

加气灌溉下土壤呼吸与环境因子相关性研究

于珍珍¹ 邹华芬² 于德水³ 汪 春^{1,2} 李海亮² 孙海天^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 湛江 524003;
3. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074)

摘要: 为探明加气灌溉技术对土壤呼吸速率的影响及调控机制,完善加气灌溉技术下土壤呼吸排放机理,以国家土壤质量湛江观测实验站为平台开展为期3年(2019—2021年)的定位试验,每年开展2次试验观测,研究加气灌溉(Aerated irrigation, AI)和不加气灌溉(CK)两种处理对土壤呼吸速率、土壤温度、含水率、含氧量、土壤细菌生物量及根系生物量的影响,采用偏最小二乘回归分析(Partial least square regression analysis, PLSR)方法建立两种处理下土壤呼吸速率与土壤温度、含水率、含氧量、土壤细菌生物量及根系生物量的回归方程,筛选出加气灌溉技术下影响土壤呼吸速率变化的主要土壤环境因子。研究结果表明, AI处理后土壤呼吸速率和土壤含氧量分别提高12.30%~20.54%和19.90%~25.70%,同时植株根系生物量和土壤细菌生物量分别提高15.30%~22.67%和35.10%~69.17%,土壤含水率降低3.36%~14.30%,不同处理对土壤温度影响不显著。回归拟合结果表明,两种处理下土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水率均呈二次多项式负相关关系,与土壤含氧量呈线性正相关,与根系生物量呈幂函数正相关,与土壤细菌生物量呈指数正相关。PLSR模型的变量重要性投影(Variable importance for projection, VIP)值表明土壤温度(VIP值为1.48)、土壤含氧量(VIP值为1.40)、根系生物量(VIP值为1.25)和细菌生物量(VIP值为1.09)是影响土壤呼吸速率变化的主要影响因子,加气灌溉技术可以通过改变土壤含氧量、根系生物量及细菌生物量对土壤呼吸速率产生驱动作用。研究结果可为完善加气灌溉下土壤呼吸速率变化响应机理、合理制定有效的土壤碳排放调控管理措施提供理论依据。

关键词: 加气灌溉; 土壤呼吸速率; 土壤环境; 偏最小二乘回归; 相关性

中图分类号: S274.1; S156.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0390-12 OSID: 

Correlation of Soil Respiration and Environmental Factors under Aerated Irrigation

YU Zhenzhen¹ ZOU Huafen² YU Deshui³ WANG Chun^{1,2} LI Hailiang² SUN Haitian^{1,2}

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China
2. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524003, China
3. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to investigate the effect of aerated irrigation technology on soil respiration rate and its regulation mechanism, and improve the mechanism of soil respiration emission under aerated irrigation technology, a three-year (2019—2021) localization experiment was conducted at the National Soil Quality Zhanjiang Observatory as a platform, with two experimental observations each year, to investigate the effects of aerated irrigation (AI) and non-aerated irrigation (CK) on soil respiration rate, soil temperature, water content, oxygen content, soil bacterial biomass and root biomass. The results showed that AI treatments increased soil respiration rate and soil oxygen content by 12.30%~20.54% and 19.90%~25.70%, respectively, increased plant root biomass and soil bacterial biomass by 15.30%~22.67% and 35.10%~69.17%, respectively, and decreased soil water content by 3.36%~14.30%. The effects of different treatments on soil temperature were not significant. The regression fitting results showed that soil respiration rate under both treatments had a negative quadratic polynomial correlation

收稿日期: 2021-12-22 修回日期: 2022-01-27
基金项目: 海南省自然科学基金面上项目(322MS118)和海南省自然科学基金青年基金项目(322QN416,322QN375)
作者简介: 于珍珍(1994—),女,博士生,主要从事旱作农业工程与信息技术研究,E-mail: yudq1994@hotmail.com
通信作者: 汪春(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事旱作农业工程技术研究,E-mail: wangchun1963@126.com

with soil temperature and soil water content, a linear positive correlation with soil oxygen content, a positive power function correlation with root biomass, and an exponential positive correlation with soil bacterial biomass. The variable importance for projection (VIP) values of the PLSR model indicated that soil temperature and soil water content were not significantly affected by the different treatments. VIP values indicated that soil temperature (VIP 1.48), soil oxygen content (VIP 1.40), root biomass (VIP 1.25) and bacterial biomass (VIP 1.09) were the main influencing factors on the changes of soil respiration rate. Soil respiration rate can be driven by aerated irrigation by changing soil oxygen content, root biomass and bacterial biomass. The research result can provide a theoretical basis for improving the response mechanism of soil respiration rate change under aerated irrigation and formulating effective soil carbon emission control management measures.

Key words: aerated irrigation; soil respiration rate; soil environment; PLSR; correlation

0 引言

土壤呼吸是土壤中的微生物与植株根系等进行新陈代谢活动消耗 O_2 的同时向大气排放 CO_2 的过程,是土壤和大气碳库相互交换的重要途径^[1],也是表征土壤质量和土壤肥力的重要指标,其主要受到农田管理措施、土壤环境因子、生物因子和生态系统类型等多重因素的共同影响^[2-4]。

加气灌溉技术以地下滴灌管路系统为基础,利用空气泵或者风机等通风装置直接向作物根际通气,或采用文丘里装置将空气以微气泡的形式掺入灌溉水中进行渗灌,以此调控作物根区土壤水分和气体含量,达到改善作物根际土壤环境的效果^[5-7]。针对加气灌溉技术前期已经开展了相关的研究,相关研究表明,与常规地下灌溉技术相比,加气灌溉对温室番茄^[8-12]、黄瓜^[13]、甜瓜^[14]、棉花^[15-17]、玉米^[18-20]等作物种植下的土壤微环境及土壤呼吸速率均产生了积极的影响,但是关于加气灌溉技术对土壤呼吸速率变化的作用机理多集中在土壤环境中单因素或两两因素的效应分析,如土壤呼吸与土壤水热或与土壤含氧量的关系^[1,7],关于加气灌溉下红壤土呼吸变化与土壤生物因子及非生物因子的综合关联分析研究较少。

土壤水分和气体对作物生长发育和产量品质的形成有重要的影响,二者之间存在耦合效应。加气灌溉技术的调控必然会改变土壤含水率、含氧量、微生物菌落等,进而对土壤呼吸产生影响。研究表明,土壤通气状况及气体含量直接影响作物根系的呼吸作用及微生物菌群的代谢活动,进而影响作物根系的生长,这些指标与土壤呼吸速率密切相关。当土壤中含氧量提高,会显著增加土壤中微生物活性和根系生物量,土壤呼吸速率就会明显增加。目前,已有研究报道了土壤呼吸对不同灌溉或施肥措施的响应及机理,但是针对加气灌溉技术下,各项土壤环境因子对土壤呼吸速率的

调控作用少有涉及。

针对以上问题,本文选取玉米为试验材料,以常规地下滴灌为对照试验,研究加气灌溉技术下土壤呼吸速率的差异及变化。基于偏最小二乘回归分析(Partial least square regression analysis, PLSR)法建立土壤呼吸速率与土壤环境因子的分段拟合回归方程,分析土壤呼吸速率与土壤温度、含水率、含氧量、细菌及根系生物量的互动响应关系,基于变量重要性投影(Variable importance for projection, VIP)法揭示加气灌溉下影响土壤呼吸速率变化的主要因子。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019—2021 年在广东省湛江市中国热带农业科学院国家土壤质量湛江观测实验站(21°35'N, 109°31'E)进行,该地年平均日照时间为 2 160 h,无霜期为 350 d,年平均气温为 23.2℃,是典型的亚热带季风气候。供试土壤为玉米田原状红壤土,速效 N、P、K 和有机质含量(质量比)分别为 65.15 mg/kg、23.85 mg/kg、70.53 mg/kg 和 20.17 g/kg。研究区域内小型气象站自动获取并记录试验期间降雨量、气温及其它环境因素。2019—2021 年玉米生长期日气温和降雨量变化如图 1 所示。

1.2 试验方法

以国家土壤质量湛江观测实验站为平台开展为期 3 年(2019—2021 年)的定位试验,试验区采用本地区玉米一年两熟种植模式,种植玉米品种为“惠玉甜三号”。定植前试验区已经完成农田标准化建设和地下渗灌管路系统铺设。种植前在各小区正中铺设 1 条地下滴灌带(埋深为 20 cm,直径为 16 mm,流量为 2.5 L/h,滴头间距 20 cm),玉米行距为 60 cm,株距为 40 cm。罗茨风机(HRE65WA 型,压力设定为 0.7 MPa)与干管相连进行加气,田间支管

