李海亮,邹华芬,史健伟,等.基质覆盖式免耕播种技术增强红壤土呼吸能力[J].江西农业大学学报,2026,48(2):599-611.
LI H L,ZOU H F,SHI J W,et al.The substrate covering no-till seeding enhances the respiration capacity of lateritic soil[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(2):599-611.

基质覆盖式免耕播种技术增强红壤土呼吸能力

李海亮[1,2],邹华芬[1],史健伟[1],于海明[3*],汪　春[1,2,4*]

(1.中国热带农业科学院 南亚热带作物研究所/国家土壤质量湛江观测实验站,广东 湛江 524091;2.河南农业大学机电工程学院,河南 郑州 450002;3.东北农业大学 电气与信息学院,黑龙江 哈尔滨 150030;4.山东协和学院 计算机学院,山东 济南 250109)

摘要:【目的】旨在探明基质覆盖式免耕播种技术对热带农田红壤土呼吸能力的提升效应。【方法】通过田间原位试验系统分析、基质覆盖量、基质占比和株距对土壤呼吸速率、微生物呼吸速率及植物根呼吸速率等关键技术指标的影响规律。采用Box-Behnken响应面试验设计,系统调控基质覆盖量、基质占比和株距3个关键因素。【结果】该技术显著增强了红壤土的总呼吸速率及组分呼吸速率,其中基质覆盖量对土壤总呼吸速率和植物根呼吸速率的影响最为显著,基质占比60%与30 cm株距组合通过协同增效显著提高呼吸强度。基于响应面的多因素协同分析,优化了工艺参数组合:基质覆盖量为1.76×10^4 kg/hm^2、基质占比为60%、株距为30 cm,此时土壤总呼吸速率、土壤微生物呼吸速率及植物根呼吸速率分别为3.75 μmol/(m^2·s)、1.11 μmol/(m^2·s)和2.65 μmol/(m^2·s)。【结论】研究结果可为热带农田土壤改良与作物提质增产提供科学依据。

关键词:红壤土;基质覆盖式免耕播种;土壤呼吸速率;基质覆盖量;响应面优化;土壤改良
中图分类号:S223;S153　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2026)02-0599-13
CSTR:32399.14.aauj.2026049

The substrate covering no-till seeding enhances the respiration capacity of lateritic soil

LI Hailiang[1,2],ZOU Huafen[1],SHI Jianwei[1],YU Haiming[3*],WANG Chun[1,2,4*]

(1.South Subtropical Crop Research Institute/National Agricultural Experimental Station for Soil Quality, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 3.College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. College of Computer Science, Shandong Xiehe University, Jinan 250109, China)

收稿日期:2025-08-28　　**修回日期:**2025-10-20　　**接受日期:**2025-10-25
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD1700500)和海南省自然科学基金项目(322QN375、322MS118)
Project supported by the National Key Research and Development Program (2024YFD1700500) and Hainan Provincial Natural Science Foundation (322QN375,322MS118)

作者简介:李海亮,副研究员,博士,orcid.org/0009-0001-3488-2502,lihailiang@126.com;*通信作者:于海明,教授,主要从事热带生态循环农业技术与装备研究,orcid.org/0000-0002-0141-4411,yhm1973@163.com;汪春,教授,博士,博士生导师,主要从事热带生态循环农业技术与装备研究,orcid.org/0000-0002-6074-8091,wangchun1963@126.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [**Objective**] To elucidate the enhancement effect of the substrate covering no-till seeding technique on the respiratory capacity of lateritic soil in tropical farmland, the study systematically analyzed the mechanisms by which this technique influences soil respiration rate, microbial respiration rate, and plant root respiration rate through in-situ field experiments. With a Box-Behnken response surface experimental design, three key factors were systematically regulated: substrate coverage, substrate proportion, and plant spacing. [**Method**] The results demonstrate that this technique significantly enhances both the total soil respiration rate and its component rates. Among the factors, substrate coverage exerted the most significant influence on the total soil respiration rate and plant root respiration rate. The combination of a substrate proportion of 60% and a plant spacing of 30 cm significantly increased respiratory intensity through synergistic effects. [**Result**] Multi-factor synergistic analysis based on the response surface methodology helps to optimize parameter combination: substrate coverage of 1.76 ×10^4 kg/hm^2, substrate proportion of 60%, and plant spacing of 30 cm. Under these conditions, the total soil respiration rate, soil microbial respiration rate, and plant root respiration rate reached 3.75 μmol/(m^2·s), 1.11 μmol/(m^2·s), and 2.65 μmol/(m^2·s), respectively. [**Conclusion**] The study provides a scientific basis for soil improvement and enhancing crop quality and yield in tropical farmland, carrying significant importance for promoting sustainable agriculture in tropical regions.

Keywords: red soil; substrate covering no-till seeding; soil respiration rate; substrate coverage; response surface optimization; soil amendment

【研究意义】优质农田土壤作为保障农业生产与粮食安全的核心战略资源，其质量提升是我国农业科研的关键方向。土壤氧气含量是影响植物生长、微生物活性及养分循环的关键因子，直接关系到土壤肥力维持与作物高产优质[1-2]。我国热带及亚热带地区覆盖9个省份，约48万km^2，是重要的热带经济作物和粮食主产区。然而，受季风气候影响，该区域降水集中且强度大，暴雨导致土壤气体被排替、导气率下降，并阻碍气体交换，进而引发根区缺氧胁迫，抑制作物的生理代谢与生长发育[3]。因此，在推进热带农田地力提升与作物提质增产增效的背景下，深入探究土壤增氧机制及其对作物生长的影响机理，已成为破解区域土壤改良与保障食品安全瓶颈的核心科学命题。【前人研究进展】土壤呼吸是表征土壤代谢的关键过程，指土壤中有机体（含微生物）及植物根系消耗O_2并释放CO_2的过程，其强度直接影响土壤氧气含量。土壤呼吸的相关研究可追溯至Wollny[4]对土壤代谢特征的早期描述，并在20世纪后获得广泛关注。Kurganova等[5]基于莫斯科南部2种温带草原生态系统25年观测数据，揭示了土壤呼吸温度敏感性的时空动态规律及其异质性机制，深化了该参数时空变化特征的科学认知。匈牙利黑钙土长期定位试验表明，免耕处理土壤呼吸速率显著高于传统翻耕，研究者推测这种差异可能源于免耕对植物根系活动的促进作用及其与归一化植被指数的正相关性[6]。Neogi等[7]通过对比传统耕作与最小耕作对稻-玉米-木豆轮作系统的影响，发现最小耕作能显著降低土壤CO_2排放通量，同时改善土壤碳库质量及酶活性，有助于在维持产量的前提下提升土壤健康水平。国内土壤呼吸研究起步较晚，早期研究主要聚焦于草原和森林生态系统，围绕土壤呼吸速率与环境因子的关联性、年通量评估、土地利用变化效应及全球变化响应展开[8-11]。虽然部分研究已触及热带区域，但其研究对象仍集中于林地土壤的环境影响因子[12-14]。近年来，耕作措施对农田土壤呼吸影响的研究明显增加。常规耕作结合秸秆移除可减缓土壤呼吸增长速率并促进微生物丰度累积[15-16]；加气灌溉通过提升土壤氧气含量显著促进了红壤呼吸速率[17]；秸秆覆盖还田配合常规施氮是黑土区兼顾土壤固碳与减排的有效措施[18]；不同耕作方式通过调控土壤水热条件及微生物活动，显著影响旱地农田呼吸动态及其驱动机制[19-20]；此外，农田管理措施在促进土壤呼吸的同时，可降低其对温度变化的敏感性。有研究[21]表明，深松结合秸秆还田能有效调控东北黑土区玉米田的土壤呼吸速率与有机碳储量动态。综上所述，当前国内土壤呼吸研究已取得重要进展，尤其在耕作与覆盖管理对呼吸强度的影响方面积累了丰富实证。然而，现有成果多从地表覆盖调控土壤温度进而影响呼吸的角度展开，针对耕作技术，尤其是本研究团队创新提出的基质覆盖式免耕种植技术对热带农田

