doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.032

加气渗灌下土壤呼吸速率变化与水-氧-热耦合效应

赵云龙[1]　安增龙[1]　于珍珍[2]　WANG Fang[3]　王宏轩[4]　汪　春[4]

(1.黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2.广东海洋大学机械工程学院, 湛江 524088;
3.内布拉斯加大学林肯分校农学与园艺学系, 林肯 NE 68583;
4.中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 湛江 524091)

摘要: 为探明加气渗灌技术下土壤含水率、土壤含氧量与土壤温度对土壤呼吸速率(Soil respiration rate,SRR)的主导作用及协同机制,揭示加气渗灌(Aerated infiltration irrigation,AI)如何通过改善根区供氧条件,缓解高湿抑制效应,本文以国家土壤质量湛江观测实验站为平台,开展 2023—2025 年田间定位试验,测定加气渗灌(AI)和普通渗灌(CK)条件下 SRR、土壤含水率、土壤含氧量、土壤温度季节性与昼夜变化规律,并探究其互动响应关系。结果表明:AI 处理年均 SRR 分别提升 21.0%($P<0.05$)、23.5%($P<0.01$)、22.7%($P<0.05$),在降雨偏多年份(2025 年),CK 波动更大而 AI 仍保持较高水平,不同处理下土壤温度差异不显著($P>0.05$)但趋势一致,土壤含水率高值出现频率降低且土壤含氧量持续提高;在典型晴好日 24 h 连续观测中,不同处理下土壤温度日变化与大气温度高度一致,且差异不显著($P>0.05$),SRR 均呈单峰型日变化,AI 处理下日均 SRR 和土壤含氧量较 CK 分别提升 22.22% 和 20.76%。三因子可解释 SRR 变化 78% 以上,土壤含水率与 SRR 呈显著正相关,土壤含氧量、土壤温度与 SRR 呈二次多项式负相关,且在特定温度阈值(27.5~27.6℃)后,SRR 开始下降。土壤含水率与土壤含氧量是驱动 SRR 变化的主要因子。SEM 结果显示,AI 处理使氧气成为 SRR 的主导因子,增强"水分→氧气→SRR"的正向通路,降低土壤温度对 SRR 的主导效应。研究结果可为完善加气渗灌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: 加气渗灌; 红壤土; 土壤呼吸速率; 水-氧-热耦合; SEM

中图分类号: S274; S154.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2026)12-0343-11　　**OSID:**

Changes in Soil Respiration Rates under Aerated Infiltration Irrigation and Water – Oxygen – Heat Coupling Effects

ZHAO Yunlong[1]　AN Zenglong[1]　YU Zhenzhen[2]　WANG Fang[3]　WANG Hongxuan[4]　WANG Chun[4]

(1. *College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing* 163319, *China*
2. *College of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang* 524088, *China*
3. *Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE* 68583, *USA*
4. *South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang* 524091, *China*)

Abstract: Aiming to investigate the dominant roles and synergistic mechanisms of soil moisture content, soil oxygen content, and soil temperature in determining soil respiration rate (SRR) under aerated infiltration irrigation (AI) conditions, and elucidate how AI alleviates the high-humidity suppression effect by improving root zone oxygen supply, the National Soil Quality Zhanjiang Observation Station was utilized as a platform to conduct field-based, fixed-location experiments from 2023 to 2025. Seasonal and diurnal variations in SRR, soil moisture content, soil oxygen content, and soil temperature were measured under AI and conventional infiltration irrigation (CK) conditions, with their interactive responses investigated. Results indicated that AI treatments increased annual average SRR by 21.0% ($P<0.05$), 23.5% ($P<0.01$), and 22.7% ($P<0.05$), respectively. During the rainy year (2025), CK exhibited greater fluctuations while AI maintained higher levels. Soil temperature differences were not

收稿日期: 2026-01-11　修回日期: 2026-01-30
基金项目: 广东海洋大学科研启动项目(060302062313)和海南省自然科学基金青年基金项目(325QN434)
作者简介: 赵云龙(1988—),男,博士生,主要从事农业工程与信息技术研究,E-mail: zhaoyunlong@catas.cn
通信作者: 安增龙(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业工程技术研究,E-mail: anzl2001@163.com

significant ($P > 0.05$) but showed consistent trends across treatments. The frequency of high soil moisture content was decreased, while soil oxygen content was continuously increased. During 24-hour continuous observations on typical clear days, the diurnal variations in soil temperature under different treatments highly correlated with atmospheric temperature, with no significant differences ($P > 0.05$). SRR exhibited a unimodal diurnal variation pattern. Under AI treatment, the average daily SRR and soil oxygen content were increased by 22.22% and 20.76%, respectively, compared with that of CK. The three factors explained over 78% of SRR variation. Soil moisture content showed a significant positive correlation with SRR, while soil oxygen content and soil temperature exhibited quadratic polynomial negative correlations with SRR. Beyond a specific temperature threshold (27.5 ~ 27.6℃), SRR began to decline. Soil moisture content and soil oxygen content were the primary drivers of SRR variation. SEM results indicated that AI treatment made oxygen the dominant factor influencing SRR, strengthening the positive pathway "moisture → oxygen → SRR" and reducing the dominant effect of soil temperature on SRR. These findings can provide theoretical support for refining the response mechanism of soil respiration rate variation under aerated infiltration irrigation and for rationally formulating effective soil carbon emission control management measures.

Key words: aerated infiltration irrigation; red soil; soil respiration rate; water - oxygen - heat coupling; SEM

0 引言

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,也是连接"土壤-植物-大气"界面的关键过程之一,其速率变化反映土壤微生物与根系代谢活动强弱,同时也是评估土壤生物活性、碳循环强度及生态系统健康状况的重要指标[1-3]。影响土壤呼吸速率的主要环境因子包括温度、含水率和含氧量等,三者通过改变土壤孔隙结构、氧气扩散速率及微生物代谢活性形成复杂的非线性耦合关系[4-6],尤其在南方红壤地区,土壤质地黏重、通气性差、雨季持续时间长,采用传统滴灌或渗灌方式虽然能够有效提高水分利用效率,但在长期高湿环境下易造成土壤孔隙堵塞与氧气扩散受限,形成"缺氧带",会导致根区缺氧与有机质分解受限,进一步抑制土壤呼吸过程及养分循环效率。

加气渗灌技术以渗灌管路系统为基础,利用空气泵或罗茨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[7]。针对加气灌溉技术前期已开展了相关研究,结果表明,与常规渗灌技术相比,加气渗灌技术对温室番茄[8-10]、黄瓜[11]、甜瓜[12]、棉花[13]、玉米[4,6]等作物种植的土壤微环境及土壤呼吸速率均产生了积极影响。前期研究表明,加气渗灌技术主要作用机理是通过改善根区土壤环境条件提升作物生理活性和产量表现。其核心过程一方面是由于加气渗灌能够显著提高土壤氧气含量,增强氧气在孔隙中扩散与分布均匀性,缓解传统灌溉下土壤通气性差、局部缺氧的问题;另一方面,该技术可以优化土壤水分的空间分布,形成更稳定的水-气平衡,为微生物群落提供适宜的生存与代谢环境,微生物活性增强,土壤有机质分解和呼吸速率显著提升,促进了碳素与养分的循环利用。最终,这一系列变化共同改善了作物根区的氧化还原状态和营养供给环境,促进根系生长发育,从而实现作物产量与品质的协同提升。

