

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ¹³C观测的大气 CO₂ 来源解析 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N₂H₄ 下 SBR 中硝化微生物特性 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响

杨硕欢^{1,2}, 张保成¹, 王丽¹, 胡田田^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为揭示水肥用量对农田生态系统土壤 CO₂ 排放的综合影响, 试验设高水 W₁ (90 mm)、中水 W_{0.85} (76.5 mm)、低水 W_{0.7} (63 mm) 这 3 个灌水水平, 300、255、210 和 0 kg·hm⁻² 这 4 个施氮水平和 90、76.5、63 和 0 kg·hm⁻² 这 4 个施磷水平, 采用静态暗箱-气相色谱法对夏玉米地土壤 CO₂ 排放进行原位观测, 分析土壤 CO₂ 排放对水肥调控的动态响应。结果表明, 玉米季农田土壤 CO₂ 排放呈双峰曲线, 主峰值出现在拔节期至抽雄期, 次峰出现在抽雄至灌浆期, 其他阶段排放通量较低。W₁ 在高肥 F₁ (N 300 kg·hm⁻², P₂O₅ 90 kg·hm⁻²) 和低肥 F_{0.7} (N 210 kg·hm⁻², P₂O₅ 63 kg·hm⁻²) 水平下全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量均显著高于 W_{0.7} ($P < 0.05$); 中肥 F_{0.85} (N 255 kg·hm⁻², P₂O₅ 76.5 kg·hm⁻²) 和 F_{0.7} 水平下, W_{0.85} 与 W_{0.7} 差异不显著 ($P > 0.05$)。W₁ 水平下, F₁ 比 F_{0.7} 显著增大 14.82% ($P < 0.05$); W_{0.85} 水平下, F_{0.85} 比 F_{0.7} 显著增大 8.03% ($P < 0.05$); 而 W_{0.7} 水平下各施肥水平间无显著性差异。单施氮 (N 210 kg·hm⁻²) 或磷 (P₂O₅ 63 kg·hm⁻²)、氮磷配施 (N 210 kg·hm⁻²、P₂O₅ 63 kg·hm⁻²) 较不施肥处理分别显著增加 23.70%、19.00% 和 12.30%, 且氮磷交互作用极显著 ($P < 0.01$)。方差分析表明, 供应水平相差 15% 时, 水肥交互作用对全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量影响不显著 ($P > 0.05$), 而对土壤 CO₂ 累计排放量影响显著 ($P < 0.05$); 供应水平相差 30% 时水肥交互作用对全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量和累计排放量均影响显著 ($P < 0.05$)。可见, 灌水量、施氮量、施磷量单因素均显著促进土壤 CO₂ 排放, 而氮磷配施起抑制作用。土壤 CO₂ 排放与水、肥供应水平均有密切关系, 水肥交互显著促进了土壤 CO₂ 排放, 通过水肥联合调控可有效调节土壤 CO₂ 排放。

关键词: 土壤 CO₂ 排放; 灌水量; 施肥量; 水肥交互作用; 夏玉米

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4780-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605114

Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO₂ Emission from Soils of Summer-maize Field

YANG Shuo-huan^{1,2}, ZHANG Bao-cheng¹, WANG Li¹, HU Tian-tian^{1,2*}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory for Agriculture Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Field experiments were conducted to determine the effects of water and fertilizer amount on soil CO₂ emissions by using the method of static chamber/gas chromatography in summer maize farmland ecosystem. Three factors (three irrigation levels including 90 mm, 76.5 mm and 63 mm, four nitrogen fertilizer levels including 300 kg·hm⁻², 255 kg·hm⁻², 210 kg·hm⁻² and 0 kg·hm⁻², and four phosphate fertilizer levels including 90 kg·hm⁻², 76.5 kg·hm⁻², 63 kg·hm⁻² and 0 kg·hm⁻²) were designed in the experiment. The results showed that soil CO₂ emission under different water and fertilizer conditions showed obvious seasonal fluctuation, the main and secondary peak appeared at jointing to tasseling stage and tasseling to grouting stage. The soil CO₂ emissions were relevant to the supply levels of fertilizer and irrigation. In the high fertilizer F₁ (N 300 kg·hm⁻², P₂O₅ 90 kg·hm⁻²) and low fertilizer F_{0.7} (N 210 kg·hm⁻², P₂O₅ 63 kg·hm⁻²) conditions, average soil CO₂ emissions flux during the whole growth period of high water W₁ (90 mm) was significantly higher than that of low water W_{0.7} (63 mm); the difference of soil CO₂ emissions between medium water level W_{0.85} (76.5 mm) and low water level was not significant under medium and low nutrient condition F_{0.85} (N 255 kg·hm⁻², P₂O₅ 76.5 kg·hm⁻²). Soil CO₂ emissions intensity of high fertilizer F₁ was significantly larger (by 14.82%) than that of low fertilizer F_{0.7} under high water supply W₁ ($P < 0.05$), and that of F_{0.85} was significantly bigger (by 8.03%) than that of F_{0.7} in the medium water supply ($P < 0.05$), while the difference between treatments at low water level was not significant ($P > 0.05$). Compared with nonfertilized treatment, soil CO₂ cumulative emissions of the whole growth period with application of nitrogen fertilizer (210 kg·hm⁻²), phosphate fertilizer (63 kg·hm⁻²) and nitrogen mixed with phosphate fertilizer (210 kg·hm⁻², 63 kg·hm⁻²) were significantly increased by 23.70%, 19.00% and 12.30%, respectively. And interaction effects between nitrogen and phosphorus fertilizer were extremely significant ($P < 0.01$). Variance analysis of the interaction of water and fertilizer showed that the average soil CO₂ fluxes of the whole

收稿日期: 2016-05-18; 修订日期: 2016-07-07

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503124)

作者简介: 杨硕欢(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为节水灌溉理论与作物高效利用水氮, E-mail: yangshuohuan@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hutiant@nwsuaf.edu.cn

growth period were not statistically significant but cumulative emissions of soil CO₂ were significant ($P < 0.05$) when the difference of supply level was 15%. In addition, soil CO₂ flux and cumulative emission in the whole growth period were significant when supply differed by 30%. Obviously, soil CO₂ emissions were promoted significantly by application of irrigation amount, nitrogen fertilizer, phosphorus rate and water and fertilizer interaction, while it was inhibited by nitrogen mixed with phosphorus. It was effective to regulate soil CO₂ emission by water and fertilizer controlling measures.