土壤呼吸的系统性影响研究仍显匮乏,其调控效应与规律尚不明确。基质覆盖式免耕种植是一种融合保护性耕作理念与有机肥替代化肥策略的创新性全免耕播种技术。其核心实施路径为在前茬作物未经翻耕的原状农田地表,通过免开沟直接播种,并采用秸秆与畜禽粪污混合物经腐解转化形成的功能性有机基质替代传统表土进行种子覆盖[22-24]。

【本研究切入点】尽管前期研究已证实该技术可有效提升土壤有机质含量并优化作物生长表现[25-26],但其对土壤氧气含量的提升效果及规律尚未明确,这已成为制约该技术体系优化推广的关键科学瓶颈。【拟解决的关键问题】本试验拟在前期研究成果的基础上,继续开展田间原位试验,进一步深入分析和说明不同基质覆盖条件下土壤氧气时空动态分布和传输变化特征,明确基质覆盖式免耕种植技术对提升耕层土壤氧气含量的影响规律和作用机理。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

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试验站(21°35′N,109°31′E)进行。试验地海拔 9 m,是典型的亚热带季风气候,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 ℃,年降水量为 1 700~1 800 mm。研究区域内设有小型气象站自动获取并记录试验期间降雨、气温及其他环境因素(图 1)。

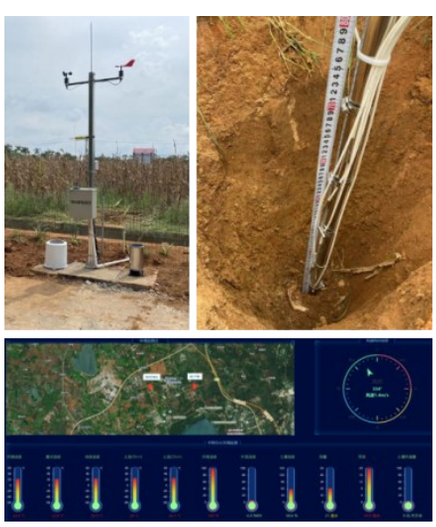


图 1　田间小型气象监测站

Fig.1　Meteorological monitoring station in the field

1.2　试验材料与设备

供试玉米品种为彩田糯 2 号,该品种属于彩色加甜糯品种,发芽率不低于 85%,华东地区种植时,从种子出苗到果实采收的生长周期大约为 80 d。此品种玉米果穗色泽鲜艳、外观优美,口感上佳,糯性特质突出。

试验覆盖基质采用黑山羊粪与当季新鲜玉米秸秆经堆肥发酵工艺制备,其中羊粪需晴天露天晾晒 3~5 d(其间每日人工翻动 1~2 次)至含水量 55%~60%,秸秆需收获后 24 h 内采收并粉碎至 2~5 cm 粒度,二者基础理化指标见表 1;制备时按鲜重 1∶1.2~1∶1.5 比例混合,投入卧式双轴搅拌机以 30~40 r/min 转速搅拌 15~20 min 至均匀度≥90%,随后转入砖混结构发酵槽,置于可控环境中进行腐熟发酵[环境温度≥15 ℃、通风速率 0.3~0.5 $m^3/(m^3·h)$],全程腐熟发酵周期 25~28 d(升温期 1~3 d 至 50 ℃,高温期 4~13 d 维持 55~65 ℃且每 3~5 d 翻堆 1 次、保氧 10%~15%,降温期 14~28 d 至 40 ℃以下),此过程中微生物活动促使有机物分解转化,形成富含养分且结构稳定的腐殖质;发酵完成后,将产物进一步自然晾干(晴天晾晒 2~3 d,其间翻动 1 次),以控制其含水量至 15%~20%,即得试验用覆盖基质。自然土取自试验田 0~20 cm 耕层,其理化性质参数详见表 2。

表 1 羊粪和秸秆理化参数

Tab.1 Physicochemical parameters of sheep manure and straw g/kg

原料 Material	秸秆 Straw	羊粪 Sheep manure
氮 Nitrogen	0.55	0.45
磷 Phosphorus	0.24	0.25
钾 Potassium	2.23	0.15
干物质 Dry matter	95.8	—
纤维素 Cellulose	32.6	—
有机质 Organic	15.3	14.5

表 2 红壤主要理化性状

Tab.2 Principal physical and chemical characteristics of lateritic soil

指标 Index	参数 Parameters
(0~20 cm)土壤 pH 值 (0–20 cm) Lateritic pH	4.4
有机质 Organic matter	22.8
全磷 Total phosphorus	1.25
全氮 Total nitrogen	0.7
全钾 Total potassium	12.6
交换性钙 Exchangeable calcium	10.6
交换性镁 Exchangeable magnesium	2.2