综上,现有研究多聚焦于加气渗灌对土壤环境因子的改善或抑制效应,如土壤环境因子及作物生长指标的提升或降低,对其内在机理与多因素协同效应缺乏系统认识,大多研究基于短期或单季试验数据,尚未形成对加气渗灌长期效应的连续观测与定量认知。尤其在典型南方红壤地区,由于土体结构致密、持水性强、通气性差,气体在土壤孔隙中扩散与迁移规律更加复杂[6,14],加气渗灌下土壤呼吸速率动态响应特征尚不明确。同时,不同灌溉条件下水-氧-热三因子对土壤呼吸速率的主导作用及其交互效应尚未得到定量验证,在一定程度上限制了加气渗灌技术的机理性认识、模型化模拟与优化调控应用。探讨通过系统观测与定量分析方法,揭示加气渗灌条件下土壤呼吸速率与水分、氧气、温度之间的耦合关系,明确关键控制因子及作用路径具有重要意义。

基于此,本文以国家土壤质量湛江观测实验站为研究平台,选取典型红壤土为研究对象,设置加气渗灌(AI)与普通渗灌(CK)2 种处理方式,通过连续观测季节性和昼夜变化,结合土壤温度(T)、土壤含水率(θ)、含氧量(O_2)对土壤呼吸速率(SRR)的影响,探究在水-氧-热三因子耦合作用下动态变化规律,利用结构方程模型(Structural equation modeling,

SEM)分析土壤含水率-土壤含氧量-土壤温度三因子对 SRR 的主导与耦合路径，为补充完善加气渗灌技术下土壤呼吸排放机理及该技术推广应用提供理论基础和实践依据。

1　研究区域与研究方法

1.1　研究区概况

试验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，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、有机质含量分别为 60.05 mg/kg、20.13 mg/kg、75.23 mg/kg 和 18.05 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和气温。

1.2　试验设计

基于 2023—2025 年秋冬茬玉米生育期(9—12 月)开展田间定位试验。设置 2 种试验方案，分别为加气渗灌(AI)与普通渗灌(CK)，每个处理 3 次重复，共 6 个试验小区，每个试验小区面积为 12.5 m^2(5 m×2.5 m)，相邻小区设大于等于 2 m 缓冲带避免水气串扰，管网独立布设，阀门分区控制。利用 E601 型蒸发盘测量蒸发量控制灌水量。灌溉时间为 08:00—12:00 或 16:00—18:00，灌溉周期为 3～4 d。灌水量计算式为[15]

$$W = AE_PK_P \tag{1}$$

式中　W——每个处理的灌溉量，L

A——单个滴头所控制面积，取 0.12 m^2(0.35 m×0.35 m)

E_P——2 次灌溉间隔期间由蒸发皿测得蒸发量，mm

K_P——作物-蒸发皿系数

其中 K_P 玉米 VE－V6 阶段为 0.6，V6－VT 阶段为 0.8，VT－R2 阶段为 1.0，R2－R5 阶段为 0.8[6]。

在渗灌主管串联罗茨风机供气，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，加气量计算为[16]

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

式中　V——每次加气量，L

S——垄横截面积，取 1 500 cm^2

L——垄长，m

ρ_s——土壤容重，取 1.62 g/cm^3

ρ_b——土壤密度，用环刀法测定 0～100 cm 土壤密度平均值为 2.67 g/cm^3

根据小区实际种植面积得出加气量为 324.6 L。

考虑本地区在夏季高温多雨条件下易受病虫害侵袭[17]，每年 9 月—次年 1 月气候特点是温度适中，降水量均匀，所以本文玉米种植均选择“秋冬茬”玉米，供试品种为“惠玉甜 3 号”，玉米种植参数如图 1 所示，种植密度为 1.44×10^4 株/hm^2。试验期间灌水量、降水量及施肥情况均按照当地农艺措施开展(图 2)，为表征试验地管理背景，补充整理了 2022 年灌溉与施肥记录作为历史基线。

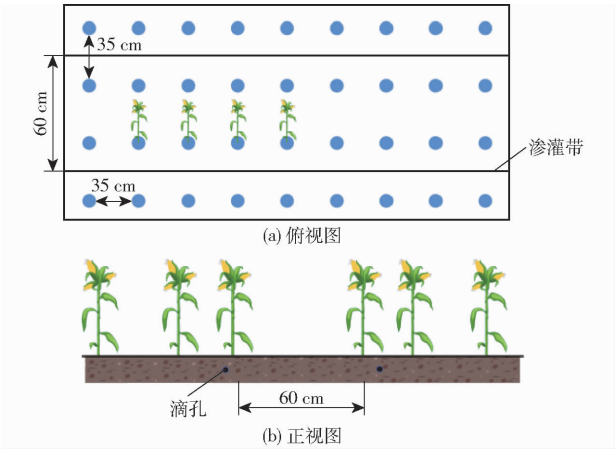

图 1　加气渗灌下玉米种植模式示意图

Fig. 1　Schematics of corn cultivation under aerated drip irrigation

1.3　测定指标与方法

大多旱地作物(玉米、番茄、棉花)0～20 cm 是根系密度最高、根系呼吸最强区域，既是根部呼吸与微生物分解作用的主要发生带[4,16-17]，也是灌溉水

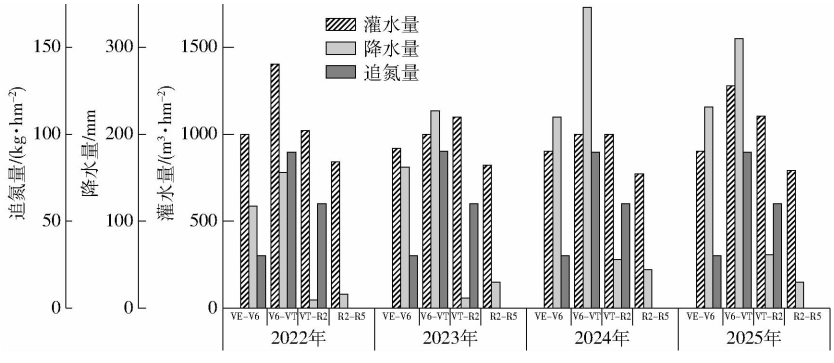

图 2　试验期间玉米不同生育阶段降水及灌溉情况

Fig. 2　Precipitation and irrigation conditions during different growth stages of maize throughout trial period