Key words: soil CO₂ emission; irrigation amount; fertilizer amount; water-nutrient interaction; summer maize

温室气体导致的气候变化是国际社会普遍关注的环境问题^[1],CO₂是最主要的温室气体^[2].农田生态系统对自然因素及农业管理措施(如耕作、施肥和灌溉等)变化有敏感而强烈的响应,在温室气体排放研究中占有重要的地位^[3].农业 CO₂ 排放占人为温室气体排放的 21%~25%^[4].中国作为世界农业大国^[5],农田耕作、灌溉及施肥对区域乃至全球气候变化带来的影响已受到国际社会的普遍关注.

农田管理措施中,灌溉和施肥是农业获得高产稳产的重要手段,通过影响植物生长和微生物活性进而影响土壤 CO₂ 排放^[6,7].灌溉除了满足作物生长需求外,还可能导致土壤有机质矿化分解速率、微生物生物量及其活性、根系生物量及气体在土壤空隙中扩散速率等,因此对土壤呼吸产生影响^[4].一般来说,灌溉会增加土壤呼吸^[4,8].有关施肥对土壤 CO₂ 排放影响的报道不尽一致,目前还无统一结论.有研究表明施用氮肥会显著增加土壤呼吸量^[9-11],氮肥施用类型和施用方式不同会造成土壤 CO₂ 排放量的差异^[12].但也有研究表明,氮肥施用对土壤 CO₂ 排放影响不明显^[13-17].因此,施肥处理对土壤呼吸影响方面的研究还存在一定的不确定性,需要进一步研究.

目前有关农田管理措施对土壤 CO₂ 排放影响的研究中,大多为灌溉和肥料等单因素试验的相关研究成果,水肥综合作用的试验结果报道较少.农业水肥管理措施对土壤 CO₂ 排放的影响关系尚不清楚,对相关机制的认知也十分有限.因此,本文通过夏玉米田间试验,研究不同灌水量、施氮量、施磷量及其交互作用对土壤 CO₂ 排放通量及累计排放量的影响,通过阐明夏玉米季土壤呼吸对不同水肥条件的响应规律,以期为制定兼顾低碳排放、增加土壤碳的水肥管理措施奠定理论基础.

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2015 年 6 月~2015 年 10 月在西北农林科技大学节水灌溉试验站进行.该试验站位于 108°24' E、34°20' N,海拔 524.7 m,属于暖温带季

风半湿润气候区,年平均温度为 12.9℃,年平均降水量 580 mm(主要集中在 7、8、9 月),年平均蒸发量 1 500 mm.该试验区土壤质地为重壤土,2 m 土层内平均土壤容重为 1.38 g·cm⁻³,田间持水率为 24%(质量分数,下同),耕前土壤含水率为 17.51%.供试土壤基本理化性状为:pH 值 8.14,有机质为 12.02 g·kg⁻¹,全氮 0.89 g·kg⁻¹,速效磷 8.18 mg·kg⁻¹,碱解氮 55.3 mg·kg⁻¹.

前茬小麦高留茬收割后,旋耕机旋地两遍.6 月 22 日播种,品种为郑单 958,10 月 13 日收获.夏玉米的主要物候期为苗期(7 月 2 日~7 月 22 日)、拔节期至抽雄期(7 月 23 日~8 月 18 日)、抽雄期至灌浆期(8 月 19 日~9 月 12 日)、灌浆期至成熟(9 月 13 日~10 月 13 日).

夏玉米生育期气象资料由杨凌气象站提供(图 1).试验期间玉米生育期总降雨量为 196.2 mm,降雨峰值在 8 月 12 日出现,达到了 48.7 mm.气温的变化幅度为 10.3~31.3℃,总积温达到 2 064.3℃.日平均气温在 7 月 31 日达到最高,之后呈逐渐下降的趋势,10 月 2 日气温突降到 10.3℃.

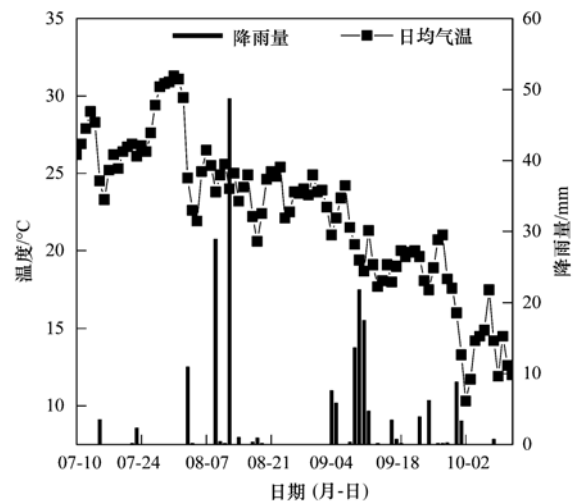


图 1 夏玉米生育期降雨量与日均气温

Fig. 1 Precipitation and daily mean air temperature in summer-maize growth stage

1.2 试验设计与实施

在节水节肥的水肥管理原则下,试验以当地农

业生产中普遍采用的灌水量(90 mm)、施氮量(300 kg·hm⁻²)、施磷量(90 kg·hm⁻²)为1水平,考虑其过量的特点,设置减少15%、30%两个水平,施氮量和施磷量各设一个0水平. 研究按照复因素不完全实施方案设计规则对3个灌水量、4个施氮量和4个施磷量设置试验处理,使试验方案局部均衡,减少试验处理且能分析各个试验因子的单因素效应及其交互效应,共10个处理组合(表1). 小区面积26.25 m²(3.5 m × 7.5 m). 3次重复. 随机区组排列.

磷肥用普通过磷酸钙(含P₂O₅ 12%),于6月20日撒施后翻耕入土. 氮肥用尿素(含N 46.67%),采用沟施方式,50%于五叶期(7月16日)施入,另外50%于喇叭口期(8月16日)施入. 灌水采用畦灌方式,于7月20日灌溉. 其他管理同当地大田.