在土壤呼吸速率研究中,采用 LI–COR 公司生产的 Li–8100 土壤碳通量自动测量系统(图 3)开展数据采集工作[27]。该设备通过集成式温湿度传感器实现多参数同步监测,可自动获取 10 cm 土层温度(Ts)、5 cm 土层湿度(RHs)及地表温度(Tas)等关键指标,为呼吸作用分析提供精确的基础数据支撑。配套自主研发的基质覆盖式免耕播种机(图 2)在耕作环节实现功能集成,通过单次作业完成开沟–播种–覆土全流程,在提升作业效率与播种质量的同时,有效控制了土壤结构扰动[24]。此外,研究还使用精度为 1/1 000 的电子秤、卷尺与游标卡尺等辅助器材,为各项研究的顺利开展提供必要支持。



图 2 基质覆盖式免耕播种机

Fig.2 Substrate covering no–till seeder

1.3 试验方案

本研究于 2023 年 4 月在典型热带农业科研平台——中国热带农业科学院国家土壤质量湛江观测试验站开展,采用三因素三水平 Box–Behnken 响应面试验设计,系统探究基质覆盖量(X_1)、基质占比(X_2)和株距(X_3)对土壤–植物系统呼吸作用的影响规律,因素水平编码详见表 3。研究以土壤呼吸速率(Y_1)、土壤微生物呼吸速率(Y_2)、植物根呼吸速率(Y_3)为综合评价指标,共设置 17 个处理组合,每个组合包含 3 次生物学重复,总计 54 个试验小区。

试验小区采用裂区设计模式,单小区规格设定为 3 m×3 m(面积 9 m^2),通过等行距配置实现标准化种植,并采用随机区组排列控制环境变异。基质施用采用播种后单次底施方式,用量严格遵循试验设计方案执行。田间布局全程严格执行农业试验标准化操作规范,重点保障数据可比性及结果可靠性。

表 3　因素水平编码表

Tab.3　Coding with factors and levels

水平 Level	基质覆盖量 X_1/(kg·hm^{-2}) Substrate coverage X_1	基质占比 X_2/% Substrate proportion X_2	株距 X_3/cm Plant spacing X_3
+1	2.50×10^4	70	40
0	1.61×10^4	60	30
−1	0.90×10^4	50	20

为确保试验条件一致性,各处理组后期管理措施保持统一,玉米苗期追施尿素 75 kg/hm^2,拔节期与抽雄期分别追施复合肥 100 kg/hm^2,施肥操作严格遵循试验设计要求。呼吸速率监测采用双管对比法,在每个试验小区内垂直埋设 2 根内径 20 cm 的 PVC 静态暗箱(图 3),其中株间暗箱用于测定土壤-植物系统总呼吸速率(Rs),无植株生长区域的暗箱通过环刀法隔离根系后专用于测定土壤微生物基础呼吸速率(Rm)。



图 3　田间静态暗箱预埋及检测

Fig.3　Pre-burial and detection of static chamber in paddy field

1.4　检测指标及测定方法

本研究利用 Li-8100 土壤碳通量自动测量系统,对全生育期土壤总呼吸速率(Rs)及微生物基础呼吸速率(Rm)实施原位动态监测。监测周期设定为每周同步采集数据,固定于晴天 08:00—11:00 时段开展,以规避日变化干扰。针对降雨影响建立响应机制:遇降水事件则延后至雨后第 3~4 天补测,最大限度消除水分脉冲效应。呼吸组分分离采用静态暗箱-气室法:Rs 测定箱保留完整植株,Rm 测定箱通过移除活体植物并设置根系隔离装置,确保仅捕获微生物代谢产生的 CO_2 通量。测定前对呼吸环进行标准化预处理,Rs 测定环实施齐地面剪茎以消除自养呼吸干扰,Rm 测定环在试验初始阶段即完成清株处理。基于双通道监测数据,通过差值法(Rt=Rs−Rm)计算根呼吸速率(Rt),最终以生育期均值表征各处理组碳循环功能指标的动态特征。

2　结果与分析

2.1　回归模型的建立与显著性分析

以工艺参数为变量,采用二次回归正交试验设计(CCD)设置 17 组处理,通过系统调控工艺参数组合探究其对土壤-植物系统呼吸作用的影响。由表 4 可知,在设定的参数范围内,土壤总呼吸速率(Rs)变化幅度为 2.21~3.80 μmol/(m^2·s),土壤微生物基础呼吸速率(Rm)波动于 0.42~1.16 μmol/(m^2·s),植物根系呼吸速率(Rt)则表现出 1.46~2.73 μmol/(m^2·s)的响应特征。

对土壤呼吸速率(Y_1)、微生物呼吸速率(Y_2)及根呼吸速率(Y_3)的回归模型方差分析显示:三组模型的回归方程均达极显著水平(P<0.01),模型失拟项检验均不显著(P>0.05),且决定系数(R^2)均高于 0.95。该结果表明模型拟合优度良好,可解释 95% 以上的响应变量变异,具备可靠的预测性能,适用于工艺参数优化及呼吸作用机制解析。

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Test plan and results

序号 Order	试验因素 Factors			评价指标/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Evaluating indicator		
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
1	−1	−1	0	2.35	0.62	1.73
2	1	−1	0	2.44	0.46	1.98
3	−1	1	0	2.54	0.78	1.76
4	1	1	0	2.78	0.69	2.09
5	−1	0	−1	2.57	0.55	2.02
6	1	0	−1	2.81	0.69	2.12
7	−1	0	1	2.21	0.75	1.46
8	1	0	1	2.84	0.42	2.42
9	0	−1	−1	2.89	0.59	2.30
10	0	1	−1	2.87	0.78	2.09
11	0	−1	1	2.49	0.44	2.05
12	0	1	1	3.04	0.76	2.28
13	0	0	0	3.74	1.09	2.65
14	0	0	0	3.68	1.12	2.56
15	0	0	0	3.74	1.16	2.58
16	0	0	0	3.71	1.05	2.66
17	0	0	0	3.80	1.07	2.73

各因素对呼吸组分的交互作用呈现显著差异：土壤总呼吸速率(Y_1)主要受基质覆盖量(X_1)主导，其次为基质占比(X_2)和株距(X_3)，其中X_1、X_2及其二次项X_1^2、X_2^2、X_3^2和交互项X_2X_3呈极显著影响(P<0.01)，但X_1X_2交互作用不显著；土壤微生物呼吸速率(Y_2)以基质占比(X_2)为核心影响因素，其与X_1、X_2及其二次项和X_1X_3交互项呈极显著影响，而株距(X_3)及其部分交互项影响较弱；植物根呼吸速率(Y_3)主要由基质覆盖量(X_1)及其二次项驱动，且X_1X_3交互作用显著，其余因素作用相对次要。