分和氧气变化最敏感的土层,具有典型的“气-水平衡过渡特性”,因此,在此深度测定含水率与含氧量,能最直接反映根区水-气环境对土壤呼吸速率的影响。

(1)土壤呼吸速率:利用 Li-6400 型便携式气体分析系统测定,土壤呼吸环测得土壤呼吸速率为仪器 2 次循环测量平均值。日变化为从 07:00 开始的 24 h 内,每 2 h 测量 1 次 SRR,季节性变化测量当天 07:00—09:00 之间 SRR。测量前需去除 PVC 环内动植物活体,除开始日期和收获日期外,玉米生长阶段每 10 d 测量 1 次,如遇强降雨天气则推迟测量时间[18]。

(2)土壤含水率和土壤温度: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含水率和土壤温度进行全程跟踪测量,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,取平均值作为该组测定结果,测量日期与土壤呼吸速率测量日期一致。

(3)土壤含氧量:利用氧气测量仪(MO-200 Oxygen Meter)测量距离土壤表层 20 cm 的含氧量,数据记录器每 0.5 h 记录 1 次氧传感器数据,测量日期、时间与土壤呼吸速率测量一致。

1.4 数据统计

采用 Microsoft Excel 2020 绘制图表,使用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析,并采用 Duncan 多重比较法($P<0.05$)判定显著差异,土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水率、土壤含氧量之间单因子响应关系,使用 Origin 2022 软件作图。为分析多因子间协同效应与主导路径,利用 AMOS 26.0 构建结构方程模型(SEM),评估土壤温度、土壤含水率、土壤含氧量对 SRR 直接效应、间接效应与总效应,并比较加气渗灌(AI)与普通渗灌(CK)2 种处理的路径差异。相关性检验采用 PLSR 进行分析,显著性水平设定为 $P<0.05$,极显著水平为 $P<0.01$。

2 结果与分析

2.1 不同指标季节变化规律

通过对不同技术下 SRR 时序变化规律进行统计(图 3a),AI 处理下土壤呼吸速率显著高于 CK 处理,不同年份统计结果表明,2023—2025 年 AI 处理下 SSR 分别提升 21.0%($P<0.05$)、23.5%($P<0.01$)、22.7%($P<0.05$)。特别是在降雨量较大的年份(2025 年),CK 处理下 SRR 数值波动幅度较大,AI 处理始终保持较高水平,表明 AI 处理能够缓冲年际气候差异对土壤呼吸过程的影响。土壤温度 T 处理如图 3b 所示,不同处理之间不存在显著性差异($P>0.05$),但根据统计结果可知,AI 处理下 T 整体略高于 CK,但差异较小($P>0.05$),其主要受大气温度变化控制,AI 与 CK 处理下土壤温度变化

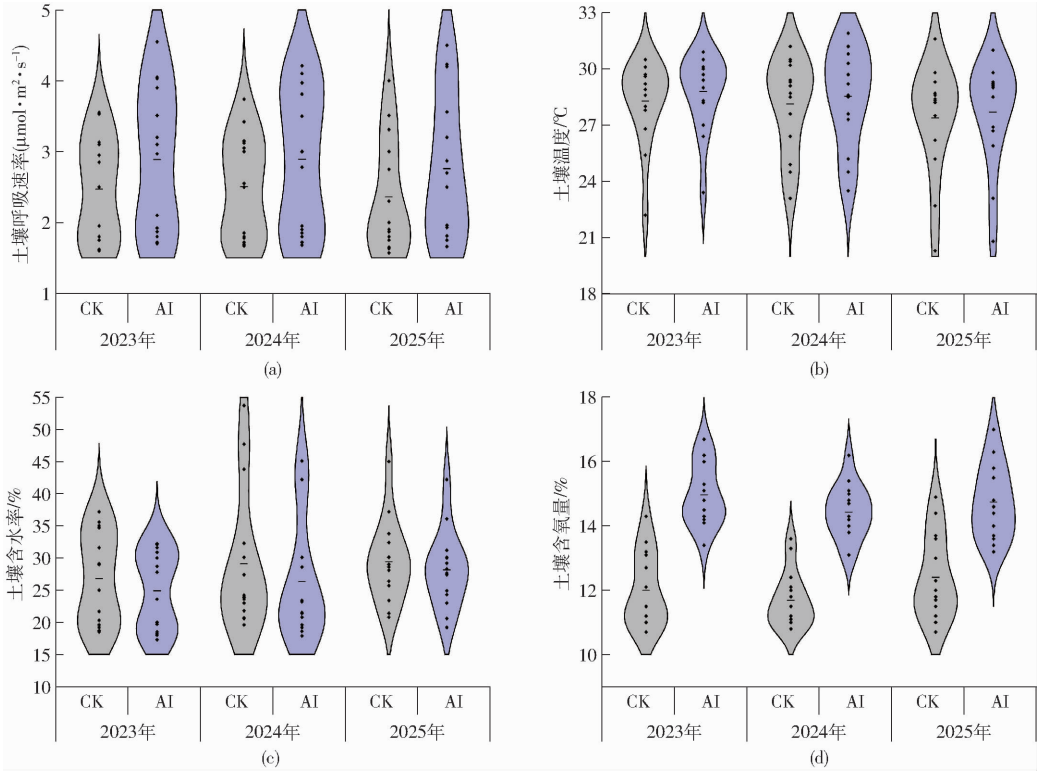

图 3 不同处理下土壤参数季节性变化规律

Fig. 3 Seasonal variation patterns of soil parameters under different treatments

趋势高度一致。

不同处理之间 θ 具有明显波动，范围为 15% ~ 45%，从 3 年数据来看，AI 处理下 θ 略低于 CK 处理，在 2023 年和 2025 年尤为明显，表明 AI 处理可以降低 θ 高值出现频率，对高水分状态具有一定的缓冲和调节作用（图 3c）。2023—2025 年不同处理下 O_2 变化如图 3d 所示，AI 处理稳定持续高于 CK 处理，较对照组分别提升 12.5%、14.0% 及 16.7%，且不同年份下 AI 处理 O_2 主要集中在 14% ~16%，即使在降雨年际差异下，AI 增氧效应始终存在。

2.2　不同指标昼夜变化规律

在 2023—2025 年 3 年定位试验期间，分别选择玉米不同生育阶段典型晴好日进行 24 h 连续观测，覆盖苗期-拔节期（2023 年 9 月 23 日）、拔节期-灌浆期（2023 年 10 月 19 日）和灌浆期-成熟期（2023 年 11 月 21 日）3 个关键阶段，所选观测日满足连续 48 h 内无降雨及灌溉，并且土壤含水率处于田间持水量的 65% ~75%，AI 与 CK 2 种灌溉处理同步测定，测点位置固定且作业管理一致。不同年份代表性观测结果统计分析如图 4 所示，不进行直接年际比较，仅用于反映各阶段典型昼夜变化特征。

不同灌溉处理下 T 日变化趋势与大气温度高度一致，整体呈现“白天升高、夜间降低”的单峰型规律。T 随太阳辐射增强逐渐升高，于 13:00—15:00 达到峰值，夜间随辐射散热逐渐下降，在05:00—07:00 降至最低值。AI 与 CK 处理下温度变化曲线基本重