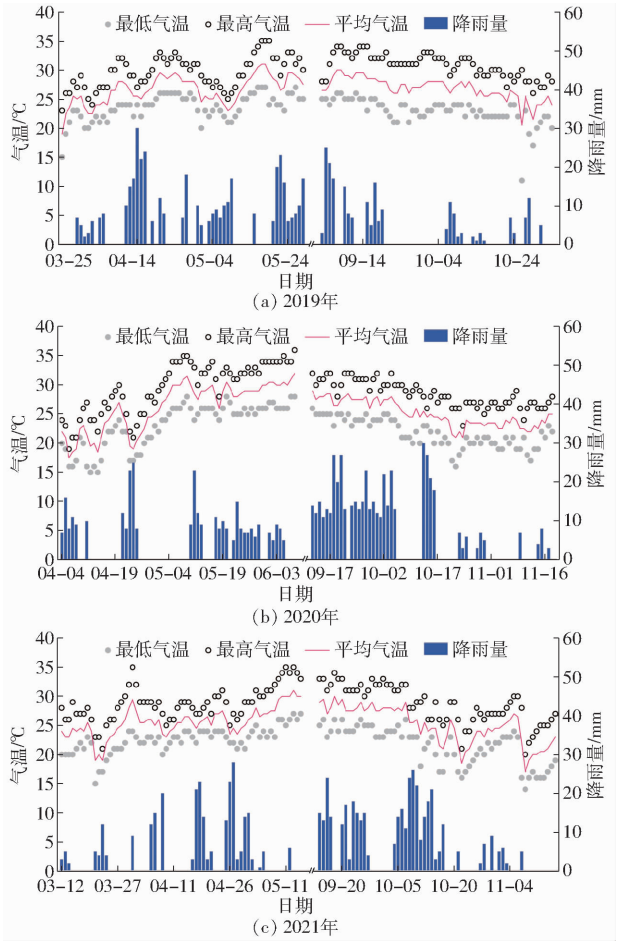


图 1 2019—2021 年玉米各生育期平均气温、最高气温、最低气温与降雨量变化曲线

Fig.1 Variation curves of average temperature, maximum temperature, minimum temperature and rainfall in each growth period of maize from 2019 to 2021

均安装电磁阀门,用于调控各个小区的灌水量与加气量。

1.3 试验设计

试验设置加气灌溉 (AI) 和不加气灌溉 (CK) 两种灌溉方式,每个试验重复 3 次,1 次重复为 1 个小区,共计 6 个小区,试验区域如图 2 所示。

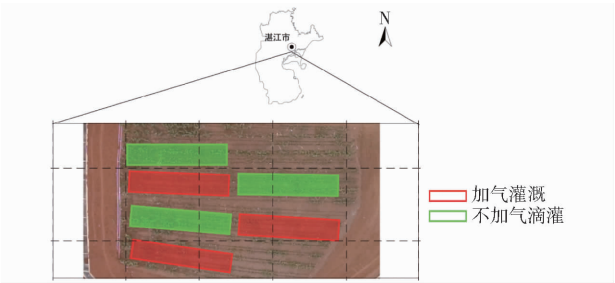


图 2 研究区域位置

Fig.2 Location of study area

利用 E601 型标准蒸发皿控制灌水量,以灌水间隔内每天 09:00 测得的蒸发量为灌溉依据,玉米不同生育周期选取不同的作物-蒸发皿系数 K_p ,分

别为苗期 0.8、拔节期 1.2、抽雄期 1.2、成熟期 1.0。各处理每次灌水量计算公式为^[20]

$$W = AE_p K_p \tag{1}$$

式中 W ——各处理每次灌水量,L
 A ——单个滴头控制的小区面积,为 0.14 m^2 ($0.35\text{ m} \times 0.4\text{ m}$)
 E_p ——两次灌水间隔内测得的蒸发皿蒸发量,mm

整个生育周期每 2 d 加气 1 次,每次灌水或降雨后补充加气 1 次,加气量计算公式为^[6]

$$V = \frac{SL \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right)}{1\,000} \tag{2}$$

式中 V ——每次通气量,L
 S ——垄横截面积,取 $1\,500\text{ cm}^2$
 L ——垄长,m
 ρ_b ——土壤容重,取 1.2 g/cm^3
 ρ_s ——土壤密度,取 1.65 g/cm^3

据此得出每个试验小区每次通气量为 744.75 L。试验过程中不考虑土壤气体的扩散,按照罗茨风机铭牌标示功率及通气量换算为相应的通气时间,利用通气时间控制通气量。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤呼吸速率测定

利用 Li-8100A 型土壤碳通量自动测量系统进行土壤呼吸速率测定。在时间段 07:00—09:00 进行测量,相关研究表明该时段测得的土壤呼吸速率可以代表当日的土壤呼吸速率均值^[21]。除了开始日期和收获日期之外,玉米生长周期内每 10 d 测量 1 次,如遇强降雨天气则推迟测定时间,每次试验取玉米不同生育时期均值进行统计分析。

1.4.2 非生物因子测定

采用浙江托普云农科技股份有限公司生产的 TZS-PHW-4G 型土壤多功能参数测定仪对土壤温度、含水率进行全程跟踪测量,测量深度为距离土壤表层 20 cm,同时记录大气温度,每次测量 3 个点,取平均值作为该组的测定结果,测定日期与土壤呼吸速率测定日期一致。

利用光纤式氧气测量仪 (Fiber-optic oxygen meter firesting O_2) 测定距离土壤表层 20 cm 的氧气含量,测量日期、时间与土壤呼吸速率测定一致。

1.4.3 生物因子测定

微生物呼吸和根系呼吸是土壤呼吸的重要组成部分,占土壤呼吸的 95% 左右,其余 5% 为土壤中的

凋落物分解产生 CO_2 。研究表明,细菌占土壤微生物组成的 94% 左右,其余为放线菌和真菌,占 4% ~ 5%^[22],因此,本研究选取细菌生物量和根系生物量作为土壤环境中的生物指标。

土壤细菌生物量:用土钻和五点取样法采集耕层土壤,按 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 土层分别采集新鲜土壤样品并按层次充分混合,每次采集重复 3 次,利用平板计数法对土壤细菌数量进行测定。

根系生物量:以选定植株为中心,利用土钻采集深度为 0 ~ 80 cm 的土层筛选根系,根土分离采用淘洗法,样品经过浸泡搅动后反复过筛,根土分离后用镊子取出根系,干燥称量。

1.5 数据处理

1.5.1 最小偏二乘回归分析

PLSR 是一种多元统计数据分析方法,是多元线性回归、典型相关分析和主成分分析的整合和发展。PLSR 方法是将多个自变量到多个因变量或单个因变量的一种回归建模方法。解决了典型回归分析中自变量的多重相关问题,即自变量之间存在高度相关。本研究采用多自变量到单因变量的 PLSR 方法。采用 PLSR 分析了加气灌溉技术下影响土壤呼

吸速率的主要环境因子,在 PLSR 模型中,VIP 是一种多元筛选方法,通过相关自变量的主成分综合来描述自变量对因变量的解释能力,并根据解释能力对自变量进行筛选。

1.5.2 数据统计方法

利用 Excel 2007 对试验数据进行整理,剔除异常数据。采用 SPSS 17.0 进行显著性和相关关系分析,用 Origin 2019 进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤呼吸与土壤环境因子

不同处理下土壤呼吸速率(以 CO_2 计)的季节动态变化存在一定的差异性,AI 处理下测定点均显著高于对照 CK 处理($P < 0.05$)。不同处理下土壤呼吸在玉米生长季内大体均呈现先增大后降低的趋势(图 3,黑色点表示重复试验实测值,下同)。3 年试验中,不同处理下土壤呼吸速率变化特征统计如表 1 所示,3 年春夏茬试验中,AI 土壤呼吸季节变化较对照组 CK 显著增大 15.09%、13.86% 和 20.54% ($P < 0.05$);3 年秋冬茬试验中,AI 土壤呼吸速率季节变化较对照组 CK 显著增大 13.39%、12.30% 和 13.12% ($P < 0.05$)。