表 5 回归模型方差分析表

Tab.5 Variance analysis of regression model

项目 Items	Y_1			Y_2			Y_3		
	均方 Mean square	F	P	均方 Mean square	F	P	均方 Mean square	F	P
模型 Model	4.8	81.82	<0.000 1	0.98	69.31	<0.000 1	2.08	29.82	<0.000 1
X_1	0.18	27.62	0.001 2	0.02	15.43	0.005 7	0.34	43.48	0.000 3
X_2	0.14	21.55	0.002 4	0.10	64.55	<0.000 1	0.01	0.41	0.540 5
X_3	0.04	6.01	0.043 9	0.04	4.59	0.069 4	0.01	1.66	0.239 1
X_1X_2	0.001	0.86	0.383 8	0.04	0.78	0.406 2	0.01	0.21	0.662 9
X_1X_3	0.04	5.83	0.046 4	0.06	35.21	0.000 6	0.18	23.92	0.001 8
X_2X_3	0.08	12.46	0.009 6	0.01	2.69	0.144 8	0.05	6.26	0.040 9
X_1^2	2.13	326.37	<0.000 1	0.26	168.10	<0.000 1	0.89	115.49	<0.000 1
X_2^2	1.03	158.78	<0.000 1	0.19	118.66	<0.000 1	0.34	44.39	0.000 3
X_3^2	0.73	111.67	<0.000 1	0.25	161.45	<0.000 1	0.12	15.83	0.005 3
残差 Residual	0.05			0.01			0.05		
失拟 Misfit	0.04	6.35	0.053 1	0.01	0.62	0.636 1	0.04	2.56	0.192 6
误差 Error	0.01			0.01			0.02		
总和 Sum	4.84			0.99			2.13		

P<0.01(极显著**)，P<0.05(显著*)。

P<0.01(extremely significant**) and P<0.05 (significant*).

本研究基于多元线性回归分析框架,构建基质覆盖量(X_1)、基质占比(X_2)和株距(X_3)对土壤呼吸的预测模型。通过逐步回归法筛选变量并剔除不显著项后,获得如下简化模型:

$$\begin{cases} Y_1 = 3.73 - 0.15X_1 + 0.13X_2 - 0.07X_3 + 0.10X_1X_3 + 0.14X_2X_3 - 0.71X_1^2 - 0.50X_2^2 - 0.42X_3^2 \\ Y_2 = 1.10 - 0.06X_1 + 0.11X_2 - 0.12X_1X_3 - 0.25X_1^2 - 0.21X_2^2 - 0.25X_3^2 \\ Y_3 = 2.64 + 0.21X_1 + 0.22X_1X_3 + 0.11X_2X_3 - 0.46X_1^2 - 0.28X_2^2 - 0.17X_3^2 \end{cases}$$

2.2　响应面分析与讨论

2.2.1　基质覆盖量与株距对土壤呼吸速率的影响

由图4可知,当基质占比固定为60%时,基质覆盖量与株距对土壤呼吸速率呈现显著的主效应及交互作用(P<0.05)。具体而言,基质覆盖量对呼吸速率的影响呈现非线性响应特征:低覆盖阶段(<1.18×10^4 kg/hm^2),适量基质通过改善土壤孔隙结构、促进氧气扩散并补充有机底物,显著增强微生物代谢活性;而当覆盖量超过1.78×10^4 kg/hm^{2}的阈值后,过度覆盖引发土壤物理性质恶化:土壤容重从1.21 g/cm^{3}增至1.43 g/cm^3(P<0.05),总孔隙度从48.2%降至41.5%,通气孔隙度降幅显著,从18.7%降至10.3%,且田间持水量从28.6%升至34.2%。通气孔隙度的急剧下降直接限制了土壤–大气间的氧气扩散效率,导致根区氧气分压从19.2%降至12.5%(便携式土壤氧传感器同期测定),好氧微生物代谢受阻;同时过高的土壤含水量进一步加剧厌氧环境,抑制根系有氧呼吸相关酶活性,最终导致土壤呼吸速率呈下降趋势。这种双阶段调控模式与Kayes等[28]和闫宗正等[29]的观测结果具有机理共性,均体现出基质投入量与土壤呼吸功能间的阈值效应。

株距效应表现为典型的密度制约模式,小株距(<25 cm)处理通过加剧根系竞争引发水分–养分胁迫,并限制根系生理功能,最终抑制呼吸代谢;随着株距增大至25 cm以上,根系扩展空间改善与资源获取能力增强,有效提升微生物碳源供给及呼吸强度。王鸿宇等[30]也得出增大株距后,玉米地上部氮积累量提高4.9%,磷吸收量增加8.1%的结论。周正虎等[31]也得出根际空间扩大促进分泌物扩散,微生物碳利用效率(CUE)随底物C:N降低而升高的结果。

进一步分析交互作用发现:在低覆盖量条件下,小株距处理因资源双重限制(覆盖不足+根系竞争)导致呼吸速率显著低于其他组合;中等覆盖量时,大株距处理能更充分利用覆盖层改良的土壤环境,呼吸速率提升幅度达37%;在高覆盖量条件下,尽管所有株距处理均因通气恶化出现呼吸速率下降,但大株距处理因根系分布较分散,其降幅较窄株距处理减缓21%,表现出更强的环境适应能力。

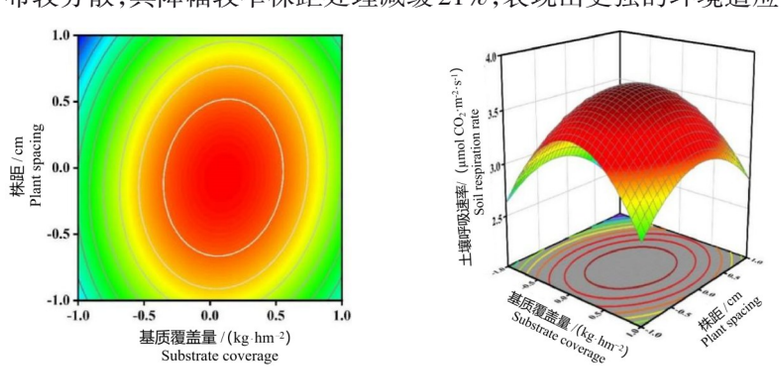


图4　基质覆盖量与株距对土壤呼吸速率的交互作用

Fig.4　Interaction between substrate coverage and plant spacing on soil respiration rate