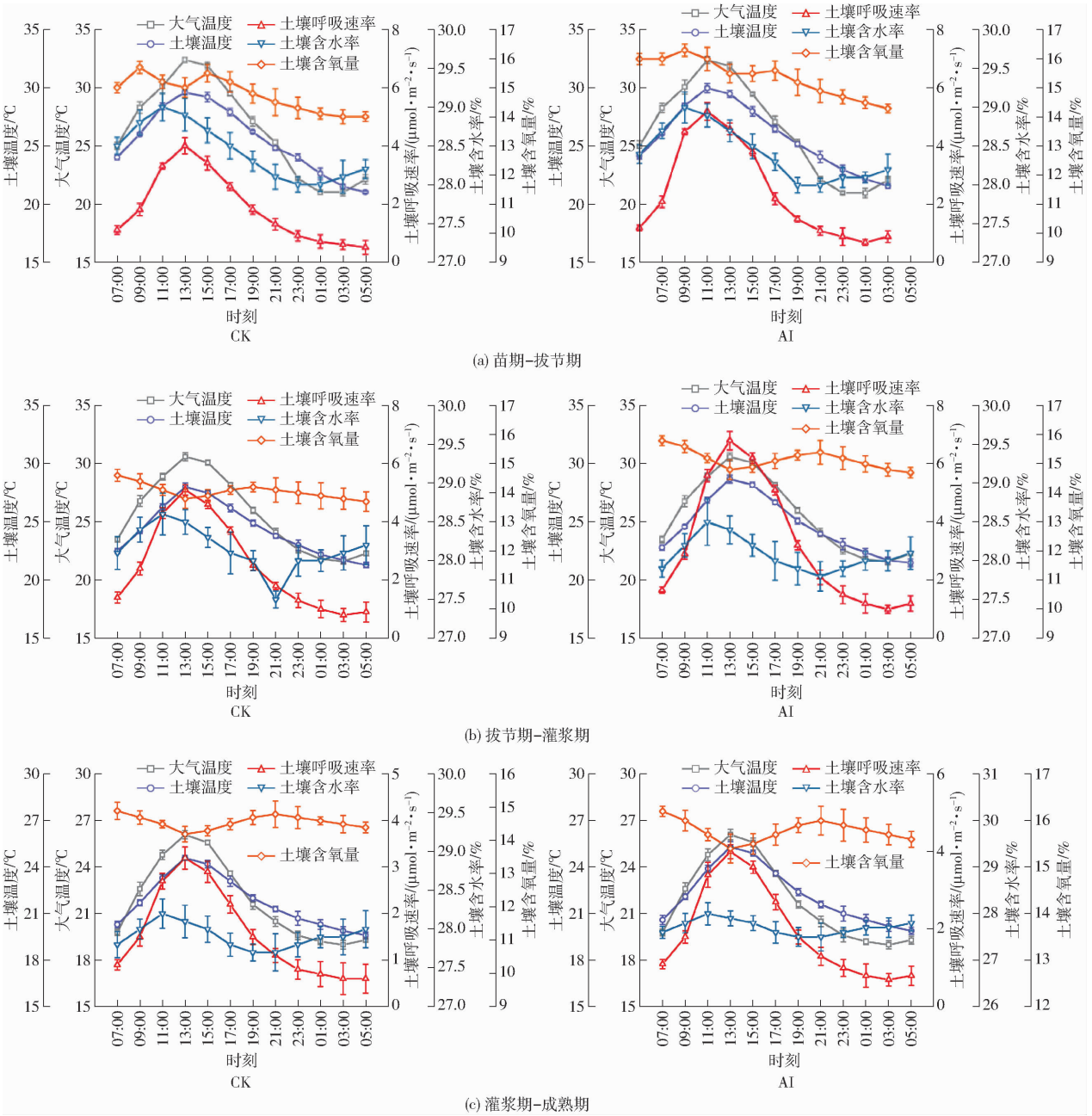

图 4　不同处理下土壤各指标日动态变化

Fig. 4　Daily dynamic changes in soil parameters under different treatments

合,二者差异不显著($P>0.05$)。

2 种灌溉处理下 SRR 均表现出明显的昼夜波动规律,单日内 SRR 总体呈现单峰型日变化趋势,白天随着气温升高,SRR 逐渐上升,于 12:00—13:00 达到峰值,下午大气温度和 T 下降后 SSR 逐渐减弱,夜间趋于平稳并维持低值。2 种处理下日变化规律相似,AI 和 CK 处理下 SSR 日均值分别为 1.87、1.53 μmol/(m²·s)。

θ 在昼夜尺度上总体波动较小,但仍表现出规律性变化,2 种处理下 θ 均在 07:00—09:00 达到最大值,随后随蒸发与作物蒸腾作用增强逐渐下降,于 17:00—18:00 达到最低值。AI 处理含水率略低于 CK,部分时段(09:00 和 17:00)差异达到显著水平($P<0.05$)。O_2 最高值基本出现在 07:00 和 23:00 左右,最低值出现在 13:00—15:00。土壤含氧量在 07:00—15:00 呈下降趋势,在 17:00—次日 03:00 间呈上升趋势,AI 处理下 O_2 日均值为 14.23%,较 CK(12.17%)提升 20.76%。

2.3 土壤呼吸速率与水-氧-热单因子响应规律

对试验结果进行拟合分析(剔除试验中异常数据),SSR 与各影响因素关系采用线性模型、非线性模型及多项式模型进行分段拟合,通过决定系数 R^2 筛选出最优拟合方程(表 1),并绘制拟合曲线(图 5)。AI 和 CK 处理下 θ 变化范围为 23.9% ~ 30.3% 和 24.0% ~ 30.8%,分别解释 SRR 95.14% ~ 97.55% 变化(图 5a),回归模型拟合结果显示 SRR 在 2 个处理下对 θ 变化表现出显著响应,可以解释 SRR 变化 95.14% ~ 97.55%。随着土壤含水率逐渐增加,SRR 呈逐步上升趋势,但 AI 处理下,随着 θ 增加,SRR 增长趋势更为显著,相比之下,在 CK 处理下,尽管 SRR 也随着 θ 升高而增加,但增幅相对较小。

T 是影响土壤微生物活性和根系呼吸速率的关键环境因子。本研究中,T 与 SRR 之间呈二次多项式负相关关系($P<0.05$),T 变化对 SRR 影响具有非线性特征(图 5b)。AI 和 CK 处理下 T 变化分别能解释 87.91% 和 97.44% 的 SRR 变化,通过分段拟合分析可知,T 对 SRR 影响存在明显的阶段性变化,在 T 逐渐升高时,SRR 呈较为显著的上升趋势,且上升阶段 SRR 增幅显著大于下降阶段($P<0.01$),在 T 达到一定阈值后(27.5 ~ 27.6℃),SRR 开始逐渐降低,表现出“顺时针环状分布”。

