



孙恩惠, 张晶, 陈泽秋, 雍成, 王秋君, 周明, 陈玲, 曲萍, 靳红梅, 黄红英. 秸秆基质块育秧对水稻幼苗生长生理及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(05): 42-52.

SUN Enhui, ZHANG Jing, CHEN Zeqiu, YONG Cheng, WANG QiuJun, ZHOU Ming, CHEN Ling, QU Ping, JIN Hongmei, HUANG Hongying. Effects of straw matrix block seedling cultivation on the growth, physiology and yield composition of rice[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(05): 42-52.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.05.04

秸秆基质块育秧对水稻幼苗生长生理及产量的影响

孙恩惠^{1,2,3} 张晶¹ 陈泽秋^{1,3} 雍成¹ 王秋君¹ 周明⁴
陈玲¹ 曲萍¹ 靳红梅¹ 黄红英^{1*}

(1. 江苏省农业科学院 农业资源与环境研究所/农业农村部盐碱土改良与利用(滨海盐碱地)重点实验室/国家农业环境六合观测实验站/江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210014;

2. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013;

3. 江苏理工学院 资源与环境工程学院, 江苏 常州 213000;

4. 江苏农垦农业服务有限公司, 南京 210019)

摘要 为探究应用秸秆基质块(Straw matrix block, SMB)育秧对水稻幼苗生长及产量的影响,使用改性秸秆纤维为原料制备的SMB为育秧基质,以基质土为对照(CK),测定水稻幼苗壮秧指数、叶绿素含量、根系活力、根长、表面积、根体积、抗氧化酶活性及产量构成等指标,并分析育秧过程中SMB释放的酚酸单体化合物的规律及对水稻秧苗生理指标的影响。结果表明:育秧周期(26 d)内,SMB的发芽指数(GI)可达72.39%,根系活力达244.52 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$,总根长较CK升高51.93%,根系发达。在第4天时,SMB幼苗根系中超氧化歧化酶(SOD)和谷氨酸合酶(GOGAT)活性、丙二醛(MDA)含量均出现最大值,分别达到1 840.13 U/g、735.26 U/g和16.84 nmol/g,随后呈现逐渐下降趋势;而可溶性蛋白(SP)表现上升趋势,在第26天时达到16.11 mg/g。育秧过程中SMB释放的酚酸单体以对香豆酸(37.61~42.91 $\mu\text{g}/\text{g}$)、反式阿魏酸(13.54~20.15 $\mu\text{g}/\text{g}$)、香草醛(2.39~4.62 $\mu\text{g}/\text{g}$)和4-羟基苯甲酸(1.17~1.78 $\mu\text{g}/\text{g}$)为主;SMB秧龄14 d时的幼苗根中的SOD活性和MDA含量均显著低于CK;第4和14天的幼苗根系GOGAT活性比CK分别高29.70%和18.07% ($P<0.05$);第20—26天的秧苗根系可溶性蛋白含量升高31.73% ($P<0.05$);SMB释放的反式阿魏酸与水稻幼苗根系GOGAT活性呈显著负相关 ($P<0.05$);使用SMB育秧能显著提高水稻有效穗、千粒重、理论和实际产量。综上,秸秆基质块(SMB)对水稻幼苗茎基宽、壮秧指数、可溶性蛋白、根系形态及产量等指标均具有显著的促进作用,适用于规模化水稻育苗生产。

关键词 秸秆基质块; 水稻秧苗; 酚酸; 根系形态; 生理指标; 抗氧化酶活性

中图分类号 S318;S511

文章编号 1007-4333(2025)05-0042-11

文献标志码 A

Effects of straw matrix block seedling cultivation on the growth, physiology and yield composition of rice

SUN Enhui^{1,2,3}, ZHANG Jing¹, CHEN Zeqiu^{1,3}, YONG Cheng¹, WANG QiuJun¹,
ZHOU Ming⁴, CHEN Ling¹, QU Ping¹, JIN Hongmei¹, HUANG Hongying^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization/National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment, Luhe/Key Laboratory of Saline-

收稿日期: 2024-11-12

基金项目: 江苏省农业科技自主创新项目(CX(23)1034);江苏农垦科技创新专项(SKNF012024003);江苏省重点研发计划(BE2020335)

第一作者: 孙恩惠(ORCID:0000-0001-7262-6887),副研究员,主要从事农业废弃物资源化、绿色低碳化秸秆预处理技术、全生物降解农用材料开发及应用研究,E-mail: enhsun@126.com

通讯作者: 黄红英(ORCID:0009-0000-6895-3770),研究员,主要从事农业废弃物资源化利用研究,E-mail: sfmicrolab@163.com