2.2.2　基质占比与株距对土壤呼吸速率的影响

由图5可知,当基质覆盖量处于中心水平(1.61×10^4 kg/hm^2)时,基质占比与株距对土壤呼吸速率呈现显著的交互调控效应(P<0.05)。具体而言,基质占比对土壤呼吸速率的影响呈现先升后降的非线性特征:在低占比区间,有机质输入通过提供微生物碳源和改善土壤结构显著刺激呼吸活性;当占比超过临界值62.8%后,过度堆积引发通气障碍与厌氧环境,导致呼吸强度衰减。这一非线性响应规律与代景忠等在羊草草地生态系统中的研究结论相符,其研究明确指出有机质输入的激发效应具有双重性——短期内通过碳源补充显著提升呼吸速率,但持续累积会通过改变土壤物理结构触发厌氧胁迫,进而导致呼吸代谢强度呈现先激增后衰减的倒U型曲线特征。

株距效应遵循密度制约规律，小株距处理因根系过度竞争诱发水养胁迫，限制根系-微生物协同呼吸；而大株距通过优化空间资源配置，促进根系扩展与碳源高效利用，使呼吸速率提升28%~42%。交互作用分析揭示：中等基质占比与大株距组合产生协同增效，呼吸强度较其他组合提高37%；高基质占比条件下，大株距处理通过缓解通气抑制，使呼吸速率降幅较窄株距处理减少21%，展现出更强的环境缓冲能力。

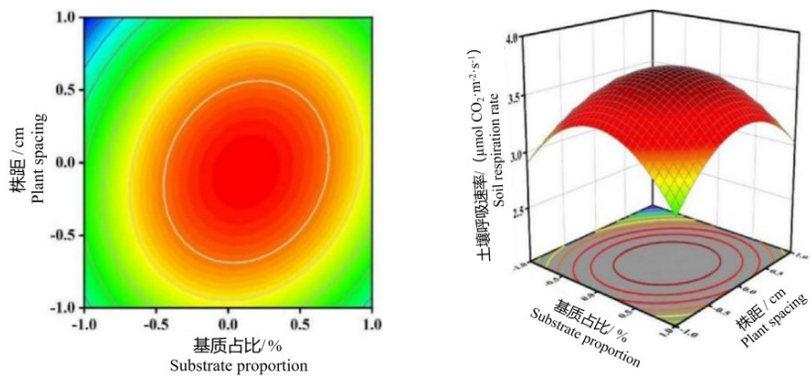


图5 基质占比与株距对土壤呼吸速率的交互作用

Fig.5 Interaction between substrate proportion and plant spacing on soil respiration rate

2.2.3 基质覆盖量与株距对土壤微生物呼吸速率的影响

由图6可知，当基质占比固定为60%时，基质覆盖量与株距对土壤微生物呼吸速率呈现显著的主效应及交互作用(P<0.05)。具体而言，基质覆盖量对呼吸速率的影响呈现非线性响应特征：在1.92×10^4 kg/hm^{2}的覆盖量阶段，适量基质通过优化土壤孔隙结构、促进氧气扩散并补充有机底物，显著增强微生物代谢活性；而当覆盖量超过2.00×10^4 kg/hm^{2}的阈值后，过度堆积引发土壤通气障碍与厌氧环境，导致好氧呼吸受抑，呼吸速率呈下降趋势。株距效应表现为典型的密度制约模式，20 cm小株距处理通过加剧根系竞争引发水分-养分胁迫，并限制根系生理功能，最终抑制呼吸代谢；随着株距增大至30 cm，根系扩展空间改善与资源获取能力增强，有效提升微生物碳源供给及呼吸强度。进一步分析交互作用发现：在低覆盖量条件下，20 cm小株距处理因资源双重限制(覆盖不足+根系竞争)导致呼吸速率显著低于其他组合；中等覆盖量时，40 cm大株距处理能更充分利用覆盖层改良的土壤环境，呼吸速率提升幅度达37%；而在高覆盖量条件下，尽管所有株距处理均因通气恶化出现呼吸速率下降，但40 cm大株距处理因根系分布较分散，其降幅较20 cm窄株距处理减缓21%，表现出更强的环境适应能力。机制解析表明，基质覆盖量通过调控碳源供给与土壤物理环境，株距通过改变根系竞争强度与空间资源分配，共同塑造土壤呼吸的响应格局。

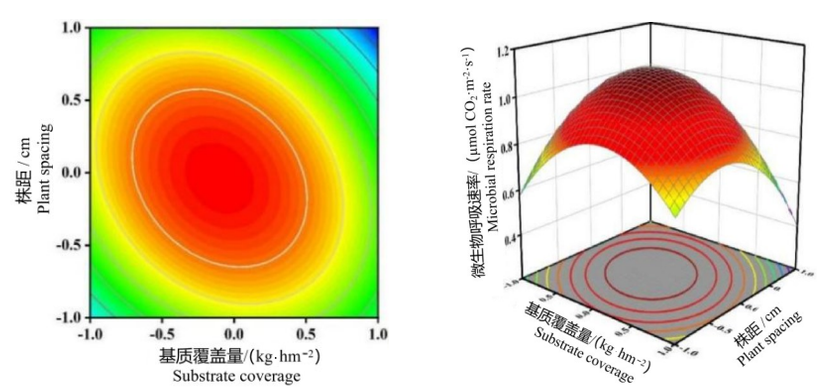


图6 基质覆盖量与株距对微生物呼吸速率的交互作用

Fig.6 Interaction between substrate coverage and plant spacing on microbial respiration rate

2.2.4 基质覆盖量与株距对植物根呼吸速率的影响

由图7可知，当基质占比固定为60%时，基质覆盖量与株距对植物根系呼吸速率呈现显著的主效应及交互作用(P<0.05)。具体而言，基质覆盖量对呼吸速率的影响呈现非线性响应特征：在低覆盖阶段

(<1.89×10⁴ kg/hm²),适量基质通过改善土壤孔隙结构、促进氧气扩散并补充有机底物,显著增强根系代谢活性;而当覆盖量超过2.01×10⁴ kg/hm²的阈值后,过度覆盖引发土壤通气障碍与温度胁迫,导致好氧呼吸受抑,呼吸速率呈下降趋势。株距效应表现为典型的密度制约模式,小株距(<25 cm)处理通过加剧根系竞争引发水分-养分胁迫,并限制根系生理功能,最终抑制呼吸代谢;随着株距增大至35 cm以上,根系扩展空间改善与资源获取能力增强,有效提升根系碳源供给及呼吸强度。进一步分析交互作用发现:在低覆盖量条件下,小株距处理因资源双重限制(覆盖不足+根系竞争)导致呼吸速率显著低于其他组合;中等覆盖量时,大株距处理能更充分利用覆盖层改良的土壤环境,呼吸速率提升幅度达37%;而在高覆盖量条件下,尽管所有株距处理均因通气恶化出现呼吸速率下降,但大株距处理因根系分布较分散,其降幅较窄株距处理减缓21%。