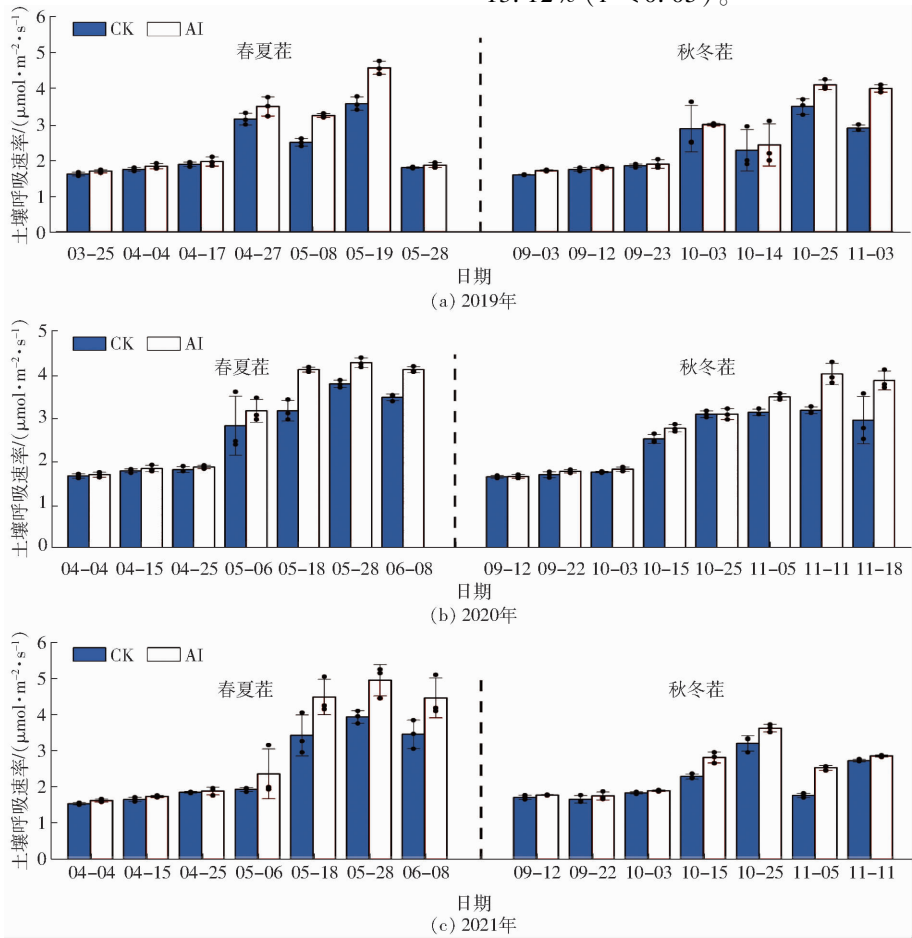


图3 不同处理下土壤呼吸速率

Fig. 3 Soil respiration rate under different treatments

表 1 不同处理下土壤呼吸速率及环境因子变化特征

Tab.1 Change characteristics of soil respiration rate and environmental factors under different treatments													
年份		土壤呼吸速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$		土壤含水率/%		土壤含氧量/%		细菌生物量/ ($\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$)		根系生物量/g	
		AI	CK	AI	CK	AI	CK	AI	CK	AI	CK	AI	CK
2019 年春夏	最大值	4.76	3.78	32.0	32.8	33.2	36.0	16.4	15.2	5.5×10^9	5.0×10^9	38.33	32.00
	最小值	1.66	1.57	22.6	20.9	17.2	18.7	13.0	10.7	5.0×10^8	5.0×10^8	0	0
	平均值	2.67 ± 1.06	2.32 ± 0.74	28.33 ± 2.81	27.79 ± 3.13	28.13 ± 5.08	29.73 ± 5.9	14.76 ± 0.91	12.19 ± 1.32	$3.61\times10^9\pm1.65\times10^9$	$2.54\times10^9\pm1.34\times10^9$	18.98 ± 16.18	15.82 ± 14.01
2019 年秋冬	最大值	4.25	3.70	31.0	31.0	31.1	38.0	17.2	14.1	6.0×10^9	3.5×10^9	37.2	32.2
	最小值	1.70	1.59	27.5	27.3	17.0	18.1	13.7	10.7	1.5×10^9	5.0×10^8	0	0
	平均值	2.71 ± 0.99	2.39 ± 0.74	29.52 ± 1.05	29.06 ± 1.00	21.96 ± 5.07	23.73 ± 6.60	15.21 ± 1.13	12.10 ± 1.10	$4.06\times10^9\pm1.28\times10^9$	$2.40\times10^9\pm9.1\times10^8$	18.77 ± 15.75	16.04 ± 13.84
2020 年春夏	最大值	4.43	3.91	32.0	31.4	46.3	48.6	15.9	14.8	6.0×10^9	4.5×10^9	36.85	30.59
	最小值	1.66	1.64	23.0	22.2	18.0	20.8	12.5	10.8	1.0×10^9	5.0×10^8	0	0
	平均值	3.04 ± 1.14	2.67 ± 0.87	28.11 ± 3.44	27.66 ± 3.22	28.68 ± 10.43	30.92 ± 10.23	14.50 ± 0.87	11.89 ± 1.01	$3.80\times10^9\pm1.52\times10^9$	$2.61\times10^9\pm1.44\times10^9$	17.87 ± 15.28	15.34 ± 13.42
2020 年秋冬	最大值	4.33	3.60	31.9	31.0	42.2	54.1	16.5	14.1	6.0×10^9	5.0×10^9	36.80	31.20
	最小值	1.64	1.64	26.2	25.8	17.9	19.6	12.5	10.7	1.5×10^9	5×10^8	0	0
	平均值	2.83 ± 0.93	2.52 ± 0.68	28.83 ± 1.42	28.50 ± 1.28	24.48 ± 7.51	27.98 ± 10.61	14.60 ± 0.97	11.64 ± 0.93	$3.99\times10^9\pm1.31\times10^9$	$2.89\times10^9\pm1.08\times10^9$	20.17 ± 15.01	17.54 ± 13.16
2021 年春夏	最大值	5.30	4.15	31.5	31.8	32.0	33.8	17.0	14.5	5.5×10^9	5.0×10^9	37.32	33.40
	最小值	1.62	1.54	22.7	22.3	18.4	19.2	11.6	10.5	1.0×10^9	5.0×10^8	0	0
	平均值	3.11 ± 1.46	2.58 ± 0.99	27.81 ± 2.46	27.64 ± 2.63	24.99 ± 4.16	25.83 ± 4.48	15.06 ± 1.34	12.22 ± 1.12	$4.08\times10^9\pm1.35\times10^9$	$3.02\times10^9\pm1.22\times10^9$	17.71 ± 15.28	15.03 ± 13.38
2021 年秋冬	最大值	3.77	3.38	30.6	30.6	44.6	47.4	16.3	14.9	6.5×10^9	4.5×10^9	36.45	31.41
	最小值	1.70	1.62	20.6	19.6	22.6	26.4	12.9	9.7	1.0×10^9	5.0×10^8	0	0
	平均值	2.51 ± 0.67	2.21 ± 0.58	27.38 ± 3.16	27.14 ± 3.23	31.59 ± 5.93	32.98 ± 6.04	14.64 ± 1.04	12.21 ± 1.39	$4.06\times10^9\pm1.53\times10^9$	$2.83\times10^9\pm1.06\times10^9$	18.53 ± 15.35	15.56 ± 13.35

不同处理下土壤温度所有测定点基本不存在显著性差异($P>0.05$),3 年试验中,不同处理下土壤温度变化特征统计如表 1 所示。AI 处理下土壤温度仅部分季节变化高于 CK 处理下的土壤温度,土壤温度变化与气候变化密切相关(图 4)。土壤温度是影响土壤呼吸速率变化的主要因素,从土壤温度峰值与土壤呼吸速率峰值明显相对应也可以看出(图 3、4)。

本研究中,AI 处理下土壤含氧量均显著高于对照处理($P<0.05$)(图 5),3 年试验中,不同处理下土壤含氧量变化特征统计如表 1 所示。3 年春夏茬试验中,AI 土壤含氧量速率季节变化较对照组 CK 显著提高 21.08%、21.95% 和 23.24% ($P<0.05$)。2019 年至 2021 年秋冬茬试验中,AI 土壤含氧量季节变化较对照组 CK 显著提高 25.70%、25.43% 和 19.90% ($P<0.05$)。

本研究中土壤含水率变化波动较大,主要受到降雨和灌溉的影响,降雨主要集中在 9—10 月,除因降雨导致土壤含水率骤升外,所有试验处理中均为玉米苗期含水率最高(图 6),主要是由于玉米播种

前浇透底水的原因。AI 处理下土壤含水率基本低于对照组试验,3 年试验中,不同处理下土壤含水率变化特征统计如表 1 所示。3 年春夏茬试验中,AI 处理下土壤含水率季节变化较对照组 CK 降低 5.69%、7.81% 和 3.36% ($P<0.05$)。3 年秋冬茬试验中,AI 土壤含水率季节变化较对照组 CK 降低 8.06%、14.30% 和 4.40% ($P<0.05$)。