表1 试验方案¹⁾

Table 1 Experimental design

处理	灌水量 /mm	施氮量 /kg·hm ⁻²	施磷量(P ₂ O ₅) /kg·hm ⁻²
W ₁ F ₁	90	300	90
W _{0.85} F _{0.85}	76.5	255	76.5
W _{0.7} F _{0.85}	63	255	76.5
W _{0.7} F _{0.7} (W _{0.7} N _{0.7} P _{0.7})	63	210	63
W _{0.85} F _{0.7}	76.5	210	63
W ₁ F _{0.7}	90	210	63
W _{0.7} N _{0.7} P ₀	63	210	0
W _{0.7} N ₀ P _{0.7}	63	0	63
W _{0.7} N ₀ P ₀	63	0	0
W _{0.7} F ₁	63	300	90

1) 处理中W代表灌水量,F代表施肥量,N代表施氮量,P代表施磷量;1、0.85、0.7、0代表当地习惯水肥用量的倍数,下同

1.3 田间采样及观测

采用静态箱原位采集土壤排放的CO₂气体样品. 箱体由不透明的PVC板制成,长×高×宽为0.5 m×0.5 m×0.5 m,外表面用海绵与锡箔纸包裹,防止取样期间因为阳光照射导致箱体内温度的剧烈变化. 侧壁安装取样口,用于气体采集. 箱体顶部安装有搅拌空气的小风扇,保证箱体内气体均匀. 静态箱底座于玉米播种当天埋设于小区中央玉米行间,直到玉米收获,底座上端有5 cm深的凹槽用以放置静态箱体,取样时注水密封防止周围空气与箱内气体交换.

气体采样于2015年7月12日开始,玉米生育前期每隔1周左右采集1次,后期每隔2周左右采集1次. 灌水施肥后加测,每隔3 d采样一次. 取样

时间在上午10:00~11:00进行,分别在密封后0、10、20、30 min时刻利用带有三通阀的50 mL注射器进行4次气体采集,每次采样40 mL,并于当天进行CO₂气体浓度分析. 此外,利用安插在箱体顶部的电子温度计(TA288)测量取样期间各时刻箱内温度,用以计算土壤CO₂排放通量.

1.4 气体分析及通量计算

CO₂气体样品浓度采用岛津GC-14B气相色谱仪测定. CO₂排放通量(F)的计算公式^[18]为:

$$F = \rho \cdot h \cdot \frac{273}{(273 + T)} \cdot \frac{dc}{dt}$$

式中, F 为CO₂气体排放通量,mg·(m²·h)⁻¹; ρ 为标准状态下的气体密度,1.964 kg·m⁻³; h 为采样箱高度,0.5 m; T 为采样时的箱内温度,℃; dc/dt 为箱内气体浓度的变化率,μL·(m³·h)⁻¹,根据0、10、20、30 min时采集的气体浓度与对应的时刻进行线性回归计算.

1.5 数据分析

采用Origin Pro 8.5作图,利用其积分功能求CO₂累计排放量,采用Excel 2003和DPS 7.05数据处理软件对试验数据进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 不同施肥量条件下灌水量对土壤CO₂排放的影响

2.1.1 不同灌水量下土壤CO₂排放通量的季节变化

在高肥F₁(N 300 kg·hm⁻², P₂O₅ 90 kg·hm⁻²)、中肥F_{0.85}(N 255 kg·hm⁻², P₂O₅ 76.5 kg·hm⁻²)、低肥F_{0.7}(N 210 kg·hm⁻², P₂O₅ 63 kg·hm⁻²)水平下,土壤CO₂排放通量变化规律一致(图2),均大致呈现先增加后减少的趋势,分别于8月11日(拔节期到抽雄期)和9月4日(抽雄期到灌浆期)出现CO₂排放主峰值和次峰值,而其他时期排放水平较低. F₁供肥水平下,高水W₁(90 mm)水平的土壤CO₂排放主峰值比低水W_{0.7}(63 mm)增大17.46% ($P < 0.05$); F_{0.85}供肥水平下,中水W_{0.85}(76.5 mm)比W_{0.7}增大15.96% ($P < 0.05$); F_{0.7}供肥水平下,W₁与W_{0.7}和W_{0.85}与W_{0.7}差异均不显著($P = 0.261$ 和 $P = 0.413$). F₁供肥水平下,W₁水平的土壤CO₂排放次峰值比W_{0.7}增大15.94% ($P < 0.05$); F_{0.85}供肥水平下,W_{0.85}比W_{0.7}增大15.43% ($P < 0.05$); F_{0.7}供肥水平下,W₁与W_{0.7}和W_{0.85}与W_{0.7}差异均不显著($P = 0.089$ 和 $P = 0.562$). 在7月18日和9月12日,土壤CO₂排放通量陡降可能与气温骤降和持

续降雨有关(图1). 可见,不同供肥水平下土壤 CO₂ 排放通量随灌水量的增大而增加,在 F₁ 水平尤为明显[图2(a)],且灌水量的影响随施肥水平升高有增大趋势.

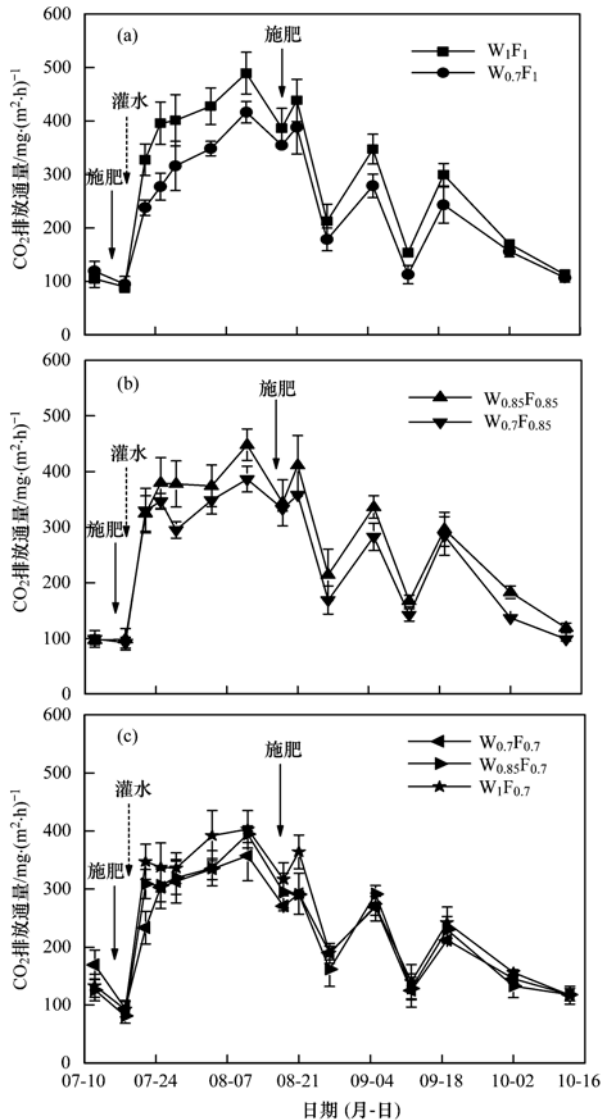


图2 不同供肥水平下灌水量对土壤 CO₂ 排放通量季节变化的影响

Fig. 2 Effects of irrigation amount on seasonal variation of soil CO₂ fluxes under different fertilizer levels