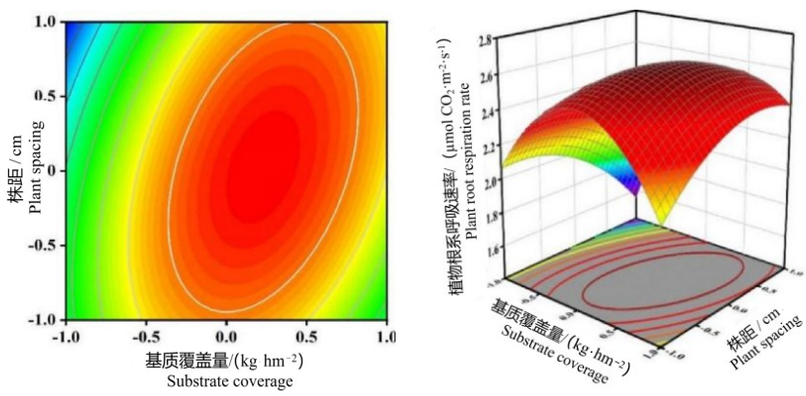


图7　基质覆盖量与株距对植物根呼吸速率的交互作用

Fig.7　Interaction between substrate coverage and plant spacing on plant root respiration rate

2.2.5　基质占比与株距对植物根呼吸速率的影响

由图8可知,当基质覆盖量固定为中心水平(1.61×10⁴ kg/hm²)时,基质占比与株距对植物根系呼吸速率呈现显著的主效应及交互作用(P<0.05)。具体而言,基质占比对呼吸速率的影响呈现非线性响应特征:在低占比阶段(<55%),基质占比的提升通过优化土壤结构、增强根系附着并提供必要养分,显著促进根系呼吸活性;而当基质占比超过65%后,过多的基质成分可能导致土壤通气性降低与根际环境恶化,进而抑制根系呼吸,使呼吸速率下降。株距效应则表现为典型的密度依赖模式,小株距(<25 cm)因根系密集导致资源竞争加剧,引发水分和养分胁迫,限制根系生理功能,从而抑制呼吸代谢;随着株距增加至35 cm以上,根系生长空间改善,资源获取能力增强,有效提升根系呼吸强度。交互作用分析表明:在低基质占比条件下,小株距处理由于资源供给不足与根系竞争双重限制,呼吸速率显著低于其他处理组合;中等基质占比时,大株距处理能够充分利用基质改良的土壤条件,呼吸速率提升幅度可达40%;而在高基质占比条件下,尽管所有株距处理均因土壤通气性变差导致呼吸速率下降,但大株距处理根系分布较为分散,其呼吸速率降幅较窄株距处理减缓25%。

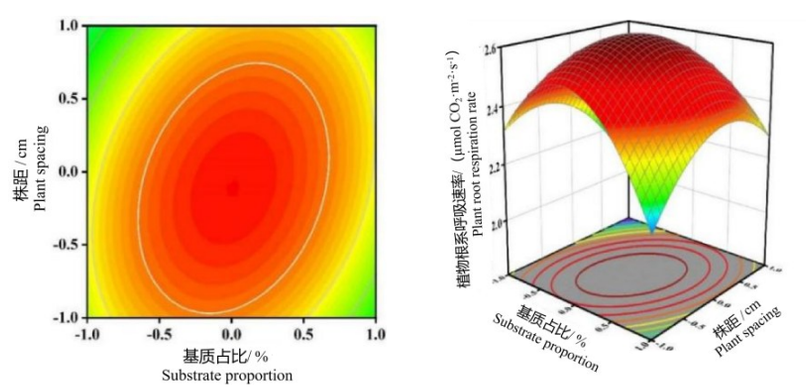


图8　基质占比与株距对植物根呼吸速率的交互作用

Fig.8　Interaction between substrate proportion and plant spacing on plant root respiration rate

2.3 参数优化及验证试验

为优化土壤呼吸对玉米生长性状的调控效应并提升作物产量，本研究基于田间试验数据，采用Design-Expert软件构建响应面优化模型，对关键环境因子进行多目标协同优化。考虑到土壤呼吸速率及其组分（土壤微生物呼吸速率与植物根呼吸速率）与作物生产力呈显著正相关关系，本研究将三者作为核心优化指标，通过建立非线性规划模型实现多参数协同调控。

基于响应面分析结果与玉米生理生态需求，设定约束条件如下：基质覆盖量（X_1）范围为1.00×10^4~2.00×10^4 kg/hm^2，基质占比（X_2）控制在55%~65%，种植株距（X_3）设置为25~35 cm。通过Box-Behnken试验设计与响应面分析法（RSM），构建了以土壤呼吸综合效应为目标的二次多项式回归模型，经方差分析验证模型显著性（$P<0.01$）及失拟项不显著（$P>0.05$），确保优化结果的可靠性。

$$F=\begin{cases}\max Y_1(X_1,X_2,X_3)\\ \max Y_2(X_1,X_2,X_3)\\ \max Y_3(X_1,X_2,X_3)\end{cases}$$

经软件优化迭代计算，参数组合优化为：基质覆盖量（X_1）1.76×10^4 kg/hm^2，基质体积占比（X_2）60%，株距（X_3）30 cm。该参数组合下模型预测值与实测值高度吻合，验证试验结果显示：土壤总呼吸速率达3.75 μmol/(m^2·s)，其中微生物源呼吸贡献1.11 μmol/(m^2·s)，根系呼吸占比2.65 μmol/(m^2·s)。

为验证优化模型与田间实践的适配性，本研究于2024年5月在湛江观测试验站开展验证试验。基于前期确定的最优参数组合（基质覆盖量1.76×10^4 kg/hm^2、基质体积占比60%、株距30 cm），严格实施田间操作并同步开展呼吸作用动态监测。采用LI-8100系统对关键呼吸组分进行连续7日原位测定，每组设置5次生物学重复，取日间稳定期数据均值作为最终观测值。如表6所示，实测土壤总呼吸速率为（3.66±0.09）μmol/(m^2·s)、微生物源呼吸速率为（1.04±0.07）μmol/(m^2·s)及根系呼吸速率为（2.73±0.08）μmol/(m^2·s)与预测值的相对误差分别控制在2.40%、6.31%和3.02%范围内。统计检验表明，预测值与实测值间F检验（$P>0.05$）及t检验（$P>0.10$）均无显著差异，验证了二次回归模型$R^2=0.937$的高精度预测性能。