土壤细菌占土壤微生物总量的 94%,是影响土壤呼吸的主要影响因素,不同处理下土壤细菌生物量基本存在显著性差异($P<0.05$)(图 7),3 年试验中,不同处理下土壤细菌生物量变化特征统计如表 1 所示。3 年春夏茬试验中,AI 处理下细菌生物量季节变化较对照组 CK 显著提高 42.13%、45.59% 和 35.10% ($P<0.05$)。3 年秋冬茬试验中,AI 处理下土壤细菌生物量季节变化较对照组 CK 显著提高 69.17%、38.41% 和 43.46% ($P<0.05$)。

不同处理下根系生物量随着种植后时间呈现出“缓慢增加、快速增加、缓慢增加”3 个生长阶段(图 8)。玉米苗期,根系生物量呈缓慢增加趋势,不

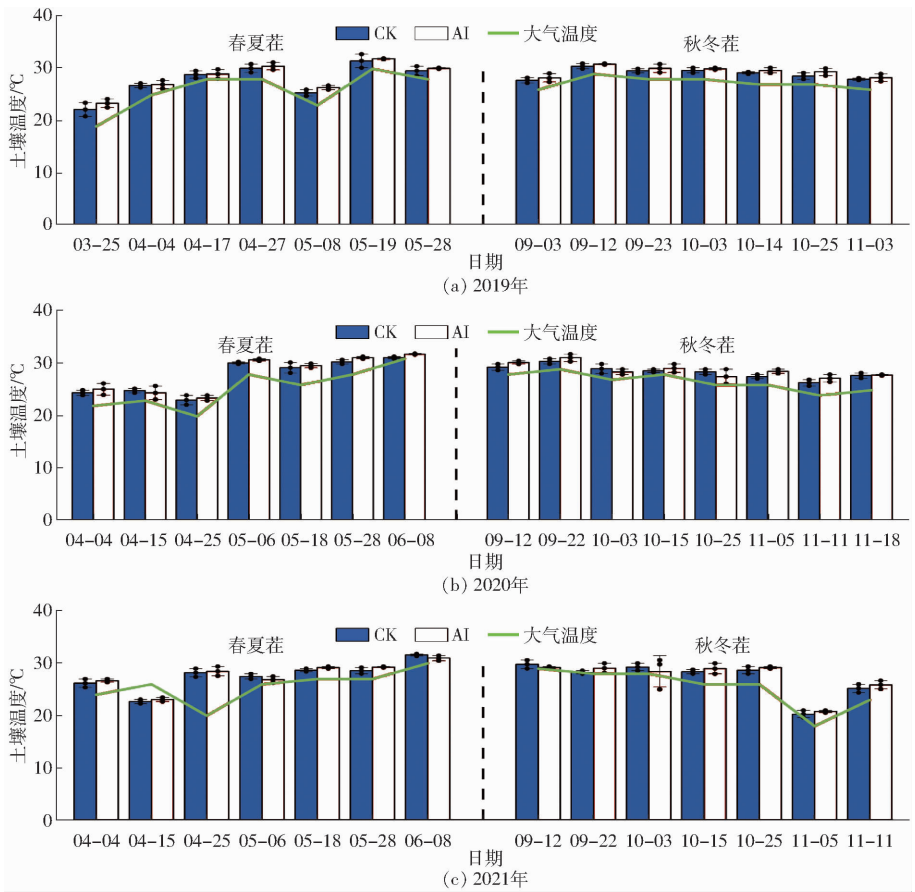


图 4 不同处理下土壤温度

Fig. 4 Soil temperature under different treatments

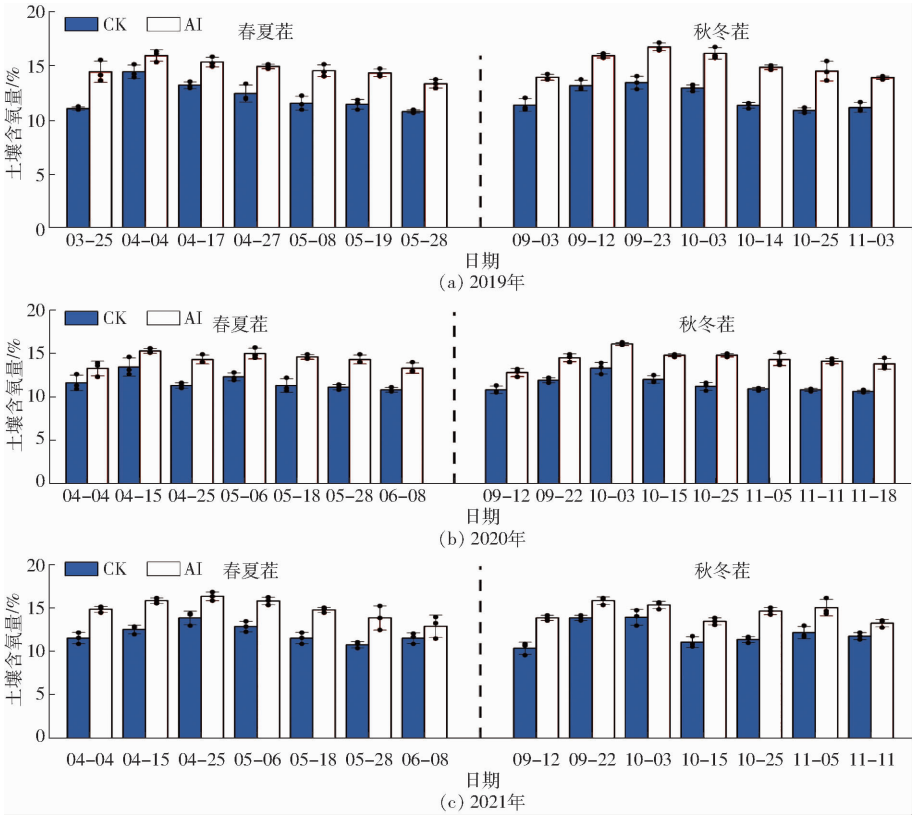


图 5 不同处理下土壤含氧量

Fig. 5 Soil oxygen content under different treatments

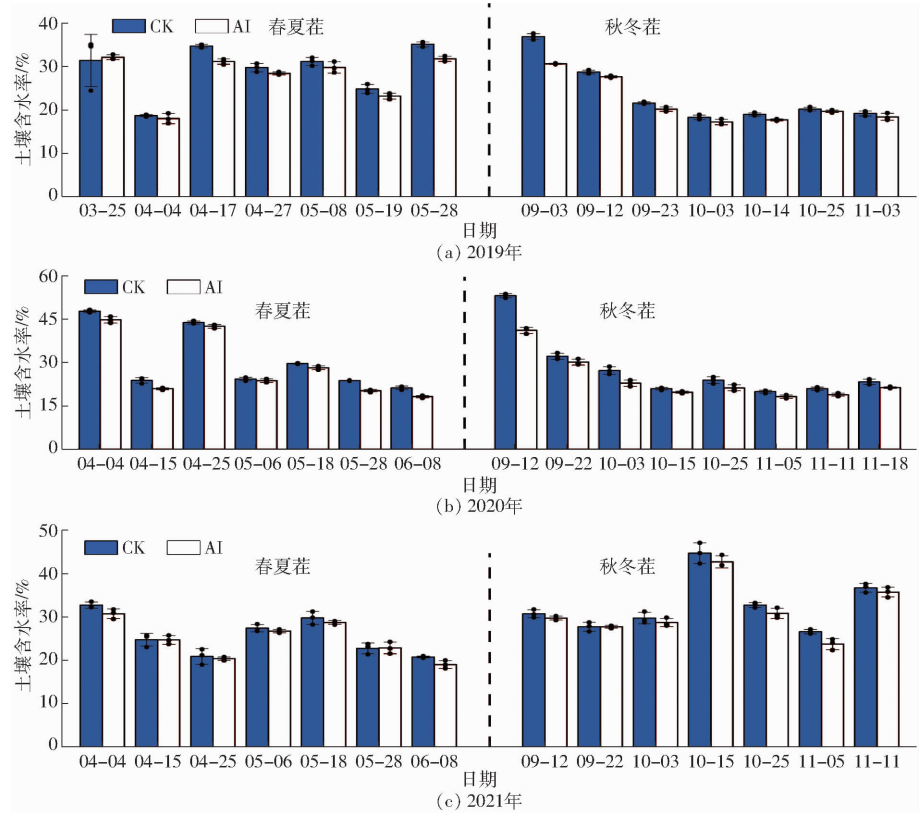


图 6 不同处理下土壤含水率

Fig. 6 Soil water content under different treatments

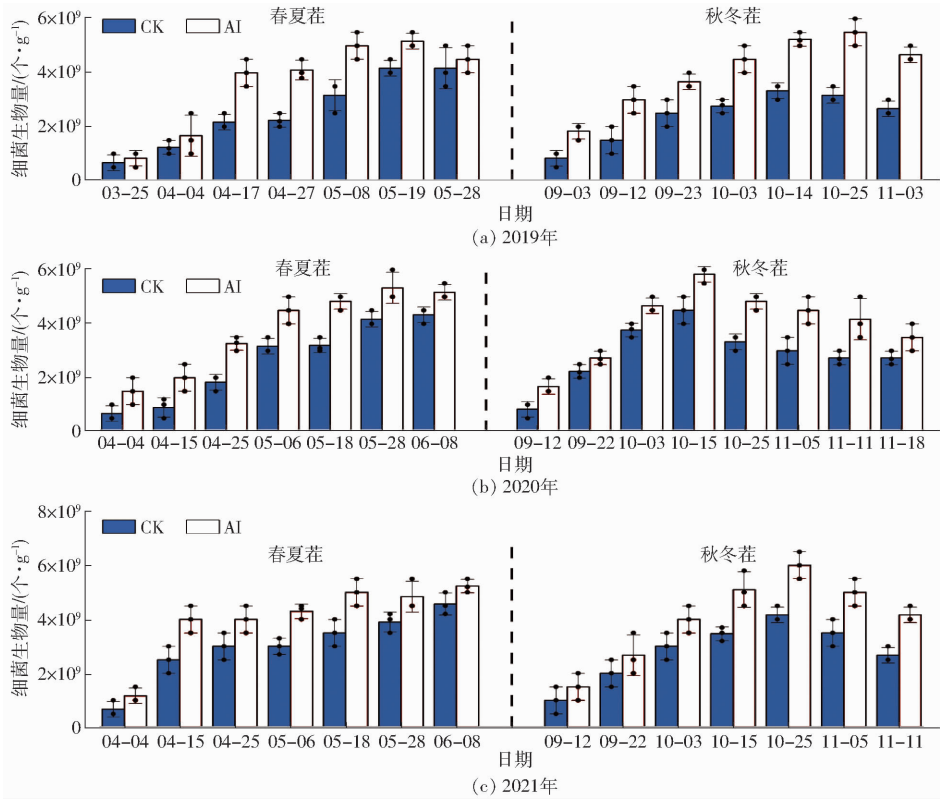


图 7 不同处理下土壤细菌生物量

Fig. 7 Soil bacterial biomass under different treatments

同处理下增加幅度较为一致,玉米进入拔节期后,根系生长发育较快,进入成熟期后,根系生物量呈小幅度增加,后期有降低趋势,但是变化范围较小。不同

试验下,AI 处理下根系生物量均高于对照组,3 年试验中,不同处理下土壤温度变化特征统计如表 1 所示,3 年试验中,AI 处理下根系生物量季节变化较对

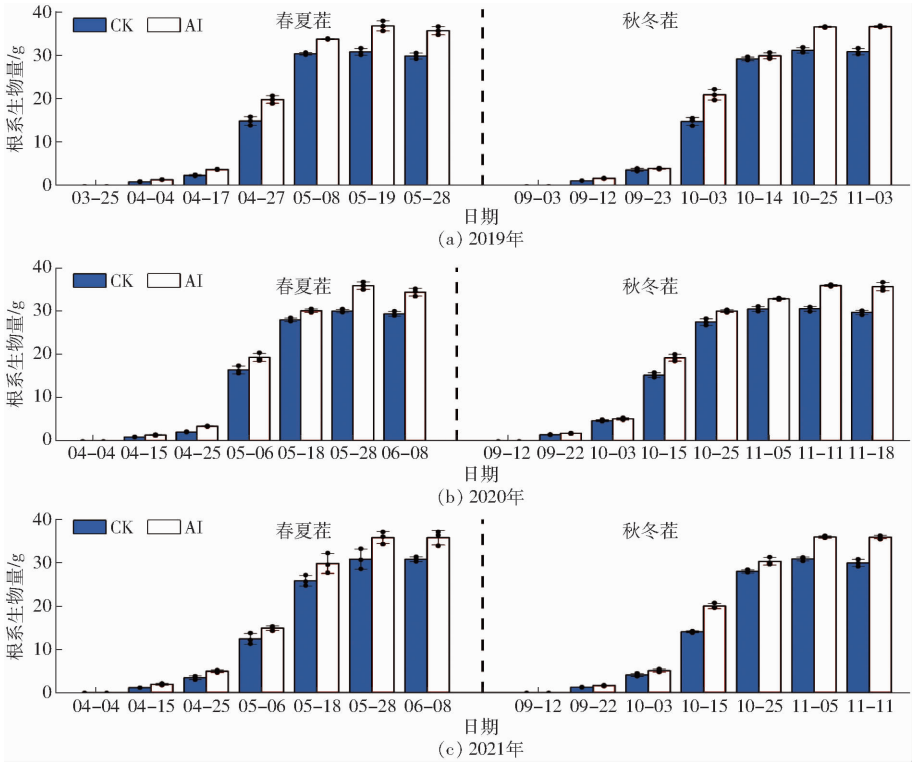


图 8 不同处理下玉米根系生物量
Fig. 8 Maize root biomass under different treatments

照组 CK 依次提高 19.09%、15.31%、15.30%、22.67%、18.29%、21.30% ($P < 0.05$)。

2.2 不同处理下土壤呼吸速率与土壤环境因子的相关性分析