2.1.2 灌水量对土壤 CO₂ 平均排放通量和累计排放量的影响

灌水量的增加显著促进玉米全生育期土壤 CO₂ 排放强度,且灌水量的影响随供肥水平升高显著增大. F₁ 和 F_{0.7} 供肥水平下, W₁ 水平的玉米全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量比 W_{0.7} 分别增加 18.97% 和 8.09% ($P < 0.05$); F_{0.85} 和 F_{0.7} 供肥水平下, W_{0.85} 与 W_{0.7} 无显著差异 ($P > 0.05$) (表 2). 玉米不同生育

阶段,土壤 CO₂ 平均排放通量与整个生育期的变化规律基本一致. 玉米苗期, F_{0.7} 供肥水平下, W₁ 与 W_{0.7} 间差异显著 ($P < 0.05$), 但 F₁、F_{0.85} 供肥水平下, 各灌水水平之间差异不显著 ($P > 0.05$). 拔节期至抽雄期, F₁ 供肥水平下, W₁ 比 W_{0.7} 增加 25.46% ($P < 0.05$), F_{0.85} 供肥水平下, W_{0.85} 比 W_{0.7} 显著增加 13.01% ($P < 0.05$), 但 F_{0.7} 供肥水平下, 不同灌水水平间无显著性差异 ($P > 0.05$). 抽雄期至灌浆期, F_{0.7} 供肥水平下 W₁ 与 W_{0.85}、W_{0.7} 水平之间有显著性差异 ($P < 0.05$), 但 F₁、F_{0.85} 供肥水平下, 不同灌水水平间无显著性差异 ($P > 0.05$). 灌浆期至成熟各供肥水平下, 不同灌水水平差异均不显著 ($P > 0.05$). 灌水量对土壤 CO₂ 排放通量的影响与玉米的生育阶段有关, 其中玉米旺盛生育阶段的影响明显大于苗期及成熟阶段.

不同灌水水平下, 土壤 CO₂ 累计排放量在玉米整个生育期逐渐增加. 苗期各处理土壤 CO₂ 累计排放量增加缓慢, 拔节期至抽雄期快速增大, 抽雄期至灌浆期累计增长速率逐渐减缓, 灌浆期至成熟最低(图3). 随着玉米生育期的推进, 各处理间土壤 CO₂ 累计排放量差距逐渐增大. 玉米收获时, F₁ 供肥水平下, W₁ 比 W_{0.7} 增加 17.48%, 差异极显著 ($P = 0.008$); F_{0.85} 供肥水平下, W_{0.85} 比 W_{0.7} 显著增加 12.69% ($P < 0.05$); F_{0.7} 供肥水平下, W₁ 比 W_{0.7} 显著增加 9.82% ($P < 0.05$), 但 W_{0.85} 与 W_{0.7} 无显著差异 ($P = 0.450$).

2.2 不同灌水量条件下施肥量对土壤 CO₂ 排放的影响

2.2.1 不同施肥量下土壤 CO₂ 排放的季节变化

不同供水水平 (W₁、W_{0.85}、W_{0.7}) 下, 土壤 CO₂ 排放通量随施肥量增大而增大(图4), W₁ 水平表现尤为明显[图4(a)和表2]. W₁ 和 W_{0.7} 供水水平下, F₁ 水平的主峰值比 F_{0.7} 增加 21.47% 和 16.61% ($P < 0.05$); W_{0.85} 供水水平下, F_{0.85} 比 F_{0.7} 增加 13.50% ($P < 0.05$); W_{0.7} 供水水平下, F_{0.85} 比 F_{0.7} 增加 8.16% 但差异不显著 ($P > 0.05$). W₁ 供水水平下, F₁ 水平的土壤 CO₂ 排放通量次峰值比 F_{0.7} 增加 12.34% ($P < 0.05$); W_{0.85} 供水水平下, F_{0.85} 比 F_{0.7} 增加 11.97% ($P < 0.05$), W_{0.7} 供水水平下, F₁ 与 F_{0.7} 和 F_{0.85} 与 F_{0.7} 差异不显著 ($P = 0.128$ 和 $P = 0.437$). 各处理于第一次追肥(7月16日)后先降低再升高, 主要跟气温突降和灌溉导致土壤温度降低有关(图1和图4). 而第二次追肥(8月16日)后升高, 可能是8月16日后气温升高土壤温度较高,

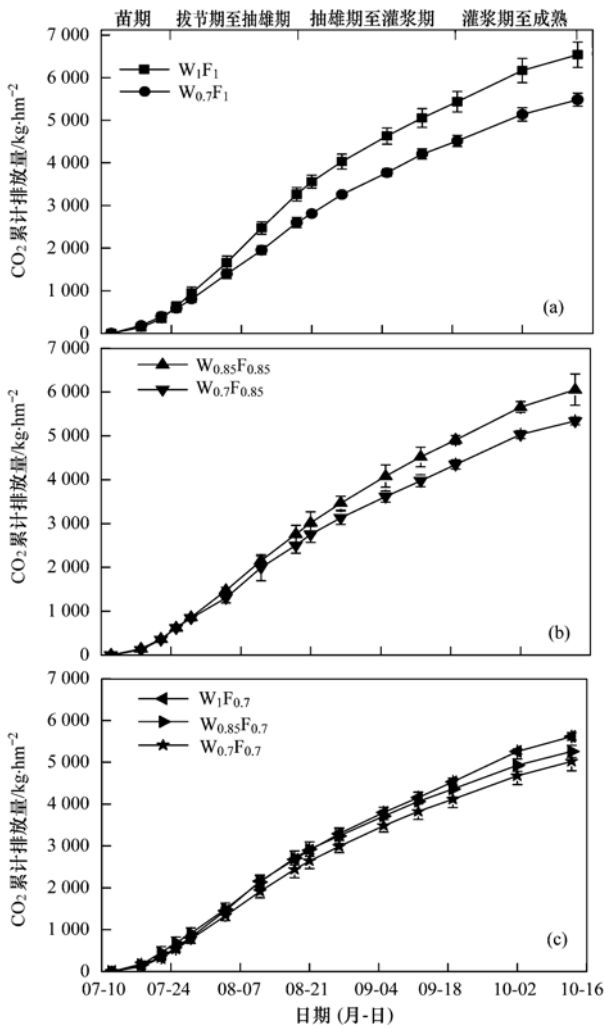


图3 不同供肥水平下灌水量对土壤 CO₂ 累计排放量的影响

Fig. 3 Effects of irrigation amount on cumulative soil CO₂ emissions under different fertilizer levels