AI 处理下,O_2 与 SRR 呈二次多项式负相关关系($P<0.05$),O_2 变化范围为 15.2% ~ 17.2%,可以解释 SRR 74.81% 的变化,当 O_2 为 16.8% 时,SRR 随着 O_2 升高逐渐降低,但 CK 处理下与 SRR 呈线性正相关,O_2 变化范围为 13.8% ~ 16.2%,可以解释土壤呼吸速率 95.35% 的变化(图 5c)。

各参数相关系数热力图如图 5d 所示,SRR 与 θ 和 O_2 呈极显著正相关($r=0.98$),而与 T 相关性相对较弱($r=0.37$),说明在本研究条件下,θ 与 O_2 是驱动 SRR 的主导因子,T 起辅助调控作用。

表 1 土壤呼吸速率与各影响因素的回归方程

Tab.1 Regression equation of red loam respiration rate and various influencing factors

指标	处理	阶段	拟合方程
T	AI	总体	$SRR=-0.036\,75T^2+2.124\,3T-28.658\,7$
		上升阶段	$SRR=0.074\,57T^3-5.869\,13T^2+154.088\,86T-1\,347.692\,46$
		下降阶段	$SRR=1.804\,35T^2+101.482\,61T+1\,428.841\,09$
	CK	总体	$SRR=-0.018\,57T^2+1.295\,2T-19.648\,3$
		上升阶段	$SRR=-0.008\,43T^2+0.771\,82T-12.901\,46$
		下降阶段	$SRR=-0.3T+10.32$
θ	AI	总体	$SRR=0.010\,8\theta^3-0.888\,4\theta^2+24.380\,8\theta-221.232\,0$
		上升阶段 1	$SRR=-0.126\,44\theta^2+6.546\,21\theta-82.919\,03$
		上升阶段 2	$SRR=0.017\,2\theta^2-1.163\,94\theta+17.421\,25$
	CK	总体	$SRR=0.012\,4\theta^3-1.030\,1\theta^2+228.614\,5\theta-263.716\,7$
		上升阶段 1	$SRR=-0.121\,45\theta^2+6.411\,91\theta-83.130\,83$
		上升阶段 2	$SRR=0.026\,84\theta^2-1.421\,63\theta+20.373\,18$
O_2	AI	总体	$SRR=-0.342\,1O_2^2+11.292\,4O_2-91.273\,3$
		上升阶段	$SRR=-0.521O_2^2+15.420\,94O_2-112.692\,03$
		下降阶段	$SRR=-0.358\,78O_2^2+11.568\,88O_2-91.246\,3$
	CK	总体	$SRR=0.486\,8O_2-5.717\,9$
		上升阶段 1	$SRR=-0.342\,13O_2+3.716\,89$
		上升阶段 2	$SRR=-0.684\,87O_2+13.420\,17$

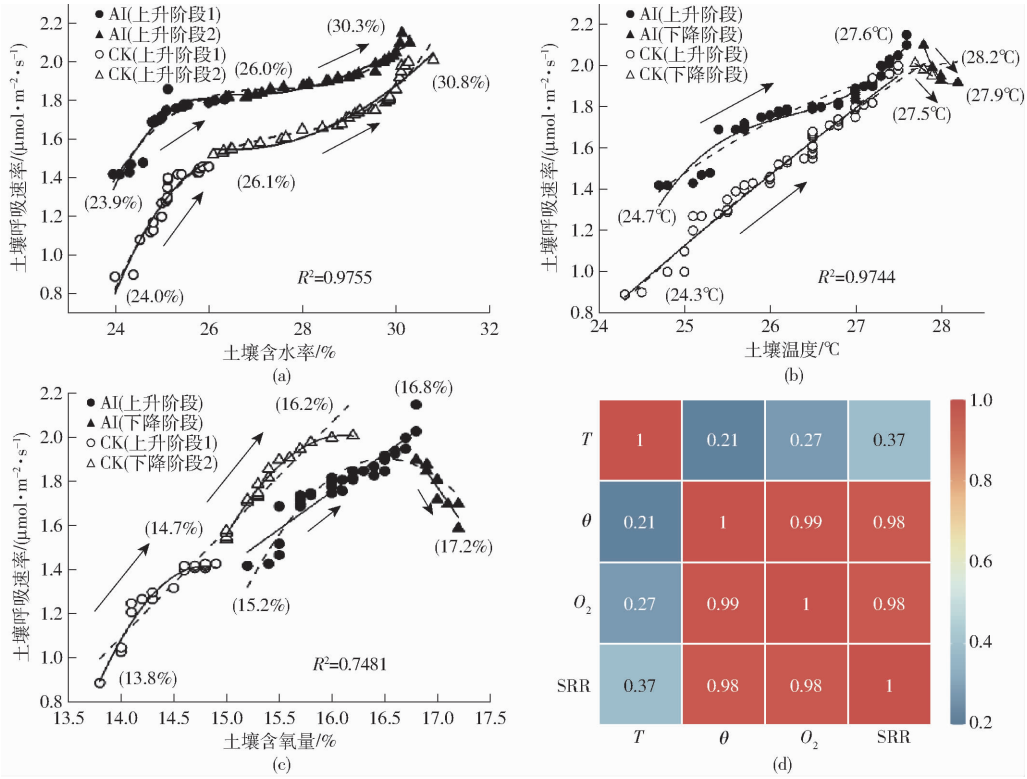

图 5　不同处理下土壤呼吸速率与水-氧-热单因子响应规律

Fig. 5　Soil respiration rates and water－oxygen－heat single-factor response patterns under different treatments

2.4　水-氧-热三因子协同作用与主导效应分析

基于结构方程模型(SEM)，分析 $\theta-O_2-T$ 三因子的直接效应、间接效应与路径关系(表 2)，结果显示模型拟合结果良好(x^2/df 为 1.84，GFI 为 0.95，CFI 为 0.97，RMSE 为 0.043)，表明所建立模型能够合理反映各因子间的耦合关系及其对 SRR 调控效应[19]，不同处理下结构方程模型如图 6(图中 *** 表示极显著($P<0.001$)，** 表示非常显著($P<0.01$)，* 表示显著($P<0.05$))所示，2 种处理在主导因子、耦合强度及作用模式上存在显著差异。

表 2　不同处理下水-氧-热因子对 SRR 的路径系数与贡献度

Tab. 2　Path coefficients and contributions of water－oxygen－heat factors to SRR under different treatments

路径	类型	CK 路径系数	CK 贡献度/%	AI 路径系数	AI 贡献度/%	变化特征
$T\rightarrow$SRR	直接效应	0.75***	46.2	0.48**	30.2	温度主导下降
$O_2\rightarrow$SRR	直接效应	0.24**	18.4	0.58***	36.2	氧主导增强
$\theta\rightarrow$SRR	直接效应	−0.16*	−6.50	−0.08	−3.70	水分抑制效应减弱
$\theta\rightarrow T$	直接效应	0.24**	15.0	0.24**	12.40	热调节略下降
$\theta\rightarrow O_2$	直接效应	−0.24**	−8.1	−0.12*	−5.50	高水抑氧效应减弱
$T\rightarrow O_2$	直接效应	0.10*	5.00	0.21**	11.40	热-氧协同增强
$\theta\rightarrow T\rightarrow$SRR	间接效应	0.180**	12.0	0.115*	7.2	水分通过改变温度间接影响呼吸
$\theta\rightarrow O_2\rightarrow$SRR	间接效应	−0.058*	−4.1	−0.070**	−4.6	高水分抑制氧扩散从而降低呼吸
$T\rightarrow O_2\rightarrow$SRR	间接效应	0.024	1.8	0.122**	7.6	温度促进氧扩散，增强呼吸
间接效应合计		0.146	9.7	0.167	10.2	AI 下水-氧-热耦合增强，间接贡献提高
R^2(SRR)			0.68		0.82	AI 下系统解释力提高 14%(系统稳定性增强)
合计贡献度(含残差)/%			100		100	