对试验结果进行拟合分析(剔除试验中的异常数据),土壤呼吸速率与各影响因素的关系采用线性模型、非线性模型及多项式模型进行分段拟合,通过系数 R^2 筛选出最优拟合方程(图 9,黑线表示阈值,超过该阈值的预测值表示对土壤呼吸速率变化具有重要影响)。土壤温度是影响土壤呼吸速率的重要环境因子,两种试验处理下均与土壤呼吸速率之间呈二次多项式负相关关系 ($P < 0.05$) (图 9a), AI 和 CK 处理下温度变化范围为 22.3 ~ 32.0℃ 和 19.6 ~ 31.8℃, AI 处理下,土壤温度在 30.8℃ 时土壤呼吸速率达到峰值 5.30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, CK 处理下在 29.8℃ 时土壤呼吸速率达到峰值 4.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。 AI 和 CK 处理下当土壤温度达到 31.2℃ 和 30.6℃ 时,土壤呼吸速率开始逐渐降低。

含氧量与土壤呼吸速率呈线性正相关关系 ($P < 0.05$) (图 9b), AI 和 CK 处理下土壤含氧量变化范围为 12.5% ~ 17.2% 和 9.7% ~ 16.1%, AI 处理下,土壤含氧量为 16.8% 时,土壤呼吸速率达到峰值, CK 处理下,土壤含氧量为 16.2% 时,土壤呼吸速率达到峰值,不同处理下,土壤呼吸速率随着土壤含氧量的升高而逐渐增强。

含水率与土壤呼吸速率之间呈二次多项式负相关 ($P < 0.05$) (图 9c), AI 和 CK 处理下含水率变化范围为 17.0% ~ 46.3% 和 18.1% ~ 54.1%, AI 处理下,土壤含水率为 30.0% 时,土壤呼吸速率达到峰值,当土壤含水率为 17.0% ~ 32.1% 时,土壤呼吸速率随着含水率的升高逐渐增强,当土壤含水率超过 32.1% 时,土壤呼吸速率大致呈现降低趋势; CK 处理下,土壤含水率为 27.4% 时,土壤呼吸速率达到峰值,当土壤含水率为 18.1% ~ 31.5% 时,土壤呼吸速率随着含水率的升高逐渐增强,当土壤含水率超过 31.5% 时,土壤呼吸速率整体呈现降低趋势。

土壤呼吸速率与根系生物量之间呈幂函数正相关 ($P < 0.05$) (图 9d), AI 和 CK 处理下根系生物量变化范围为 0 ~ 37.32 g 和 0 ~ 32.00 g。不同处理下,土壤呼吸速率随着根系生物量的提升而逐渐增强。 AI 处理下,当根系生物量大于 1.93 g 时,土壤呼吸速率开始快速增强,当根系生物量达到 35.12 g 时,土壤呼吸速率达到峰值后保持稳定; CK 处理下,当根系生物量大于 3.21 g 时,土壤呼吸速率开始快速增强,当根系生物量达到 26.87 g 时,土壤呼吸速率达到峰值后保持稳定。

土壤呼吸速率与细菌生物量之间呈指数函数正相关 ($P < 0.05$) (图 9e), AI 和 CK 处理下,细菌生物量变化范围为 $5 \times 10^8 \sim 6 \times 10^9$ 个/g 和 $5 \times 10^8 \sim$