植物生长旺盛,根系呼吸增强,同时促进了土壤微生物的呼吸作用,导致土壤 CO₂ 排放通量增加。

2.2.2 施肥量对土壤 CO₂ 平均排放通量和累计排放量的影响

施肥可促进土壤 CO₂ 排放,且与灌水水平有密切关系(表2)。W₁ 供水条件下,F₁ 水平的玉米全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量比 F_{0.7} 显著增加 14.82% ($P < 0.05$); W_{0.85} 供水水平下,F_{0.85} 比 F_{0.7} 显著增加 8.03% ($P < 0.05$); W_{0.7} 供水水平下,F₁、F_{0.85}、F_{0.7} 间无显著差异 ($P > 0.05$)。苗期和抽雄期至灌浆期,各供水水平下,F₁、F_{0.85} 和 F_{0.7} 均有显著差异 ($P < 0.05$)。拔节期至抽雄期,W₁ 供水水平下,F₁ 比 F_{0.7} 增加 24.99% ($P < 0.05$); W_{0.85} 供水水平下,F_{0.85} 比 F_{0.7} 增加 22.86% ($P < 0.05$); W_{0.7} 供水水平下,F₁、F_{0.85} 和 F_{0.7} 均无显著差异 ($P > 0.05$)。

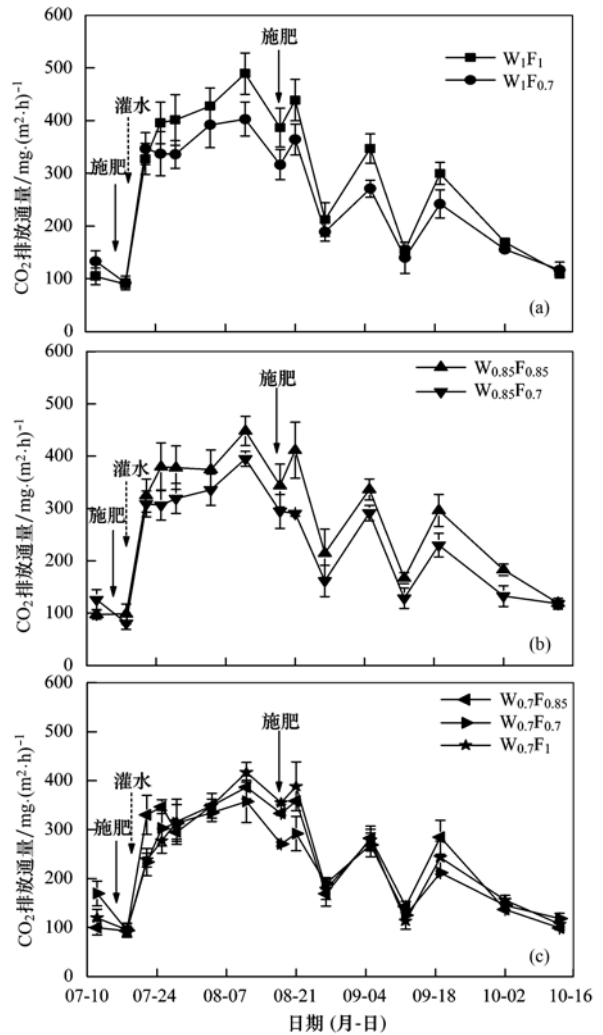


图4 不同供水水平下施肥量对土壤 CO₂ 排放通量季节变化的影响

Fig. 4 Effects of fertilizer amount on seasonal variation of soil CO₂ fluxes under different irrigation levels

灌浆期至成熟,各供水水平下,F₁、F_{0.85} 和 F_{0.7} 差异均不显著 ($P > 0.05$)。可见,除成熟阶段外,其他生育阶段均表现为:W₁ 供水水平下,F₁ 和 F_{0.7} 差异显著 ($P < 0.05$); W_{0.85} 供水水平下,F_{0.85} 与 F_{0.7} 差异显著 ($P < 0.05$)。

不同供水水平下施肥显著增加土壤 CO₂ 累计排放量。玉米收获时,W₁ 和 W_{0.7} 供水水平下,F₁ 水平的土壤 CO₂ 累计排放量比 F_{0.7} 分别显著增加 21.24%、13.35% ($P < 0.05$); W_{0.85} 供水水平下,F_{0.85} 与 F_{0.7} 显著增加 18.26% ($P < 0.05$); W_{0.7} 供水水平下,F_{0.85} 与 F_{0.7} 间无显著性差异 ($P = 0.093$) (图5)。

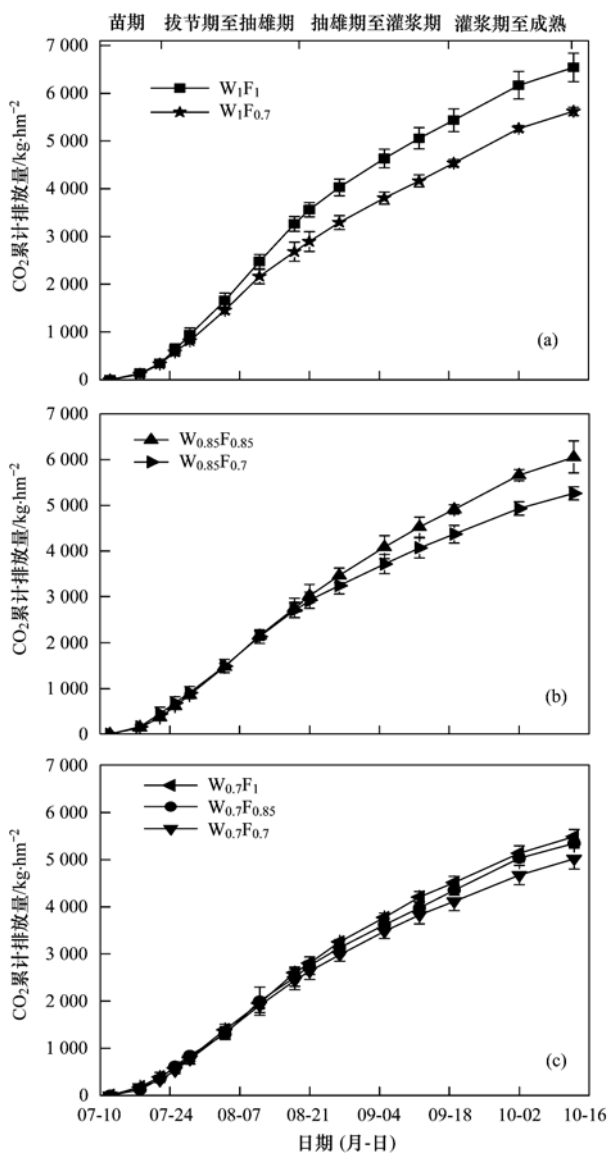
2.3 氮磷肥用量对土壤 CO₂ 排放的耦合效应

氮磷肥对土壤 CO₂ 排放的影响分析选取能代表土壤 CO₂ 排放通量表现的全生育期、最大阶段

表 2 不同水肥条件下夏玉米各生育阶段的土壤 CO₂ 平均排放通量¹⁾/mg·(m²·h)⁻¹Table 2 Soil CO₂ fluxes from summer maize fields under different water and fertilizer conditions at different growth stages/mg·(m²·h)⁻¹