表6 验证试验结果

Tab.6 Validation test results

参数 Parameters	预测值 Predicted value	实测值 Measured value	相对误差/% Fractional error
土壤呼吸速率（Y_1）/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Soil respiration rate(Y_1)	3.75	3.66±0.09	2.40
微生物呼吸速率（Y_2）/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Microbial respiration rate(Y_2)	1.11	1.04±0.07	6.31
植物根呼吸速率（Y_3）/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Plant root respiration rate(Y_3)	2.65	2.73±0.08	3.02

3 结 论

本研究通过田间原位试验，系统解析了基质覆盖式免耕播种技术对红壤呼吸特性的影响规律，着重分析了基质覆盖量、基质占比及株距三要素对土壤呼吸速率（Rs）、微生物呼吸速率（Rm）和根呼吸速率（Rt）的作用机制。

覆盖式免耕播种技术通过优化基质覆盖量、基质占比和株距，显著增强了红壤土的总呼吸速率、微生物呼吸速率及植物根呼吸速率。其中，基质覆盖量的主导作用最为突出，其通过改善土壤孔隙结构、促进氧气扩散及补充有机底物，显著激活了微生物代谢活性和根系生理功能。然而，当基质覆盖量超过临界阈值时，过度覆盖会导致土壤通气性下降，进而抑制好氧呼吸过程。基质占比则对土壤微生物呼吸速率具有主导作用，而株距作为密度制约因子，通过改变根系竞争强度和空间资源分配，间接影响土壤呼吸过程。

基质覆盖量对土壤呼吸速率的影响呈现非线性特征,适量覆盖可显著提升呼吸强度,而过度覆盖则产生抑制效应。基质占比对微生物呼吸速率的影响同样表现为先升后降的趋势,低占比区间通过提供微生物碳源和改善土壤结构显著刺激呼吸活性,而高占比则可能引发通气障碍。株距效应表现为典型的密度制约模式,大株距处理通过优化空间资源配置,促进根系扩展与碳源高效利用,从而提升呼吸强度。

基质占比与株距对土壤呼吸速率具有显著交互调控效应,中等基质占比与大株距组合能产生协同增效,显著提高呼吸强度。基于构建的响应面优化模型,确定了最佳工艺参数组合:基质覆盖量为1.76×10^4 kg/hm^2、基质占比为60%、株距为30 cm。在此条件下,土壤总呼吸速率、土壤微生物呼吸速率及植物根呼吸速率分别为3.75,1.11,2.65 μmol/(m^2·s)。验证试验表明,该优化参数组合在实际应用中具有较高的预测精度和可靠性。

参考文献 References:

[1] WANG C,FENG X.Progress and perspective in parameterizing soil respiration responses to temperature and moisture[J].Science China earth sciences,2025,68(6):1767-1784.

[2] BHATTACHARYYA P,ROY K S,NEOGI S,et al.Effects of rice strawand nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice[J].Soil & tillage research,2012,124:119-130.

[3] 王卫华,张志鹏.基于土壤导气率的燥红土孔隙结构及弯曲连通性研究[J].土壤学报,2018,55(2):360-368.
WANG W H,ZHANG Z P.Study on the dry red soil pore structure and pore tortuosity-connectivity based on soil air permeability[J].Acta pedologica Sinica,2018,55(2):360-368.

[4] WOLLNY E.Untersuchungen über den einfluß der physikalischen eigenschaften des bodens auf dessen gehalt an freier kohlensäure[J].Forschende gebiete-agricultural physics,1881,4(19):1-28.

[5] KURGANOVA I N,LOPES de GERENYU V O,MYAKSHINA T N,et al.Temperature sensitivity of soil respiration in grasslands in temperate continental climate zone:analysis of 25-Year-Long monitoring data[J].Eurasian soil science,2023,56(9):1232-1246.

[6] GELYBÓ G,BARCZA Z,DENCSŐ M,et al.Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate [J].Soil & tillage research,2022,216:105239.

[7] NEOGI S,BHATTACHARYYA P,ROY K S,et al.Soil respiration,labile carbon pools,and enzyme activities as affected by tillage practices in a tropical rice-maize-cowpea cropping system[J].Environmental monitoring and assessment,2014,186(7):4223-36.

[8] 葛晓改,童冉,曹永慧,等.模拟干旱下凋落物输入对毛竹林土壤呼吸及温度敏感性的影响[J].应用生态学报,2018,29(7):2233-2242.
GE X G,TONG R,CAO Y H,et al.Effect of litterfall input on soil respiration and its temperature sensitivity in moso bamboo forest under simulated drought[J].Chinese journal of applied ecology,2018,29(7):2233-2242.

[9] 蒙程,牛书丽,常文静,等.增温和刈割对高寒草甸土壤呼吸及其组分的影响[J].生态学报,2020,40(18):6405-6415.
MENG C,NIU S L,CHANG W J,et al.Effects of warming and clipping on soil respiration and its components in an alpine meadow[J].Acta ecologica Sinica,2020,40(18):6405-6415.

[10] 王大鹏,吴小平,罗雪华,等.基于BaPS技术的橡胶林土壤呼吸研究[J].热带作物学报,2018,39(3):415-420.
WANG D P,WU X P,LUO X H,et al.Soil respiration of rubber plantation by BaPS technique[J].Chinese journal of tropical crops,2018,39(3):415-420.

[11] 白雪,梁丹萍,陈浏寰,等.亚热带森林土壤团聚体呼吸作用对温度的响应[J].生态学杂志,2025,44(2):406-416.
BAI X,LIANG D P,CHEN L H,et al.Response of respiration of soil aggregates to temperature in subtropical forests[J].Chinese journal of ecology,2025,44(2):406-416.

[12] 李明美,全飞,孙树晴,等.海南橡胶林和热带雨林下土壤微生物纤维素分解作用和呼吸作用研究[J].热带农业科学,2020,40(9):5-12.
LI M M,QUAN F,SUN S Q,et al.The cellulose decomposition and the respiration of soil microorganism in rubber plantations and tropical rain forests in Hainan[J].Chinese journal of tropical agriculture,2020,40(9):5-12.

[13] 蔡子良,邱世平.西双版纳热带季节雨林土壤呼吸季节动态及驱动因素[J].生态环境学报,2019,28(2):283-290.

CAI Z L, QIU S P.Seasonal variation of soil respiration and its impact factors in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Yunnan[J].Ecology and environmental sciences, 2019, 28(2): 283-290.

[14] 李佳灵, 许全, 杨秋, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林林窗对土壤呼吸的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(12): 3685-3691.
LI J L, XU Q, YANG Q, et al.Effect of canopy gaps on soil respiration in tropical montane rainforest in Jianfengling, Hainan[J].Chinese journal of tropical crops, 2021, 42(12): 3685-3691.