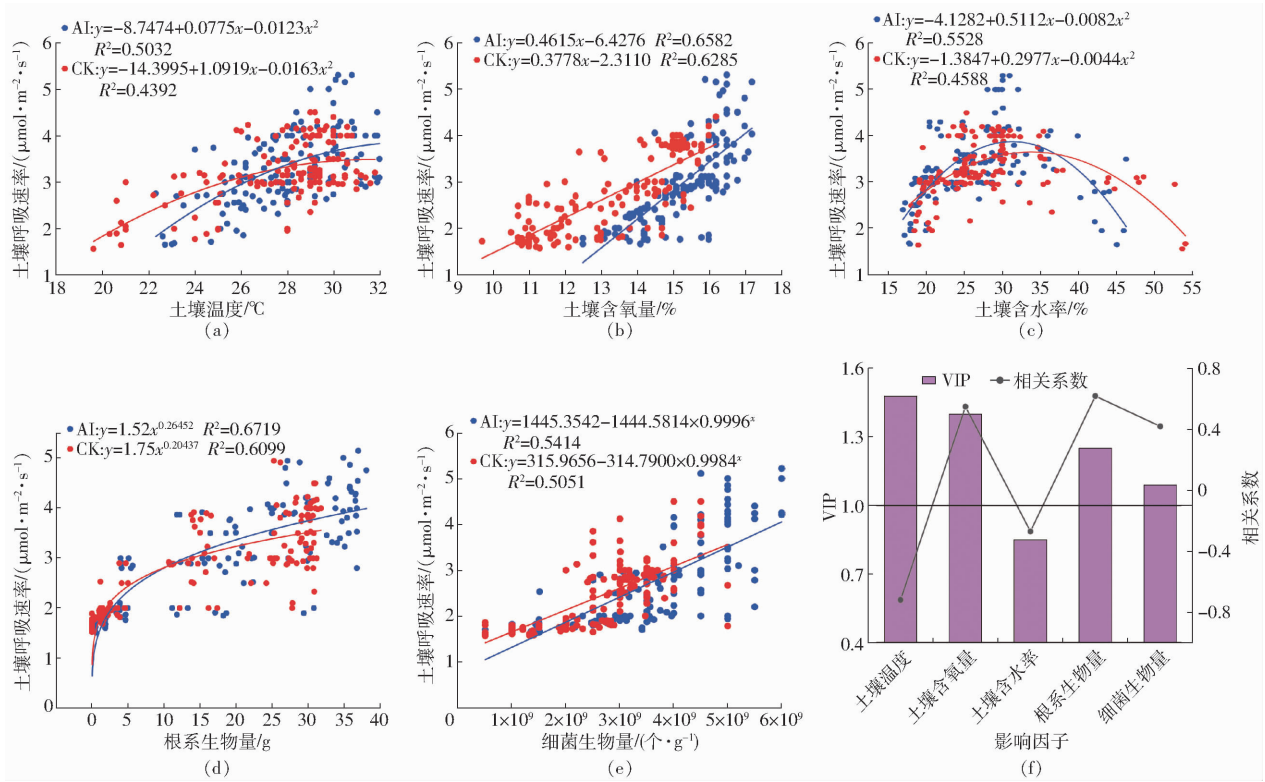


图9 不同处理下红壤土呼吸速率与各影响因子间的回归拟合及VIP与相关系数

Fig.9 Regression curves of soil respiration rate and each influence factors under different treatments, VIP and correlation coefficient

5 × 10⁹个/g。不同处理下,土壤呼吸速率随着细菌生物量的增加而逐渐增强。AI处理下,当细菌生物量达到6 × 10⁹个/g时,土壤呼吸速率达到峰值;CK处理下,当细菌生物量达到4.5 × 10⁹个/g时,土壤呼吸速率达到峰值。

图9f为土壤呼吸速率与主要环境因子及生物因子的相关分析。由图9f可以看出,土壤呼吸速率与土壤含氧量和根系生物量呈极显著正相关,相关系数分别为0.55和0.62;与土壤细菌生物量呈显著正相关,相关系数为0.42;与土壤温度呈极显著负相关,相关系数为-0.72,与土壤含水率相关性较弱,相关系数仅为-0.27。通过PLSR变量重要性投影(VIP)可知,各影响因子对土壤呼吸影响的主次顺序为:土壤温度(VIP值为1.48)、土壤含氧量(VIP值为1.40)、根系生物量(VIP值为1.25)、细菌生物量(VIP值为1.09)、土壤含水率(VIP值为0.85)(图9f)。相关性分析表明,加气灌溉下土壤含氧量、根系生物量和细菌生物量的改变是土壤呼吸速率最关键的影响因子。

3 讨论

3.1 不同处理下土壤呼吸速率及土壤影响因子的变化规律

土壤呼吸是土壤与大气之间气体交换的重要途径,是消耗O₂、释放CO₂的过程^[2,5]。相关研究也表

明,在通气性较差、含氧量较低的土壤中,植株根系与土壤微生物生命活动受到影响,土壤有氧呼吸会显著降低^[1],已有研究表明,加气灌溉处理可以显著改善作物根区土壤含氧量,有效缓解作物根区的低氧胁迫,从而促进土壤呼吸^[23]。本研究中,加气灌溉处理下土壤呼吸速率显著增大,与对照组相比土壤呼吸速率提高12.30%~20.54%(图3)。因此,加气灌溉处理下可以获得较高的土壤呼吸速率,一方面是由于土壤含氧量的提高,为植株根系和微生物生命代谢活动提供了良好的有氧环境,提高根系生长及微生物代谢活力,进而增强了土壤呼吸速率(图3),另一方面是因为对土壤进行加气处理,可以提高土壤通气性,促进土壤与大气之间的气体交换^[10],可以保证土壤呼吸的顺利进行。文献[6,8-11,24-25]研究结果也表明,与常规地下灌溉相比,土壤呼吸速率增大12.5%~20.1%。

不同处理下土壤温度差异较小,基本不存在显著性差异($P > 0.05$)(图4),AI处理下土壤温度仅部分季节变化高于CK处理下的土壤温度,这与于珍珍^[20]、朱艳等^[21]研究结果一致。本研究中土壤含水率变化波动较大,主要受到降雨和灌溉的影响,降雨主要集中在9—10月,除因降雨导致土壤含水率骤升外,所有试验处理中均为玉米苗期含水率最高,主要是由于玉米播种前浇透底水的原因。加气灌溉技术下土壤含水率较对照组降低12%~20%

(图 6), 一是由于加气灌溉条件下, 土壤氧气含量显著增大(图 5), 根系缺氧状况得到明显改善, 植株根系及微生物生命活动旺盛^[21], 因此作物对水分和养分的吸收优于对照处理, 进而土壤含水率有所下降; 二是由于加气灌溉提高了土壤通气性, 水分在土壤中扩散更加均匀, 避免水分在土壤中某一点的堆积, 可以提高土壤水分分布均匀度^[20]。

加气灌溉技术下土壤含氧量较对照组显著增大 19.90% ~ 25.70%, 这一结果在加气灌溉相关研究中均得以证实。本研究中, 由于玉米播种前要浇透水, 土壤含水率过高, 因此, 土壤含氧量在玉米生长初期较低, 随着玉米生长呈现逐渐增大的趋势, 在玉米生长中后期, 土壤含氧量变化主要受到土壤温度和含水率的影响(图 4 ~ 6), 一方面主要是由于降雨或灌溉等原因, 土壤含水率升高, 使土壤 CO_2 不易扩散至大气, 并且限制了大气与土壤之间的 O_2 交换, 导致土壤含氧量降低; 另一方面, 随着大气温度升高, 作物根系和土壤微生物呼吸速率增强, 因此对土壤氧气消耗量增大, 土壤含氧量有下降趋势, 本研究中, 加气处理下即使土壤呼吸作用增强, 对土壤氧气消耗增大, 土壤含氧量在玉米整个生育周期内仍高于对照组 CK(图 5), 因此加气处理可以为根区土壤提供一个良好的供氧环境。

作物根系生长对低氧胁迫较为敏感, 加气灌溉下根系生物量较对照组提高 15.30% ~ 22.67%, 主要是由于土壤环境的改善为作物根系生长提供一个良好的生长环境, 满足根系对土壤氧气的需求, 增强了作物根系对土壤水分及养分的吸收, 促进作物根系生长发育。不同处理下, 土壤根系生物量随着玉米生长呈现苗期到拔节期缓慢增长, 玉米苗期根系生长较为缓慢, 在玉米拔节期到抽雄期, 玉米根系快速生长, 在玉米灌浆期达到最大值后趋于平缓(图 8), 该阶段称为玉米的“生殖阶段”, 主要是玉米籽粒的灌浆与生长。加气灌溉在改善土壤通气性的基础上提高微生物活性, AI 处理下可以显著提高土壤细菌生物量, 较对照组提高 35.10% ~ 69.17%, 且随着年份的增加作用效果越显著(图 7)。土壤细菌生物量的季节变化趋势均与土壤呼吸类似, 即在春夏茬试验中, 细菌生物量均大体呈现增长趋势, 而秋冬茬试验中均大体呈现先增大后下降的季节变化趋势(图 3 ~ 7)。