处理	苗期	拔节期至抽雄期	抽雄期至灌浆期	灌浆期至成熟	全生育期
W ₁ F ₁	204.80 ± 6.74a	420.16 ± 19.77a	288.06 ± 7.33a	193.96 ± 20.75a	299.90 ± 16.83a
W _{0.7} F ₁	183.43 ± 9.39ab	334.89 ± 16.00d	253.52 ± 10.98a	168.53 ± 11.75ab	252.08 ± 11.32bcd
W _{0.85} F _{0.85}	192.07 ± 8.65ab	385.40 ± 8.76b	287.17 ± 12.84b	199.37 ± 16.71ab	255.81 ± 9.48bc
W _{0.7} F _{0.85}	180.23 ± 15.06bc	341.02 ± 18.37cd	238.03 ± 13.85b	181.41 ± 12.60ab	243.70 ± 11.75cd
W ₁ F _{0.7}	190.79 ± 9.71bc	356.81 ± 13.92cd	251.07 ± 11.55b	179.84 ± 14.51ab	261.19 ± 12.45b
W _{0.85} F _{0.7}	171.87 ± 6.09cd	330.99 ± 12.25d	217.76 ± 4.48c	159.99 ± 12.60b	236.80 ± 10.71d
W _{0.7} F _{0.7}	165.42 ± 6.35d	315.37 ± 10.06d	213.92 ± 9.44c	158.39 ± 5.05b	241.64 ± 7.69cd
平均值	184.09	354.95	249.93	177.36	255.88

1) 各生育阶段排放通量均为平均值 ± 标准差 (SE); 同列数值不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 5 不同供水水平下施肥量对土壤 CO₂ 累计排放量的影响Fig. 5 Effects of fertilizer amount on cumulative soil CO₂ emissions under different irrigation levels

(拔节期至抽穗期) 和最小阶段 (灌浆至成熟期) 这 3 个时间段进行比较. 施氮对全生育期土壤 CO₂ 平

均排放通量的影响因磷肥施用而变 (表 3). 施磷 (P₂O₅ 63 kg·hm⁻²) 条件下, 施氮 (N 210 kg·hm⁻²) 比不施氮降低 1.80%, 差异不显著 ($P > 0.05$); 不施磷条件下, 施氮比不施氮高 26.05%, 差异显著 ($P < 0.05$). 氮肥单因子效应、氮磷肥交互作用达极显著水平 ($P < 0.01$), 但磷肥单因子效应差异不显著 ($P = 0.161$). 氮肥在拔节期至抽雄期影响极显著 ($P = 0.000$), 但灌浆期至成熟影响不显著 ($P = 0.393$). 磷肥对拔节期至抽雄期和灌浆期至成熟影响均不显著 ($P = 0.070$ 和 $P = 0.052$). 交互作用在拔节期至抽雄期和灌浆期至成熟均达到显著水平 ($P = 0.001$ 和 $P = 0.024$).

单施氮、施磷和氮磷配施的全生育期土壤 CO₂ 累计排放量较不施肥处理分别显著增加 23.70%、19.00% 和 12.30% ($P < 0.05$), 氮磷肥配施抑制土壤 CO₂ 排放其交互作用达极显著水平 ($P = 0.000$). 施磷肥条件下, 不施氮比施氮降低 5.63% ($P > 0.05$), 但不施磷条件下, 施氮比不施氮显著增加 23.70% ($P < 0.05$).

2.4 水肥用量对土壤 CO₂ 排放的耦合效应

全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量和累计排放量对水肥用量的响应与供应水平有关 (表 4). 水肥供应水平相差 30%, 同一灌水水平下, 全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量和累计排放量均随着施肥量的增加而显著增加 ($P < 0.05$). 灌水和施肥单一因素影响均达极显著水平 ($P < 0.01$), 水肥交互作用影响显著 ($P < 0.05$). 水肥供应水平相差 15%, 施肥对土壤 CO₂ 平均排放通量影响达到显著 ($P = 0.033$), 灌水单因子、水肥交互作用未达到显著水平 ($P = 0.242$ 和 $P = 0.257$). 累计排放量表现为, 灌水和施肥单因素效应均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 交互作用显著 ($P = 0.012$).

表 3 氮磷肥用量对土壤 CO₂ 排放的影响方差分析/mg·(m²·h)⁻¹

处理	平均排放通量			累计排放量 (全生育期)
	拔节期至抽雄期	灌浆期至成熟	全生育期	
W _{0.7} N _{0.7} P _{0.7}	315.37 ± 10.06b	158.39 ± 5.05b	236.80 ± 7.69b	5 023.45 ± 223.02b
W _{0.7} N _{0.7} P ₀	379.19 ± 13.07a	166.66 ± 12.58a	260.14 ± 14.63a	5 533.44 ± 442.68a
W _{0.7} N ₀ P _{0.7}	312.32 ± 12.27b	196.87 ± 12.05a	241.13 ± 19.26b	5 323.23 ± 372.63b
W _{0.7} N ₀ P ₀	289.42 ± 15.99c	142.75 ± 9.08b	206.38 ± 7.58c	4 473.28 ± 268.40c

表 4 供应水平相差 30% 和 15% 水肥影响的方差分析/mg·(m²·h)⁻¹

处理	供应水平相差 30%		处理	供应水平相差 15%	
	全生育期平均排放通量	全生育期累计排放量		全生育期平均排放通量	全生育期累计排放量
W ₁ F ₁	299.90 ± 16.83a	6 673.60 ± 299.45a	W _{0.85} F _{0.85}	255.81 ± 9.48a	6 056.43 ± 352.93a
W ₁ F _{0.7}	261.19 ± 12.45b	5 620.44 ± 88.79b	W _{0.85} F _{0.7}	236.80 ± 10.71b	5 103.31 ± 142.51b
W _{0.7} F ₁	252.08 ± 11.32b	5 484.94 ± 153.20b	W _{0.7} F _{0.85}	243.70 ± 11.75b	5 342.4 ± 85.78b
W _{0.7} F _{0.7}	241.64 ± 7.69c	5 023.45 ± 223.02c	W _{0.7} F _{0.7}	241.6 ± 7.69b	5 023.4 ± 223.02b