注：*** 表示极显著($P<0.001$)；** 表示非常显著($P<0.01$)；* 表示显著($P<0.05$)。

(1)主导因子发生转变：在 CK 处理中，T 对 SRR 直接作用最强(路径系数 0.75，贡献度 46.2%)，说明 T 是呼吸过程的主导驱动力。而 O_2 贡献较低(路径系数 0.24，贡献度 18.4%)，SRR 过程呈现“温度主控型”特征。而在 AI 处理中，O_2 路径系数为 0.58，贡献度为 36.2%，土壤呼吸过程由“温度驱动”转为“氧主导型”。

(2)$\theta-O_2-T$ 间协同关系增强：多条间接路径

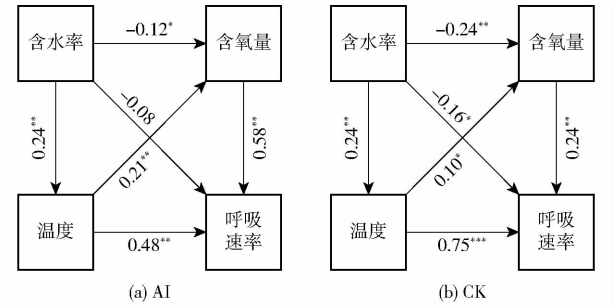

图 6 不同处理下水-氧-热因子对 SRR 的结构方程模型路径图

Fig. 6 Path diagrams of structural equation model for SRR under different water - oxygen - heat factor treatments

被放大，T 促进 O_2 扩散的路径系数（$T\rightarrow O_2\rightarrow$SRR）由 CK 的 0.024 增强至 0.122，θ 通过 O_2 扩散影响 SRR 的路径（$\theta\rightarrow O_2\rightarrow$SRR）负向作用略增强，反映红壤“高湿抑氧”特性仍然存在。

（3）系统稳定性与响应效率提高：AI 处理下 SRR 模型解释度由 CK 处理下 0.68 提升至 0.82，说明系统对环境变化的响应能力增强，AI 条件下不仅直接效应（O_2）贡献增加，间接效应贡献也由 9.7% 增至 10.2%，表明系统由单一因子控制转向多因子协同调控，含氧量从“受限变量”转变为“主动驱动变量”，使土壤呼吸过程更加稳定、敏感且具有更强的环境适应性[20]。

3 讨论

3.1 加气渗灌技术对土壤各参数季节与昼夜动态变化调控机制

土壤呼吸速率是农田生态系统碳循环的关键过程变量，其时序变化能够敏感地反映作物根区根系呼吸与微生物分解活动强度[21]。前期大量研究均证实，加气渗灌技术可通过向根区持续补充空气、提高根区含氧量与氧扩散效率，增强根系活力和呼吸速率[6-8]。但关于其在季节-昼夜多尺度下对水-氧-热耦合关系的影响机制仍有待进一步定量阐明。本研究结果表明，在季节尺度上，与 CK 处理相比，AI 处理在 3 年观测中均显著提高 SRR 水平（图 3a）。相关研究表明，土壤含水率较高时，土壤孔隙中气体扩散通道被压缩，易造成局部缺氧环境，抑制根系呼吸与微生物有机质分解活动，表现为 SRR 对降雨事件和含水率波动更敏感、时序波动幅度更大（即“高湿抑制”效应），本文 AI 处理在降雨偏多或土壤含水率较高年份优势更加明显（2025 年），SRR 维持在相对较高且更稳定水平，该结果与文献[22-23]研究结果一致，究其原因，一方面是由于加气渗灌通过向根区补充空气，提高并稳定土壤含氧量，增强氧气在孔隙中扩散与补给能力，从而缓解高湿条件下氧限制，使根系和微生物代谢活动在降雨后仍能维持较高水平；另一方面，AI 处理降低了土壤含水率高值出现频率，维持更合理的气-水比例，减弱“高水分→抑制氧扩散→呼吸受限”的负向链条。因而在降雨偏多年份，CK 处理更易出现“过湿—缺氧—呼吸受限”的波动，而 AI 处理能够有效缓冲这种不利影响。

本文通过昼夜研究可知，2 种处理下 SRR 均呈现典型的“单峰型”日变化，且与大气温度和土壤温度的昼夜变化高度一致，这一结论与多数农田生态系统的研究结论一致，即 SRR 在日尺度上主要受太阳辐射驱动的温度过程控制[24-25]。在此框架下，本研究进一步表明，AI 处理可以抬升 SRR 曲线并改变其峰值过程，AI 处理下 SRR 日均值达到 1.87 μmol/(m^2·s)，显著高于 CK 处理的 1.53 μmol/(m^2·s)，且峰值持续时间更长、夜间衰减幅度更缓（图 4a~4c），中午至午后 SRR 最高、耗氧最强，CK 在高含水率下易出现孔隙气相减少与扩散受阻，形成短时“氧限制”，导致峰值平台短、回落更快；AI 通过补气提高并稳定氧气供给，缓解高温阶段缺氧抑制，使峰值维持更久。夜间降温后 2 个处理 SRR 均下降，但 AI 因供氧更稳定、根系与微生物基础代谢更易维持，衰减更缓、曲线更平滑。总体上，AI 不改变温度主导的日变化模式，但通过土壤含水率对氧扩散的限制，使 SRR 在昼夜尺度上更高且更稳定。结合同步观测的土壤含氧量和土壤含水率数据可知，AI 通过提高并稳定根区氧气供给，可以减弱高含水率对氧扩散的限制，尤其是在土壤含水率较高时（28.7% ~30.8%），研究表明夜间至清晨辐射弱、蒸发和蒸腾显著降低，根区耗水减少并伴随一定水分再分配，使 07:00—09:00 出现日内相对高值；白天随辐射增强，蒸发与蒸腾持续加剧，根区水分累计消耗导致 17:00—18:00 降至低值；入夜后耗水减弱，土壤水分再分配使含水率趋于稳定或略回升。AI 处理下含水率整体略低于 CK，主要是由于通过向根区持续补充空气显著提高土壤含氧量，增强根系与微生物代谢活动并提升土壤呼吸速率，作物根系吸水与蒸腾作用增强，与此同时，微生物分解与根部活动增强也会提高根区水分动态交换与分配速率，使水分更快地被根系利用或者向深层迁移，表现为土壤含水率降低。该研究结果在文献[14]中同样证实，对土壤进行通气处理可以提高土壤水分分布均匀度，避免土壤水分在局部聚积。AI 含氧量高于 CK 处理（AI 处理为 16.7%，CK 处理为 15.5%），因此 AI 处理下土壤呼吸速率能够在白天