3.2 不同处理下土壤呼吸速率与土壤环境因子的相关性分析

土壤温度、含水率及含氧量是影响土壤呼吸速率变化的主要土壤环境因子。土壤温度与土壤呼吸速率密切相关, 几乎全面影响了土壤呼吸, 包括腐殖

质分解、根系生长及土壤微生物各项生命活动的进行^[26]。LIU 等^[27]认为温度变化可以解释土壤呼吸速率变化的大部分变异。本研究中, 土壤温度与土壤呼吸速率峰值也具有高度对应性(图 3、4)。大气温度整体是持续上升的, 因此土壤温度呈持续上升的季节变化趋势, 受土壤温度的影响, 土壤呼吸速率也呈持续上升的变化趋势。土壤呼吸季节变化均是玉米苗期最低, 除了 2021 年秋冬茬试验是在玉米抽雄期左右达到峰值以外, 其它试验均是在玉米灌浆期达到峰值后, 再呈持续下降的季节变化趋势。一方面可能是由于玉米前期生长并不旺盛, 因此土壤呼吸受到限制; 另一方面可能是由于玉米苗期土壤含水率过高, 而土壤含氧量较低, 因此土壤呼吸速率也可能是受到土壤含水率和含氧量的限制。而在玉米灌浆期, 土壤和大气温度相对较高, 此时玉米生命活动也逐渐旺盛, 因此土壤呼吸速率在此时达到最高值, 2021 年秋冬茬试验在玉米灌浆期左右气温骤降 8℃ 左右, 对土壤呼吸速率产生影响。但是本研究通过对土壤温度与土壤呼吸速率进行回归拟合可知, 土壤温度与土壤呼吸速率呈二次多项式负相关(图 9a), 当土壤温度达到 31.2、30.6℃ 时, 土壤呼吸速率开始逐渐降低, 这与文献[6, 8]研究不一致, 主要是由于试验地点及试验气候不同造成的, ARREDONDO 等^[28]相关研究表明, 温度过高会对土壤呼吸速率产生一定抑制作用。

本研究中, 不同处理下土壤含氧量与土壤呼吸呈显著正相关关系($P < 0.05$)(图 9b), 文献[28 - 30]研究结果表明, 土壤呼吸与土壤气体扩散速率呈显著正相关, 随着土壤气体扩散速率的增大而增大, 臧明^[7]、朱艳等^[8]研究也表明, 土壤含氧量与土壤呼吸速率为正相关关系, 与本研究结果一致。土壤含水率也是影响土壤呼吸作用的主要控制因子, 通过拟合分析, 土壤含水率与土壤呼吸速率呈二次负相关关系(图 9c), 当土壤含水率在 24.5% ~ 35.2% 之间时, 土壤呼吸速率随着土壤含水率的变化不显著, 侯毛毛等^[31]研究表明, 只有当土壤含水率低于或高于阈值时, 土壤呼吸速率才与土壤含水率呈显著相关, 当土壤含水率介于 24.5% ~ 36.7% 之间时, 与土壤呼吸速率相关性较弱。本研究中, 土壤含水率主要集中在 24.5% ~ 35.2% 之间, 而当土壤含水率低于 20.4% 或高于 40.2% 时, 对土壤呼吸速率的变化趋势造成明显的改变(图 9c), 这是由于土壤含水率升高, 土壤中的通气性变差, 土壤含氧量降低, 土壤呼吸受到抑制, CO_2 无法向大气中扩散, 所以土壤呼吸会发生骤降。

土壤呼吸不仅受到土壤非生物因子的影响, 但

是更多地是受到生物因子的制约,土壤中植株根系及微生物数量是影响土壤呼吸速率的重要生物因素^[22]。土壤微生物呼吸占土壤呼吸的 40%,根系呼吸占土壤呼吸的 40%~50%,其余为土壤中的凋落物和有机质分解产生 CO₂。前人研究表明,土壤微生物量的增加会增强土壤呼吸,土壤呼吸速率随着土壤细菌生物量和根系生物量的升高而逐渐增强^[32]。本研究中根系生物量与土壤呼吸速率呈幂函数正相关关系(图 9d),细菌生物量与土壤呼吸速率呈指数正相关关系(图 9e),这与前人研究结论一致。

本研究 AI 和 CK 处理下土壤呼吸速率对各影响因素的敏感性有差异。通过变量重要性投影(VIP)可知,各影响因子对土壤呼吸影响的主次顺序为:土壤温度(VIP 值为 1.48)、土壤含氧量(VIP 值为 1.40)、根系生物量(VIP 值为 1.25)、细菌生物量(VIP 值为 1.09)、土壤含水率(VIP 值为 0.85)(图 9f)。本研究土壤含水率大部分处于一个较为适宜的水平,因此对土壤呼吸影响不显著,只有当土壤含水率低于 20.4%或高于 40.2%时,对土壤呼吸的变化趋势造成明显的改变(图 9c)。土壤细菌及根系生物量对土壤碳释放起着至关重要的作用^[33],然而,土壤微生物和植物根系的功能可能存在显著冗余,土壤生物特性在一定阈值以下的变化对土壤功能的影响可能很小^[34],因此,土壤微生物和植物根系矿化受到温度、含氧量、pH 值及活性有机质含量等土壤非生物因子的强烈调控,这与本研究结果一致。尽管加气灌溉对提升土壤温度有一定的影响,但是效果并不显著,土壤温度的变化主要与大气温度有关(图 4),与是否进行加气处理关系不大。

因此,可以认为土壤含氧量、根系生物量和细菌生物量是加气灌溉作用下影响土壤呼吸速率最重要的环境与生物因素。

4 结 论

(1)通过 2019—2021 年连续 3 年共 6 茬试验研究得出,不同处理下,玉米不同生育阶段土壤呼吸速率均呈现先升高、后降低的趋势。与对照组 CK 相比,AI 处理后土壤呼吸速率可以提高 12.30%~20.54%,土壤含氧量、根系生物量及细菌生物量分别提高 19.90%~25.70%、15.30%~22.67%、35.10%~69.17%,土壤含水率降低 3.36%~14.30%,不同处理对土壤温度影响不显著。

(2)相关性分析表明,AI 与 CK 处理下,土壤温度、土壤含水率均与土壤呼吸速率呈二次多项式负相关,土壤含氧量与土壤呼吸速率呈线性正相关($P<0.05$),根系生物量与土壤呼吸速率呈幂函数正相关,土壤细菌生物量与土壤呼吸速率呈指数正相关,土壤呼吸速率均随着土壤含氧量、根系生物量和细菌生物量的升高逐渐增强,当土壤温度高于 30.6℃、土壤含水率高于 40.2%时,土壤呼吸速率开始逐渐降低。

(3)变量重要性投影(VIP)表明,土壤呼吸速率对各影响因素的敏感性有差异,各影响因子对土壤呼吸影响的主次顺序为:土壤温度(VIP 值为 1.48)、土壤含氧量(VIP 值为 1.40)、根系生物量(VIP 值为 1.25)、细菌生物量(VIP 值为 1.09)、土壤含水率(VIP 值为 0.85)。综上,加气灌溉技术主要通过提高土壤含氧量、根系生物量和细菌生物量对土壤呼吸速率产生影响。

参 考 文 献

[1] ZHU Yan,MILES D,CAI Huanjie,et al. The effects of aerated irrigation on soil respiration, oxygen, and porosity[J]. Journal of Integrative Agriculture,2019,18:2854–2868.

[2] 陈绍民,杨硕欢,张保成,等. 不同水肥条件下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 农业机械学报,2021,52(5): 229–238.
CHEN Shaomin,YANG Shuohuan,ZHANG Baocheng,et al. Carbon balance in summer maize/winter wheat farmland ecosystem under different water and fertilizer conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(5): 229–238. (in Chinese)

[3] BENJAMIN J G,NIELSEN D C,VIGIL M F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production[J]. Geoderma,2003,116:137–148.

[4] 张忠学,李铁成,齐智娟,等. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(6):301–308.
ZHANG Zhongxue,LI Tiecheng,QI Zhijuan,et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):301–308. (in Chinese)

[5] 李元,牛文全,张明智,等. 加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(8):121–129.
LI Yuan,NIU Wenquan,ZHANG Mingzhi,et al. Effects of aeration on rhizosphere soil enzyme activities and soil microbes for muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(8):121–129. (in Chinese)

[6] 李元. 加气灌溉对大棚甜瓜和番茄生长的影响及其机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.