3 讨论

夏玉米农田生态系统土壤 CO₂ 排放通量具有明显的季节变化特点(图 2 和图 4),均大致呈现先增加后减少的趋势,主峰值和次峰值出现于 8 月 11 日和 9 月 4 日。这可能与土壤温度、水分和植物根系发育变化有关^[19~21]。研究表明有作物生长的耕地与裸地的土壤 CO₂ 排放不同^[22],水肥用量一方面通过影响土壤环境因素影响土壤 CO₂ 产生,另一方面通过影响玉米生长及玉米与土壤的相互作用影响土壤 CO₂ 排放。根系呼吸产生的 CO₂ 占土壤 CO₂ 总排放的 56%~82%,根系产生 CO₂ 增加使土壤 CO₂ 总排放量增加^[23]。采用静态箱法测定土壤 CO₂ 排放通量,采样箱虽不覆盖植株地上部分但覆盖部分玉米根系在采样箱内的分布。土壤 CO₂ 平均排放通量在试验初期(7 月 18 日)和抽雄期(9 月 12 日)突然降低,前者可能与 7 月 16~17 日气温从 28.3℃ 突降到 23.3℃ 和灌水导致地温降低有关;后者可能是 9 月 8~12 日气温持续低温,且连续降雨使土壤含水量大幅度增加导致土壤充气孔隙度变小形成厌氧环境,抑制了微生物群落活动,造成土壤呼吸降低^[24,25]。

灌水量的增加显著促进玉米全生育期土壤 CO₂ 排放强度,且灌水量的影响随供肥水平升高显著增大。高肥和低肥水平下,高水与低水均差异显著($P < 0.05$)(表 2)。有研究表明,灌溉处理的土壤呼吸强度较不灌水处理均有所增加^[19,24]。中肥和低肥水平下,中水与低水无显著性差异($P > 0.05$)。表明灌水水平升高 15% 对 CO₂ 排放强度影响不显著,灌水量对土壤 CO₂ 排放强度敏感性降低,可能是因为玉

米根系生长和土壤微生物活性对水分敏感性降低造成的^[26]。土壤 CO₂ 排放的主导控制因子取决于研究地点的限制性环境因子。干旱地区麦田的土壤 CO₂ 平均排放通量的平均值为 262 mg·(m²·h)⁻¹,而湿润地区麦田的平均值为 295 mg·(m²·h)⁻¹^[27]。本试验位于半湿润地区,限制性环境因子可能是土壤水分,土壤本地含水率为 17.51%,田间持水率为 24%,有研究表明当土壤含水率在田间持水率以下时,土壤呼吸速率随着土壤含水量的增加而增加,且增加速度很快,水分成为干旱地区的限制性因子^[19]。

施肥量在高水和中水条件下会显著促进玉米全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量,而在低水条件下施肥水平间无显著性差异($P > 0.05$)。说明低水水平下,施肥量已不是影响土壤 CO₂ 排放强度的主要影响因素,可能是低水条件使植物根系活力和土壤有机碳含量降低,破坏了根系和微生物呼吸的平衡^[27],另一方面可能是低水限制了植物光合产物的输送,而根系呼吸在很大程度上取决于植物的光合产物往地上部的输送^[28]。施肥量的影响随灌水水平的升高显著增大。高水水平下,高肥的全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量比低肥显著增加;中水水平下,中肥较低肥有显著增加(表 2)。且与不施肥相比,单施氮肥、磷肥和氮磷肥配施全生育期土壤 CO₂ 排放累计量均显著增加(表 3)。表明施肥可明显促使土壤 CO₂ 排放,这与前人研究结果一致^[15,29]。原因可能在于:施肥尤其是氮肥可直接补充植物及微生物所需养分,促进微生物生命活动,加快有机质分解释放 CO₂^[16],增强植物根系生长呼吸。另外,氮肥还可能通过影响土壤 pH 影响微生物

活性^[30],促进 CO₂ 排放。

单施氮磷肥与氮磷配施对土壤 CO₂ 排放的影响表现出相反的结果,氮磷肥配施较单施有助于降低土壤 CO₂ 排放(表 3)。而大多数研究表明长期氮磷肥配施可以增加土壤呼吸强度,单施氮肥、磷肥使土壤呼吸强度降低,产生抑制作用^[31]。可能与氮磷肥供应的影响具有两面性有关。施肥既可以为植物和微生物提供必要的营养元素,也可能抑制土壤微生物活性,当土壤中含有大量的营养元素时会对微生物活性和碳素矿化产生负面效应^[32];营养源大量增加时植株能够较容易获得营养物质,因而不必形成发达的根系^[33],使根系呼吸作用不会有明显增加。

水肥交互作用对全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量和累计排放量的影响因供应水平发生变化(表 4)。供应水平相差 15% 对全生育期 CO₂ 累计排放量有显著影响($P < 0.05$),而对平均排放通量无显著影响($P > 0.05$);供应相差 30% 对二者均影响显著($P < 0.05$)。表明水肥交互作用对土壤 CO₂ 排放与供应水平有密切关系,可能与水肥二因素对土壤微生物活动和植物根系生长的复杂影响有关^[27,34]。

4 结论

(1) 农田土壤 CO₂ 排放具有明显的季节变化规律,各处理均呈先缓慢波动性升高又下降的双峰型曲线,主峰和次峰分别出现在玉米拔节期至抽雄期、抽雄期至灌浆期,其他时期排放水平较低。

(2) 不同灌水量对玉米全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量有显著影响。高肥(N 300 kg·hm⁻², P₂O₅ 90 kg·hm⁻²)和低肥(N 210 kg·hm⁻², P₂O₅ 63 kg·hm⁻²)水平下,高水(90 mm)均显著高于低水(63 mm)($P < 0.05$);中肥(N 255 kg·hm⁻², P₂O₅ 76.5 kg·hm⁻²)和低肥条件下,中水与低水无显著差异($P > 0.05$)。

(3) 不同施肥量对全生育期土壤 CO₂ 平均排放通量影响随灌水水平升高显著增加($P < 0.05$)。高水条件下,高肥比低肥显著增加 14.82% ($P < 0.05$);中水条件下,中肥比低肥显著增加 8.03% ($P < 0.05$);而低水条件下各施肥水平间差异不显著($P > 0.05$)。