高温阶段不易受到缺氧抑制，保持较高呼吸速率。

3.2　水分、温度与氧气对土壤呼吸的单因子响应特征

单因子响应分析表明，土壤温度、含水率和含氧量均是影响 SRR 的关键环境因子，但作用方式和敏感区间存在显著差异。土壤温度与 SRR 间呈多项式负相关关系（$P < 0.05$），AI 和 CK 处理下土壤温度变化分别能解释 87.91% 和 97.44% 的 SRR 变化，这个差异性同样可以证实，AI 处理通过改善根区的通气条件，减弱 SRR 对土壤温度的敏感性，与 3.1 节观点一致。在一定温度范围内，SRR 随土壤温度升高而增加，但当温度超过一定阈值后，SRR 逐渐下降，表现出明显的温度阈值效应。这一结果与微生物酶促反应和根系呼吸对温度的生理适应特性密切相关[26]，表明土壤呼吸速率对温度变化的响应具有一定的敏感性。

土壤含水率与 SRR 间呈显著的三次多项式正相关关系。在研究范围内，SRR 随土壤含水率升高而增加，但 AI 处理下土壤含水率中位值和高值区间整体略低于 CK（图 5a），这一现象在季节性变化和昼夜变化试验中均有所体现，主要是由于通气措施有助于改善高湿条件下的气-水比例，避免孔隙水过度占据气相空间。根据 LI 等[27]和本研究结果，适度降低土壤含水率有利于维持气体扩散通道，从而间接促进土壤呼吸过程，尤其是在高湿环境下，通过加气渗灌技术，氧气可以更容易进入土壤，促进微生物代谢与根系呼吸。

2 种处理下土壤含氧量与 SRR 的关系表现出明显差异。在 CK 处理下，SRR 随含氧量升高呈线性正相关，说明在常规渗灌条件下，氧气是限制土壤呼吸的重要因子。而在 AI 处理下，SRR 与含氧量呈二次多项式关系，当含氧量超过一定水平后，促进作用趋于减弱，表明加气渗灌通过增强氧气供应，缓解了氧气限制，因此土壤呼吸速率不再单纯受土壤含氧量控制，SMITH 等[28]研究表明，加气技术能在高湿环境中维持较高的氧气供应，从而促进微生物和植物根系的呼吸活动。

3.3　水分、温度、氧气与土壤呼吸速率协同作用分析

结构方程模型（SEM）分析进一步揭示水-氧-热三因子对 SRR 的协同调控机制。在 CK 处理下，温度是主导因子，贡献度为 46.2%，而在 AI 处理下，温度贡献度下降至 30.2%，改变了影响土壤呼吸速率的主导因子（图 6）。而在 AI 处理下，土壤含氧量的直接效应显著增强，并超过温度，土壤呼吸速率过程由“温度驱动”转变为“氧主导型”。这一发现与多项研究一致，文献[29 - 30]研究指出，氧气限制是土壤呼吸速率低的关键原因，而通过通气措施提升氧气供应能显著促进土壤呼吸。本研究还发现，在 CK 处理下，水分对 SRR 的负向影响（-6.50%）较大，而在 AI 处理下，水分的负向影响减少至 -3.7%，原因见 3.1 节。温度是影响气体扩散的关键因素之一，进一步的间接效应分析揭示，AI 处理显著增强了温度与氧气之间的正向协同作用，路径系数从 0.10（CK）提升至 0.21（AI），ZHOU 等[31]研究表明，在通气处理下，土壤温度和氧气浓度之间的协同效应显著增强，进而提升了土壤微生物和根系呼吸活动。类似地，LIU 等[32]也发现，通气处理不仅能改善土壤氧气供应，还能够缓解高水分状态下的氧气扩散受限问题，进一步增强土壤呼吸。

4　结论

（1）2023—2025 年定位试验结果表明，AI 处理下年均 SRR 分别较 CK 提高 21.0%（$P < 0.05$）、23.5%（$P < 0.01$）和 22.7%（$P < 0.05$）。土壤含水率在两处理下均呈明显季节性波动（15% ~45%），但 AI 处理下土壤含水率中位值及高值区间整体略低于 CK，且在降雨偏多年份高含水率极值出现频率明显降低，在降雨偏多年份（2025 年），CK 处理 SRR 波动幅度更大，而 AI 仍能维持较高水平，进一步说明加气渗灌对年际气候差异具有一定缓冲作用。温度在 AI 与 CK 间差异不显著（$P > 0.05$），其季节与昼夜变化趋势与大气温度高度一致，说明土壤热环境仍主要受气象条件控制。

（2）在典型晴好日的 24 h 连续观测中，SRR 呈单峰型日变化（12:00—13:00 达峰），AI 处理下 SRR 日均值较 CK 提高 22.22%；土壤含氧量日均值较 CK 提高 20.76%。土壤含水率日内波动较小，呈“早高晚低”规律，AI 整体略低于 CK，说明加气渗灌可在不改变温度主导日变化格局的前提下，提高供氧水平并维持土壤呼吸活性。

（3）拟合结果表明，土壤含水率与 SRR 呈显著正相关，土壤含氧量、温度与 SRR 呈非线性响应关系，且当土壤温度达到 27.5 ~27.6℃后 SRR 开始下降。三因子对 SRR 变化的综合解释度超过 78%，相关性分析显示 SRR 与含水率和含氧量相关性更强，温度主要表现为背景驱动并在特定阈值后产生限制效应。

（4）CK 处理中温度对 SRR 直接效应最大（路径系数 0.75，贡献度 46.2%），而 AI 处理中土壤含氧量成为主导因子（路径系数 0.58，贡献度 36.2%），同时温度促进土壤含氧量扩散的正向协同通路显著增强（温度→土壤含氧量→SRR 由

0.024 增至 0.122),系统解释度 R^2 由 0.68 提升至 0.82。表明加气渗灌通过提升供氧水平、增强水-氧-热协同作用,提高土壤呼吸过程对环境变化的稳定性与适应性。

参 考 文 献

[1] DU Y, CUI B, WANG Z, et al. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis[J]. Catena, 2020, 193:104617.