- LI Yuan. The effect of aerated irrigation on the growth of melon and tomato in the greenhouse and its mechanism[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [7] 臧明. 水肥气耦合滴灌下土壤-作物响应机理研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- ZANG Ming. Research on soil - crop response mechanism under water-fertilizer-gas coupled drip irrigation[D]. Zhengzhou: North China University of Water Conservancy and Hydropower, 2020. (in Chinese)
- [8] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 223 - 232.
- ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Effects of climate factors and soil parameters on soil respiration under oxygation conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 223 - 232. (in Chinese)
- [9] 臧明, 雷宏军, 潘红卫, 等. 增氧地下滴灌改善土壤通气性促进番茄生长[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 109 - 118.
- ZANG Ming, LEI Hongjun, PAN Hongwei, et al. Aerated subsurface drip irrigation improving soil aeration and tomato growth[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(23): 109 - 118. (in Chinese)
- [10] 朱艳, 蔡焕杰, 侯会静, 等. 加气灌溉对番茄根区土壤环境和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 157 - 162.
- ZHU Yan, CAI Huanjie, HOU Huijing, et al. Effect of aerated irrigation on root-zone environment and yield of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 157 - 162. (in Chinese)
- [11] 张文正, 翟国亮, 王晓森, 等. 微纳米加气灌溉对温室番茄生长、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 24 - 27.
- ZHANG Wenzheng, ZHAI Guoliang, WANG Xiaosen, et al. Aerating irrigation with mixed nano-micro air bubbles increases growth, yield and quality of greenhouse tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(10): 24 - 27. (in Chinese)
- [12] BHATTARAI S P, MCHUGH A, LOTZ G. The response of cotton to subsurface drip and furrow irrigation in a vertisol[J]. Experimental Agriculture, 2006, 42: 29 - 49.
- [13] 崔冰晶, 牛文全, 杜娅丹, 等. 施氮和加气灌溉对黄瓜根区土壤环境及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2020(4): 27 - 32.
- CUI Bingjing, NIU Wenquan, DU Yadan, et al. Effects of nitrogen application and aerated irrigation on soil environment and yield in cucumber root area[J]. Water-saving Irrigation, 2020(4): 27 - 32. (in Chinese)
- [14] LI Y, NIU W, JIAN X, et al. Root morphology of greenhouse produced muskmelon under subsurface drip irrigation with supplemental soil aeration[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201: 287 - 294.
- [15] PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a vertisol[J]. Crop and Pasture Science, 2014, 64: 1171 - 1181.
- [16] 饶晓娟. 增氧对新疆膜下滴灌棉田土壤肥力及棉花生长的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- RAO Xiaojuan. Effect of oxygen increase on soil fertility and cotton growth in Xinjiang drip irrigated cotton field[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [17] BHATTARAI S P, BALSYS R J, WASSINK D, et al. The total air budget in oxygenated water flowing in a drip tape irrigation pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 52: 121 - 130.
- [18] LEI H J, BHATTARAI S P, BALSYS R, et al. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and Mazzei air injector in soil-less irrigation systems[J]. Irrigation Science, 2016, 3: 421 - 430.
- [19] ABUARAB M, MOSTAFA E, IBRAHIM M. Effect of air injection under subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of corn in a sandy clay loam soil[J]. Journal of Advanced Research, 2013, 4: 493 - 499.
- [20] 于珍珍. 水肥气耦合调控土壤环境对玉米生长影响的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- YU Zhenzhen. Study on the influence of water, fertilizer and gas coupling on the growth of corn[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [21] 朱艳. 温室番茄生长和根区土壤微环境对加气灌溉的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- ZHU Yan. Response mechanism of greenhouse tomato growth and root zone soil microenvironment to aerated irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [22] 张弛. 内蒙古典型草原土壤呼吸的日动态特征及驱动因素[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- ZHANG Chi. Diurnal dynamic characteristics and driving factors of soil respiration in a typical steppe of Inner Mongolia[D]. Huhhot: Mongolian University, 2021. (in Chinese)
- [23] 陈潇洁, 吕德生, 王振华, 等. 加气灌溉及水氮耦合滴灌对加工番茄产量及品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(11): 191 - 200.
- CHEN Xiaojie, LÜ Desheng, WANG Zhenhua, et al. Effects of water and nitrogen coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated irrigation[J]. China Agricultural Science and Technology Review, 2021, 23(11): 191 - 200. (in Chinese)
- [24] BHATTARAI S P, MIDMORE D J, PENDERGAST L. Water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols[J]. Irrigation Science, 2008, 26: 439 - 450.
- [25] HOU H, CHEN H, CAI H C. CO₂ and N₂O emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. Atmospheric Environment, 2016, 132: 69 - 76.
- [26] WEN L, JIN L, XIAO Z, et al. Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Ecological Engineering, 2018, 111: 134 - 142.

the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 121 – 125. (in Chinese)

[22] 王咏梅, 黄晓鹏, 吴劲锋, 等. 不同工艺参数下苜蓿草粉环模制粒机流场的模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 267 – 274.

WANG Yongmei, HUANG Xiaopeng, WU Jinfeng, et al. Numerical simulation and verification of flow field in ring die pellet mill at different process parameters for alfalfa[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 267 – 274. (in Chinese)

[23] 韩盛林. 环模生物质成型机的研究与设计[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

HAN Shenglin. Research and design on circular mould molding machine of biomass[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

[24] 孙营超. 环模制粒机制粒工艺研究与控制系统开发[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

SUN Yingchao. Studying the pelleting technics and developing control system of hoop standard granulator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[25] 张堃. 基于机器视觉的参数不确定大时滞环模制粒机的监督控制系统研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.

ZHANG Kun. A new machine vision based supervision control system for granulators of large time delay and parameter uncertainty[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016. (in Chinese)

[26] THARANIDHARAN V, SAKTHIVEL R, REN Y, et al. Robust finite-time PID control for discrete-time large-scale interconnected uncertain system with discrete-delay[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 192: 370 – 383.

[27] VEINOVIĆ S, STOJIC D, JOKSIMOVIĆ D. Optimized four-parameter PID controller for AVR systems with respect to robustness[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107529.

[28] HARINATH E, MANN G K I. Design and tuning of standard additive model based fuzzy PID controllers for multivariable process systems[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 38(3): 667 – 674.

[29] XIE D, CHEN L, LIU L, et al. Actuators and sensors for application in agricultural robots: a review[J]. Machines, 2022, 10(10): 913.

[30] 陈黎卿, 解彬彬, 李兆东, 等. 基于双闭环 PID 模糊算法的玉米精量排种控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 33 – 41.

CHEN Liqing, XIE Binbin, LI Zhaodong, et al. Design of control system of maize precision seeding based on double closed loop PID fuzzy algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 33 – 41. (in Chinese)

[31] ZHANG D, MIN H J. A sport monitoring system based on the optimized adaptive fuzzy PID control algorithm in onenet internet of things and cloud platform[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 8234066.

[32] 贺刚, 蔡晓华, 白阳, 等. 基于模糊 PID 的犊牛代乳粉奶液温度控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 266 – 276.

HE Gang, CAI Xiaohua, BAI Yang, et al. Design and test of temperature control system of calf milk replacer solution based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 266 – 276. (in Chinese)

(上接第 401 页)

[27] LIU Ying, HAN Shijie, ZHOU Yumei, et al. Soil and root respiration under elevated CO₂ concentrations during seedling growth of *Pinus sylvestris* var. *sylvestriformis*[J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 660 – 665.

[28] ARREDONDO T, DELGADO-BALBUENA J, HUBER-SANNWALD E, et al. Does precipitation affects soil respiration of tropical semiarid grasslands with different plant cover types[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 251: 218 – 225.

[29] HURSH A, BALLANTYNE A, COOPER L, et al. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale[J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 2090 – 2103.

[30] ANNA G, OLGA O, CHENGRONG C, et al. Changed by fire: linking C and energy fluxes by microbial decomposition of soil organic matter after frequent forest burning events[J]. EGU General Assembly, 2019, 21: 122 – 126.

[31] 侯毛毛, 陈竞楠, 林志远, 等. 滴灌和微生物有机肥对设施土壤呼吸的耦合作用及机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 104 – 112.

HOU Maomao, CHEN Jingnan, LIN Zhiyuan, et al. Coupling effect and mechanism of drip irrigation and microbial organic fertilization on soil respiration in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 104 – 112. (in Chinese)

[32] WANG Wei, GUO Jixun. The contribution of root respiration to soil CO₂ efflux in *Puccinellia tenuiflora* dominated community in a semi-arid meadow steppe[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 516: 697 – 703.

[33] HAN G, ZHOU G, XU Z, et al. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem[J]. Soil Biol. Biochem., 2007, 39(2): 418 – 425.

[34] XIAO H, LI Z, CHANG X, et al. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion[J]. Geoderma, 2018, 329: 73 – 81.