(4) 氮、磷肥单施均促使玉米全生育期土壤 CO₂ 累计排放量显著增大,二者间存在明显的负交互作用,导致氮磷肥配施的增加幅度显著降低。

(5) 水肥交互存在显著正交互作用,促进土壤

CO₂ 排放。供应水平相差 15% 和 30% 对土壤 CO₂ 累计排放量影响显著($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] Hou H J, Chen H, Cai H J, *et al.* CO₂ and N₂O emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **132**: 69-76.
- [2] Ding W X, Meng L, Yin Y F, *et al.* CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(2): 669-679.
- [3] 陈书涛,朱大威,牛传坡,等. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2858-2865. Chen S T, Zhu D W, Niu C P, *et al.* Effects of management regime on soil respiration from agroecosystems [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(10): 2858-2865.
- [4] 齐玉春,郭树芳,董云社,等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(9): 1764-1773. Qi Y C, Guo S F, Dong Y S, *et al.* Advances in research on the effects of irrigation on the greenhouse gases emission and soil carbon sequestration in agro-ecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(9): 1764-1773.
- [5] 周立峰,冯浩. 不同灌水下复合肥对冬小麦产量及农田净生态系统生产力的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(7): 31-36. Zhou L F, Feng H. Effects of irrigation and compound fertilizer on yield of winter wheat and net ecosystem productivity of farmland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, **27**(7): 31-36.
- [6] Scheer C, Grace P R, Rowlings D W, *et al.* Soil N₂O and CO₂ emissions from cotton in Australia under varying irrigation management[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, **95**(1): 43-56.
- [7] Qiu Q Y, Wu L F, Ouyang Z, *et al.* Effects of plant-derived dissolved organic matter (DOM) on soil CO₂ and N₂O emissions and soil carbon and nitrogen sequestrations[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **96**: 122-130.
- [8] Jabro J D, Sainju U, Stevens W B, *et al.* Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**(4): 1478-1484.
- [9] Gallardo A, Schlesinger W H. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(10): 1409-1415.
- [10] Shao R X, Deng L, Yang Q H, *et al.* Nitrogen fertilization increase soil carbon dioxide efflux of winter wheat field: A case study in Northwest China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, **143**: 164-171.
- [11] 张芳,郭胜利,邹俊亮,等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3174-3180. Zhang F, Guo S L, Zou J L, *et al.* Effects of nitrogen fertilization, soil moisture and soil temperature on soil respiration during summer fallow season[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(11): 3174-3180.
- [12] 杨兰芳,蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(1): 9-15. Yang L F, Cai Z C. Soil respiration during maize growth period

- affected by N application rates [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, **42**(1): 9-15.
- [13] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(6): 992-999.
Meng F Q, Guan G H, Zhang Q Z, *et al.* Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(6): 992-999.
- [14] Mancinelli R, Marinari S, Brunetti P, *et al.* Organic mulching, irrigation and fertilization affect soil CO₂ emission and C storage in tomato crop in the Mediterranean environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **152**: 39-51.
- [15] 胡诚, 曹志平, 胡娟娟, 等. 不同施肥管理措施对土壤碳含量及基础呼吸的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, **15**(5): 63-66.
Hu C, Cao Z P, Hu C J, *et al.* Effects of different manure management practices on soil carbon and basal respiration[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, **15**(5): 63-66.
- [16] 朱小红, 马友华, 杨书运, 等. 施肥对农田温室气体排放的影响研究[J]. *农业环境与发展*, 2011, **28**(5): 42-46.
- [17] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K. NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes in winter barley field of Japanese Andisol as affected by N fertilizer management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(1): 330-339.
- [18] 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(3): 111-117.
Chen H, Hou H J, Cai H J, *et al.* Soil N₂O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(3): 111-117.
- [19] 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*, 2003, **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*, 2003, **23**(5): 972-978.
- [20] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田 CO₂ 排放影响及水热关系分析[J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(4): 47-53.
Zhang Y, Zhang H L, Chen J K, *et al.* Effects of different tillage practices on CO₂ emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, **25**(4): 47-53.
- [21] 王玉英, 胡春胜. 施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(5): 1122-1128.
Wang Y Y, Hu C S. Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the Piedmont Plain of Mount Taihang, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(5): 1122-1128.
- [22] Burdt A C, Galbraith J M, Megonigal J P. Using CO₂ efflux rates to indicate below-ground growing seasons by land-use treatment [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2006, **14**(2): 133-145.
- [23] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of CO₂ efflux from maize rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 2004, **263**(1): 85-99.
- [24] Liu X Z, Wan S Q, Su B, *et al.* Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, **240**(2): 213-223.
- [25] 王建林, 赵风华, 欧阳竹. 灌溉量对灌浆期麦田土壤呼吸的影响[J]. *华北农学报*, 2010, **25**(3): 186-189.
Wang J L, Zhao F H, Ouyang Z. Effects of the irrigation quantity on soil respiration in wheat field in filling stage [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, **25**(3): 186-189.
- [26] Jia X X, Shao M A, Wei X R. Soil CO₂ efflux in response to the addition of water and fertilizer in temperate semiarid grassland in northern China[J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 125-141.
- [27] 宋文质, 王少彬, 苏维瀚, 等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放研究[J]. *环境科学*, 1996, **17**(1): 85-88.
Song W Z, Wang S B, Su W H, *et al.* Agricultural activities and emissions of greenhouse gases in China region[J]. *Environmental Science*, 1996, **17**(1): 85-88.
- [28] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, *et al.* Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(2): 418-425.
- [29] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, *et al.* Diel pattern of soil respiration in N-amended soil under maize cultivation [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(18): 3294-3305.
- [30] 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.
- [31] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(5): 1445-1451.
Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, *et al.* Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(5): 1445-1451.
- [32] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(5): 1093-1099.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Seasonal variation of soil microbial biomass and soil enzyme activities in different long-term fertilizer regimes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, **15**(5): 1093-1099.
- [33] 关义新, 林葆, 凌碧莹. 光、氮及其互作对玉米幼苗叶片光合和碳、氮代谢的影响[J]. *作物学报*, 2000, **26**(6): 806-812.
Guan Y X, Lin B, Ling B Y. The interactive effects of growth light condition and nitrogen supply on maize (*Zea mays* L.) seedling photosynthetic traits and metabolism of carbon and nitrogen[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, **26**(6): 806-812.
- [34] 刘振香, 刘鹏, 贾绪存, 等. 不同水肥处理对夏玉米田土壤微生物特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 113-121.
Liu Z X, Liu P, Jia X C, *et al.* Effects of irrigation and fertilization on soil microbial properties in summer maize field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 113-121.

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行