- Alkali Soil Improvement and Utilization (Coastal Saline-Alkali Lands) of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;
2. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
3. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213000, China;
4. Jiangsu Nongken Agricultural Service Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract To explore the effects of straw matrix block (SMB) seedling cultivation on rice seedlings' growth, physiology and yield, SMB prepared with modified straw fiber as raw material was used as seedling matrix, and the matrix soil was used as control (CK). The indexes of seedling strength index, chlorophyll, root activity, total root length, root surface area, root volume, antioxidant enzyme activity and yield composition were determined. The rule of phenolic acid monomer compound produced by straw matrix block during seedling cultivation and its effect on the physiological indexes of rice were analyzed. The results showed that: The germination index (GI) of SMB reached 72.39%, the root activity reached 244.52 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$, the total root length was increased by 51.93% compared with CK, and the root morphology was developed. On the 4th day, the activities of superoxide dismutase (SOD) and glutamate synthase (GOGAT) and malondialdehyde (MDA) in the roots of SMB seedlings showed the maximum values, which were 1 840.13 U/g, 735.26 U/g and 16.84 nmol/g, respectively, and showed a gradually decreasing trend afterward. The soluble protein (SP) content showed an upward trend, reaching 16.11 mg/g on day 26. The phenolic acid monomers released during seedling rearing were mainly p-coumaric acid (37.61-42.91 $\mu\text{g}/\text{g}$), trans-ferulic acid (13.54 -20.15 $\mu\text{g}/\text{g}$), vanillin (2.39-4.62 $\mu\text{g}/\text{g}$) and 4-hydroxybenzoic acid (1.17-1.78 $\mu\text{g}/\text{g}$). SOD activity and MDA content in the root of SMB seedlings were significantly lower than CK seedlings on day 14. Compared with CK, the root GOGAT activity increased by 29.70% and 18.07% ($P<0.05$) on day 4 and day 14. The soluble protein content in seedling root was increased by 31.73% ($P<0.05$) on day 20-26. There was a significant negative correlation between the trans-ferulic acid released by SMB and the root GOGAT activity of rice seedlings ($P<0.05$). SMB can significantly improve the effective panicle, 1 000-grain weight, and the theoretical and practical yield of rice. In conclusion, straw matrix block seedling cultivation significantly promote rice seedling stem base width, strong seedling index, soluble protein, root morphology and yield composition, which is suitable for large-scale rice seedling cultivation.

Keywords straw matrix block; rice seedling; phenolic acid; root physiology; physiological index; antioxidant enzyme activity

中国是目前水稻产量最高的国家,水稻种植面积约3 000万 hm^2 ^[1]。随着粮食生产全程机械化程度越来越高,水稻机插率也在迅速提升,而秧盘育秧是实现水稻机械化移栽的前提,现有常规毯苗机插育秧仍采用营养土,导致优质农田耕作层遭受严重破坏^[2]。此外,过度取土可能对农田生态环境构成威胁,水稻育秧取土越来越成为水稻种植主体和规模化育秧中心所面临的难题^[3]。虽然也可采用商用水稻专用育秧基质,但由于商品基质制作发酵周期长,原料与工序繁杂,性状稳定性差,且存在微塑料抑制水稻幼苗生长的潜在风险,育秧安全性难以保证^[4]。因此,研制新型育秧介质以替代传统育苗土或商用基质对确保水稻生产苗齐苗壮及产量具有重要意义。

秸秆基质块是以农作物秸秆纤维为原料,经无

害化处理后再交织而成的块状或板状基质^[5],目前在全国多个省份进行应用推广,示范面积近百万亩,因其具有所有秧苗素质好、壮秧指数高、根系盘结力强且节本省工等优势,逐渐成为发展新动向^[5-7]。凌宇飞等^[2]研究表明,秸秆基质块与营养土育出的秧苗栽插质量无差异,但在移栽后12 d使用基质块育出的秧苗苗情显著优于营养土;杜益涵等^[8]研究发现,3D打印的播种基质块对水稻幼苗茎基宽、发根力和根系盘结力均显著优于常规播种基质块和基质土,且能有效提高水稻结实率和千粒重。然而,由于所用原料为秸秆,且无害化发酵周期显著低于传统预处理方法,可能在育苗期间因二次发酵产生化感物质,进而影响秧苗生长,这成为秸秆基质块大面积应用中亟需突破的技术瓶颈。余常兵等^[9]研究表明,秸秆原料腐解液中含有酚酸、

