硝化和反硝化反应加速而使得更多的氮素以气体形式损失，所以果园 N₂O 的排放系数高于麦田。

不同土地利用方式下土壤水分和温度也有一定的差异，目前对于温度和水分限制温室气体排放的研究结果不尽相同，尤其是在干旱和半干旱地区^[29,30]，有人发现将土壤温度和水分结合能更好地解释温室气体通量变化^[15]。黄土高原地区农业类型主要为雨养农业，果园和麦田的表层土壤水分受降雨影响较大，两种土地利用方式的年降雨量一致，但果园表层土壤水分高于麦田。这可能是与麦田的翻耕使土壤结构发生变化，导致表层土壤水蒸发速率加快有关。也可能是麦田夏季休闲期无植被覆盖，土壤水分蒸发比果园强，且易形成地表径流。本研究果园的 N₂O 通量与地温、水分均表现出显著相关性，而麦田 N₂O 通量与土壤温度和水分均未表现出显著相关性(表 3 和表 4)。果园(13.5℃)和麦田(14.5℃)年平均地温差异不显著，而平均土壤孔隙含水率果园(48.84%)比麦田(36.57%)高 33.55%，因此认为该研究中土壤水分也是造成两种土地利用方式 N₂O 排放差异的关键因素。

4 结论

黄土高原地区果园和麦田的 CO₂ 和 N₂O 的排放通量随季节变化明显，春夏季排放旺盛，秋冬季排放较弱。果园的 N₂O 排放比麦田更易受气温、地温和土壤含水量的影响；麦田 CO₂ 的排放受气温和地温影响明显，但与土壤水分相关性不显著，而果园 CO₂ 排放只与地温相关性较强。一定范围内有机质含量、氮素含量和施氮量与 CO₂ 和 N₂O 的排放具有正相关关系。两种土地利用方式下的植被和田间管理措施不同，造成果园和麦田表层土壤水分、温度、有机质和氮素含量不同，导致了果园和麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放差异。综合来看施肥果园的温室气体排放通量、累积排放量和增温潜势显著高于麦田，会引起更强的温室效应。

参考文献:

- [1] 胡祖恒, 徐忠峰, 马柱国. 欧洲地区不同温室气体背景下土地利用/覆盖变化的气候效应[J]. 气候与环境研究, 2018, **23**(2): 176-184.
Hu Z H, Xu Z F, Ma Z G. The impact of land use/land cover changes under different greenhouse gas concentrations on climate in Europe[J]. Climatic and Environmental Research, 2018, **23**
- (2): 176-184.
- [2] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, **514**(7523): 486-489.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535.
- [4] Schaufler G, Kitzler B, Schindlbacher A, *et al.* Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature [J]. European Journal of Soil Science, 2010, **61**(5): 683-696.
- [5] Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, *et al.* Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, **133**(3-4): 247-266.
- [6] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. Biogeochemistry, 2000, **48**(1): 71-90.
- [7] Gu J X, Zheng X H, Wang Y S, *et al.* Background nitrous oxide emissions from croplands in China in the year 2000 [J]. Plant and Soil, 2009, **320**(1-2): 207-220.
- [8] Flechard C R, Neftel A, Jocher M, *et al.* Bi-directional soil/atmosphere N₂O exchange over two mown grassland systems with contrasting management practices [J]. Global Change Biology, 2010, **11**(12): 2114-2127.
- [9] Wang G X, Ma H Y, Qian J, *et al.* Impact of land use changes on soil carbon, nitrogen and phosphorus and water pollution in an arid region of northwest China [J]. Soil Use and Management, 2004, **20**(1): 32-39.
- [10] Wang R, Guo S L, Jiang J S, *et al.* Tree-scale spatial variation of soil respiration and its influence factors in apple orchard in Loess Plateau [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, **102**(2): 285-297.
- [11] 李志, 刘文兆, 杨勤科, 等. 黄土沟壑区小流域土地利用变化及驱动力分析[J]. 山地学报, 2006, **24**(1): 27-32.
Li Z, Liu W Z, Yang Q K, *et al.* Dynamic change of land use in Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2006, **24**(1): 27-32.
- [12] 张嘉宁, 王继军. 黄土高原沟壑区王东沟流域土地利用/覆被变化过程初探 [J]. 中国农学通报, 2009, **25**(6): 231-235.
Zhang J N, Wang J J. Research on land use and cover change in Wangdonggou watershed on regional gully watershed on Loess Plateau [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, **25**(6): 231-235.
- [13] Wang R, Sun Q Q, Wang Y, *et al.* Contrasting responses of soil respiration and temperature sensitivity to land use types: Cropland vs. apple orchard on the Chinese Loess Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2018, **621**: 425-433.
- [14] 张志栋, 刘景辉, Yu Q, 等. 施肥对旱作免耕土壤酶活性与 CO₂ 排放量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, **28**(5): 85-91.
Zhang Z D, Liu J H, Yu Q, *et al.* Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and soil CO₂ emission under no-tillage on dry land in farming-pastoral zone of northern China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, **28**(5): 85-91.
- [15] Shi W Y, Yan M J, Zhang J G, *et al.* Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration [J]. Atmospheric Environment, 2014, **88**: 74-82.