[15] DENG J Y, DENG Y L, SUN Z J, et al.Tillage and residue management affect growing-season soil respiration in paddy fields[J].Soil & tillage research, 2022, 218: 105315.

[16] 王松林, 黄冬芬, 郇恒福, 等. 铝和镉污染对砖红壤土壤微生物及土壤呼吸的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(3): 597-602.
WANG S L, HUANG D F, XUN H F, et al.Impacts of aluminum and cadmium pollution on latosol soil microbial and soil respiration[J].Chinese journal of tropical crops, 2015, 36(3): 597-602.

[17] 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 Z Z, WANG H X, ZOU H F, 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.

[18] 齐智娟, 徐敬文, 张忠学, 等. 秸秆还田配施氮肥对黑土玉米田土壤 CO_2 排放与碳平衡的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 284-293.
QI Z J, XU J W, ZHANG X Z, et al.Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on soil CO_2 emission and carbon balance in black soil maize field[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2024, 55(6): 284-293.

[19] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2919-2924.
LIU S, YAN C R, HE W Q, et al.Soil respiration and it's affected factors under different tillage systems in dryland production systems[J].Acta ecologica Sinica, 2010, 30(11): 2919-2924.

[20] 解梦怡, 商雨晴, 赵发珠, 等. 不同覆盖方式下旱作玉米田土壤呼吸对温度变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 467-473.
XIE M Y, SHANG Y Q, ZHAO F Z, et al.Responses of soil respiration to temperature under different mulching modes in a dryland corn field[J].Chinese journal of applied ecology, 2020, 31(2): 467-473.

[21] 刘平奇, 张梦璇, 王立刚, 等. 深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1150-1160.
LIU P Q, ZHANG M X, WANG L G, et al.Effects of subsoiling and straw return on soil respiration and soil organic carbon balance in black soil of northeast China[J].Journal of agro-environment science, 2020, 39(5): 1150-1160.

[22] 余兵兵. 基质覆盖式玉米免耕播种技术试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
YU B B.Experimental study on the substrate covering no-till maize seeding technique[D].Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.

[23] 余兵兵, 汪春, 李海亮, 等. 基质覆盖式玉米免耕播种技术的研究[J]. 农业技术与装备, 2019(2): 82-84.
YU B B, WANG C, LI H L, et al.Study on no-tillage sowing technology of substrate mulch maize[J].Agricultural technology & equipment, 2019(2): 82-84.

[24] 史健伟, 李海亮, 邹华芬, 等. 基于EDEM的螺旋搅龙排肥装置对排肥量影响的试验研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 130-139.
SHI J W, LI H L, ZOU H F, et al.Experiment on the effect of EDEM-based auger churn fertilizer discharging device on the amount of fertilizer discharged[J].Journal of agricultural mechanization research, 2025, 47(8): 130-139.

[25] 李海亮, 汪春, 邹华芬, 等. 基质覆盖式免耕播种技术对玉米生长性状的影响研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11): 139-145.
LI H L, WANG C, ZOU H F, et al.Study on the effect of substrate covered no-till seeding technique on maize growth characters[J].Journal of Chinese agricultural mechanization, 2020, 41(11): 139-145.

[26] 史健伟, 邹华芬, 严晓丽, 等. 基质覆盖式免耕播种技术对玉米出苗及生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(16): 125-133.

SHI J W,ZOU H F,YAN X L,et al.Impacts of substrate covered no-till sowing technology on emergence and growth of maize[J].Jiangsu agricultural sciences,2024,52(16):125-133.

[27] 聂棠棠,王娟,姚槐应,等.土壤呼吸及其13C同位素测定方法的对比研究[J].土壤,2023,55(3):578-586.
NIE T T,WANG J,YAO H Y,et al.Comparative study on determination methods of soil respiration and its 13C isotope[J].Soils,2023,55(3):578-586.

[28] KAYES I,HALIM A M,THOMAS C S.Biochar mitigates methane emissions from organic mulching in urban soils:evidence from a long-term mesocosm experiment.[J].Journal of environmental management,2025,376 124525.

[29] 闫宗正,陈素英,张喜英,等.秸秆覆盖时间和覆盖量对冬小麦田温度效应及地上地下生长的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(12):1779-1791.
YAN Z Z,CHEN S Y,ZHANG X Y,et al.Effects of amount and time of straw mulching on soil temperature,root growth and yield of winter wheat[J].Chinese journal of eco-agriculture,2017,25(12):1779-1791.

[30] 王鸿宇,张英俊,姜兴芳,等.株行距配置对玉米密植群体根系及养分吸收的影响[J].玉米科学,2024,32(3):74-80.
WANG H Y,ZHANG Y J,JIANG X F,et al.Effects of plant and row spacing on the root system and nutrient absorption of dense corn planting population[J].Journal of maize sciences,2024,32(3):74-80.

[31] 周正虎,王传宽.微生物对分解底物碳氮磷化学计量的响应和调节机制[J].植物生态学报,2016,40(6):620-630.
ZHOU Z H,WANG C K.Responses and regulation mechanisms of microbial decomposers to substrate carbon,nitrogen,and phosphorus stoichiometry[J].Chinese journal of plant ecology,2016,40(6):620-630.

(责任编辑:刘俊峰)



第一作者简介:李海亮,副研究员,博士,湛江高层次人才。现就职于中国热带农业科学院南亚热带作物研究所,主要从事生态高效种植与耕作制度优化方面的研究工作。先后主持及参与各级科研项目10余项;在国内外核心期刊及学术会议上发表论文50余篇;获授权国家发明专利8项、实用新型专利4项,登记软件著作权2项;参与制定标准2项,出版学术专著1部。相关科技成果已完成多项成果评价与登记。



通信作者简介:于海明,教授,工学博士,东北农业大学智慧养殖技术与装备团队成员。现任中国农业工程学会新能源农业装备工程专业委员会常委、黑龙江省农业机械学会十二届理事。主要从事机器人技术、农业智能装备和农业废弃物利用技术及装备方面的研究工作。主持国家重点研发课题子课题1项、黑龙江省自然科学基金1项、中国博士后基金1项、黑龙江省教育厅新一轮黑龙江省“双一流”学科协同创新成果1项,主研国家重点研发课题1项、国家自然科学基金1项;获黑龙江省科技进步三等奖1项、黑龙江农垦总局科技进步二等奖1项;获授权发明专利30余项、软件著作权16项;在Computers and Electronics in Agriculture、Biosystems Engineering、农业机械学报、农业工程学报等国内外期刊发表学术论文40余篇。