[2] 杨通,谢军红,汤昕悦,等. 有机肥替代化肥对旱作饲用玉米产量及农田 CO_2 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2025, 36(11): 3378 - 3386.
YANG Tong, XIE Junhong, TANG Xinyue, et al. Effects of replacing chemical fertilizers with organic fertilizers on yield of dryland forage maize and farmland CO_2 emissions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(11): 3378 - 3386. (in Chinese)

[3] 孙亚楠,段琳博,钟华昱,等. 温室气体排放与番茄产量对水肥气耦合的响应机制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 312 - 322.
SUN Ya'nan, DUAN Linbo, ZHONG Huayu, et al. Response mechanism of soil greenhouse gas emission and yield of greenhouse tomato to water-fertilizer-air coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 312 - 322. (in Chinese)

[4] 于珍珍,尹凝霞,王宏轩,等. 长期加气渗灌提升土壤环境与玉米增产机理研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 589 - 601.
YU Zhenzhen, YIN Ningxia, WANG Hongxuan, et al. Mechanism of long-term aerated infiltration irrigation to enhance soil environment and increase corn yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 589 - 601. (in Chinese)

[5] LYU H, LI Y, WANG Y, et al. Drive soil nitrogen transformation and improve crop nitrogen absorption and utilization—a review of green manure applications[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 14: 1305600.

[6] YU Z Z, WANG H X, YU D S, et al. The effect of aeration and irrigation on the improvement of soil environment and yield in dryland maize[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1464624.

[7] 于珍珍,汪春,王宏轩,等. 增氧灌溉技术应用现状与展望[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 292 - 300.
YU Zhenzhen, WANG Chun, WANG Hongxuan, et al. Oxygenated irrigation technology application status and prospect[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 292 - 300. (in Chinese)

[8] TAN C, LI Z, WANG H, et al. Aerated drip irrigation increases tomato production by enhancing soil C/N mineralization, root growth, and nutrient uptake efficiencies[J]. Agricultural Water Management, 2025, 276: 108298.

[9] YU Z, WANG C, ZOU H, et al. The effects of aerated irrigation on soil respiration and the yield of the maize root zone[J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4378.

[10] 张倩,曾健,张振华,等. 循环曝气地下滴灌下温室番茄生长特性与产量研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 365 - 377.
ZHANG Qian, ZENG Jian, ZHANG Zhenhua, et al. Impacts of cycle aerated subsurface drip irrigation on growth characteristics and yield of greenhouse tomato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 365 - 377. (in Chinese)

[11] 金翠翠. 加气灌溉提升设施蔬菜氮素吸收利用和产量的作用机制[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2023.
JIN Cuicui. Mechanism of aerated irrigation to enhance nitrogen uptake and yield of facility vegetables[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resource and Electric Power, 2023. (in Chinese)

[12] 张倩,牛文全,杜娅丹,等. 加气灌溉对不同施氮水平的设施甜瓜土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1319 - 1326.
ZHANG Qian, NIU Wenquan, DU Yadan, et al. Effects of aerated irrigation on CO_2 and N_2O emission from protected melon soils under different nitrogen application levels[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1319 - 1326. (in Chinese)

[13] 棉延霖. 加气滴灌下有机无机肥配施对新疆棉田土壤理化性质和棉花生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2025.
MIAN Yanlin. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers under aerated drip irrigation on soil physicochemical properties and cotton growthin cotton fields in Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)

[14] 于珍珍,邹华芬,于德水,等. 加气灌溉下土壤呼吸与环境因子相关性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 390 - 401,410.
YU Zhenzhen, ZOU Huafen, YU Deshui, et al. Correlation of soil respiration and environmental factors under aerated irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 390 - 401,410. (in Chinese)

[15] ZHANG J, LI H, WANG Y, et al. Effects of aerated irrigation on soil moisture distribution and crop growth in dryland farming systems[J]. Agricultural Water Management, 2024, 276:108298.

[16] 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)

[17] 陈慧，侯会静，蔡焕杰，等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N_2O 排放特征[J]. 农业工程学报，2016，32(3)：111 – 117.
CHEN Hui, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Soil N_2O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 111 – 117. (in Chinese)

[18] BHATTARAI S P, BALSYA R J, EICHLER P, et al. Dynamic changes in bubble profile due to surfactant and tape orientation of emitters in drip tape during aerated water irrigation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 75: 137 – 143.

[19] CUI J, WANG X, LI Y, et al. Structural equation modeling reveals drivers of soil respiration under different irrigation regimes [J]. Agronomy, 2022, 12(1): 68.

[20] ZHANG Z, YANG R, ZHANG Z, et al. Effects of oxygenated irrigation on root morphology, fruit yield, and water-nitrogen use efficiency of tomato[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(4): 5582 – 5593.

[21] LEI H, FAN Y, XIAO Z, et al. Comprehensive evaluation of tomato growth status under aerated drip irrigation based on critical nitrogen concentration and nitrogen nutrient diagnosis[J]. Plants, 2024, 13(2): 270.

[22] FAIRBAIRN L, REZANEZHAD F, GHARASOO M, et al. Relationship between soil CO_2 fluxes and soil moisture: anaerobic sources explain fluxes at high water content[J]. Geoderma, 2023, 427: 116493.

[23] YAN Z. A moisture function of soil heterotrophic respiration that accurately represents the response to water content in upland soils[J]. Nature Communications, 2018, 9: 2331.

[24] 于珍珍. 玉米加气渗灌增产机理与控制系统研究[D]. 大庆：黑龙江八一农垦大学，2023.
YU Zhenzhen. Study on the mechanism and control system of maize aerated percolation irrigation to increase yield[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[25] 于珍珍，王宏轩，邹华芬，等. 加气灌溉下红壤土呼吸速率变化及其与土壤水氧的关系[J]. 热带作物学报，2022，43(1)：110 – 118.
YU Zhenzhen, WANG Hongxuan, ZOU Huafen, et al. Changes of red soil respiration rate under aerated irrigation and its relationship with soil water and oxygen[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(1): 110 – 118. (in Chinese)

[26] 郑恩楠，杨桦，陈鹏，等. 水氮管理模式下水稻碳氮吸收、土壤呼吸与产量效应[J]. 农业机械学报，2018，49(6)：287 – 295.
ZHENG Ennan, YANG Hua, CHEN Peng, et al. Effects of carbon-nitrogen absorption, soil respiration and yield of rice under water and fertilizer management modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 287 – 295. (in Chinese)

[27] LI H, ZHANG Y, WANG J, et al. Influence of soil moisture on soil respiration in semi-arid regions: a review and meta-analysis[J]. Geoderma, 2021, 383: 114743.

[28] SMITH J, ZHANG X, BROWN T. Aeration technology enhances oxygen supply in high-moisture conditions, promoting microbial and plant root respiration[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 54(3): 2143 – 2151.

[29] LI W, ZHANG Y, WANG S. Effects of aeration on soil oxygen diffusion and respiration rates in high-moisture environments [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 67(2): 117 – 125.

[30] WEI H, XU J, LIU Y. Aeration and its impact on soil respiration and oxygen availability in waterlogged soils[J]. Environmental Pollution, 2022, 285: 117341.

[31] ZHOU L, CHEN Q, LIU Z. The synergistic effect of aeration on soil temperature and oxygen concentration and its influence on soil microbial and root respiration[J]. Environmental Science and Technology, 2023, 57(9): 1824 – 1833.

[32] LIU X, WANG Y, ZHANG H. Aeration treatment improves soil oxygen supply and alleviates oxygen diffusion limitations in high moisture conditions, enhancing soil respiration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 163: 108436.