- [16] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, *et al.* Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, **23**(7): 1402-1407.
- [17] 龚振平, 王雪松, 宋秋来, 等. 不同有机质含量土壤 CO₂ 排放季节变化规律及差异研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, **47**(3): 31-37.
Gong Z P, Wang X S, Song Q L, *et al.* Study on seasonal variation of soil carbon dioxide emissions under different contents of soil organic matter[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, **47**(3): 31-37.
- [18] 秦越, 李彬彬, 武兰芳. 不同耕作措施下秸秆还田土壤 CO₂ 排放与溶解性有机碳的动态变化及其关系[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(7): 1442-1449.
Qin Y, Li B B, Wu L F. Dynamics and interrelationship of CO₂ emissions and dissolved organic carbon in soils with crop residue retention under different tillage practices[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(7): 1442-1449.
- [19] Pisani O, Haddix M L, Conant R T, *et al.* Molecular composition of soil organic matter with land-use change along a bi-continental mean annual temperature gradient[J]. Science of the Total Environment, 2016, **573**: 470-480.
- [20] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2002, **23**(5): 972-978.
Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **23**(5): 972-978.
- [21] 程建中, 李心清, 周志红, 等. 土壤 CO₂ 浓度与地表 CO₂ 通量的季节变化及其相互关系[J]. 地球与环境, 2011, **39**(2): 196-202.
Cheng J Z, Li X Q, Zhou Z H, *et al.* Seasonal variation and relationship between soil CO₂ concentrations and surface CO₂ fluxes[J]. Earth and Environment, 2011, **39**(2): 196-202.
- [22] 杜丽君, 金涛, 阮雷雷, 等. 鄂南 4 种典型土地利用方式红壤 CO₂ 排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1607-1613.
Du L J, Jin T, Ruan L L, *et al.* CO₂ fluxes from red soil under four land use types in mid-subtropical, China[J]. Environment Science, 2007, **28**(7): 1607-1613.
- [23] Pang J Z, Wang X K, Mu Y J, *et al.* Nitrous oxide emissions from an apple orchard soil in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, **46**(1): 37-44.
- [24] 林杉, 冯明磊, 阮雷雷, 等. 三峡库区不同土地利用方式下土壤氧化亚氮排放及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(6): 1269-1276.
Lin S, Feng M L, Ruan L L, *et al.* Soil N₂O flux and its affecting factors under different land use patterns in three gorges reservoir area of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(6): 1269-1276.
- [25] Firestone M K, Davidson E A. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil[A]. Andreae M O, Schimel D S (Eds.). Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. New York, U. S. A.: John Wiley and Sons Ltd., 1989, **47**: 7-21.
- [26] Yao Z S, Zheng X H, Rui W, *et al.* Greenhouse gas fluxes and NO release from a Chinese subtropical rice-winter wheat rotation system under nitrogen fertilizer management[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2013, **118**(2): 623-638.
- [27] Liu S W, Lin F, Wu S, *et al.* A meta-analysis of fertilizer-induced soil NO and combined NO + N₂O emissions[J]. Global Change Biology, 2016, **23**(6): 2520-2532.
- [28] Lin S, Iqbal J, Hu R G, *et al.* Nitrous oxide emissions from rape field as affected by nitrogen fertilizer management: A case study in Central China[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(9): 1775-1779.
- [29] Wang W, Peng S S, Wang T, *et al.* Winter soil CO₂ efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, north China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(3): 451-458.
- [30] Shi W Y, Zhang J G, Yan M J, *et al.* Seasonal and diurnal dynamics of soil respiration fluxes in two typical forests on the semiarid Loess Plateau of China: Temperature sensitivities of autotrophs and heterotrophs and analyses of integrated driving factors[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **52**: 99-107.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)