酯、醇、萜、有机酸及挥发性等具化感作用的化合物。李佳男等^[10]研究发现,小麦秸秆产生的酚酸使棉花幼苗根系活力显著降低,并影响秧苗生物量的形成。董淑琦等^[11]研究发现,谷子秸秆水浸提液对杂草种子的发芽率、根长、芽长均具有显著化感作用。张国伟等^[12]研究也指出,棉花秸秆浸提液中的对羟基苯甲酸影响根系细胞膜通透性,破坏根系细胞结构。此外,棉花秸秆浸提取液中低浓度酚酸延长了小麦种子的发芽时间,但不影响发芽率^[13]。刘瑞显等^[14]研究小麦秸秆浸提液和腐解液对棉花种子发芽及幼苗生长的化感效应发现,低浓度均可显著促进根系呼吸速率和根系活力,这可能与在水稻育秧期施用适量麦秸腐解液可提高水稻秧苗抗逆性有关^[15]。也有报道认为酚酸含量的变化不能解释水稻秸秆对油菜幼苗生长的负效应^[9]。张晶等^[1]研究发现,秸秆基质块育秧过程对水稻植株根系形态和生长发育有一定的负面影响,经纳米氧化锰改性秸秆纤维后制备性能优化的秸秆基质块对水稻种子发芽率的负效应可显著降低。但迄今,育秧过程中采用秸秆基质块对水稻秧苗生长发育及产量构成指标的影响研究尚未见报道。本研究以纳米氧化锰改性秸秆基质块(SMB)为育苗基质,利用种子发芽试验、根系扫描技术、酶活性测定及液质联用分析方法分析育秧期间SMB对水稻生长特性、根系形态、生理效应等性能的影响,以及酚酸单体化合物与水稻幼苗生长的理化指标间的相关性,旨在探究秸秆基质块育秧对水稻幼苗生长及产量的影响,以期为秸秆基质块的推广提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料及地点

供试水稻品种‘南粳46’,由江苏省农科院粮食作物研究所提供。秸秆基质块(Straw matrix block, SMB)由南通海门红杉树智能科技有限公司生产,规格为57.5 cm×27.5 cm×1.2 cm,所用原料为纳米锰氧化物改性处理的水稻秸秆;对照使用基质土(CK)购于安徽省天长市金秋农事服务专业合作社。SMB和CK基本性质分别为:pH为5.72和5.28、EC为1.43和2.2 mS/cm、总N 7.09和15.58 g/kg、NO₃⁻-N 200.36和6 657 mg/kg、NH₄⁺-N 436.97和971.46 mg/kg、总P 0.56和5.26 g/kg、总K 3.89和10.52 g/kg、有机碳 499.53和243.43 g/kg。

2023年5月10日在江苏省农业科学院长期试验示范基地(31°19′39″N,118°53′31″E,海拔34.7 m)进行水稻育苗。田间产量构成试验于2023年10月28日在江苏农垦农业服务有限公司试验田(33°37′91″N,119°10′43″E,海拔25.0 m)进行,每处理田块面积为0.1 hm²。

1.2 试验设计

采用随机区组试验设计,设2个处理:秸秆基质块(SMB)和对照(CK),每个处理3次重复。播种前将SMB置于硬质塑料水稻育秧盘(58 cm×28 cm×3 cm)中,调控SMB和CK育苗基质含水率为75%±2%,然后将浸种露白的稻种均匀铺撒在SMB表面,每盘播水稻种子120 g,于播种后26 d测定水稻秧苗的发芽指数、地上和地下部干鲜重、叶绿素、壮秧指数,以及根系活力、总根长、根表面积和根体积;并跟踪播种后1、4、14、20和26 d SMB和CK所产生的酚酸单体和生理生化指标的变化,育秧条件采用常规传统的早育秧方式。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 水稻生长指标

水稻种子发芽率及水稻种子发芽指数(Germination index, GI)测定分别参照肖德顺等^[16]和白志刚^[17]的方法;株高和茎基宽参照吕伟生等^[18]方法;取代表性的10 cm×10 cm秧块,分为地上部和根系两部分,测定百株秧苗的干质量为秧苗干重;壮秧指数=茎基部宽×地上部干重/株高^[18];SPAD采用日本Konica Minolta公司SPAD-502型手持便携式叶绿素仪测量水稻倒1叶的SPAD。

1.3.2 根系形态指标

育秧结束后,选取长势相近的10株秧苗,从茎基部分离地上和地下部,地下部混合后用TTC法^[16]测定根系活力;另选取水稻植株长势较为一致的6株代表性秧苗,从茎基部剪去所有根系,采用根系扫描仪(Microtek ScanMaker i800)获得秧苗形态图像,使用Root Nav软件测定并计算总根长、根系表面积和根体积等指标。

1.3.3 根系生理生化指标

采用北京索莱宝生物科技有限公司试剂盒测定根系SOD活性;通过测定偶联Gln和NADH氧化反应的OD计算谷氨酸合酶(GOGAT)活性^[17];采用硫代巴比妥酸法^[19]测定植株丙二醛

(Malondialdehyde, MDA)含量;采用考马斯亮蓝(G-250)法^[20]测定水稻植株根系可溶性蛋白质(Soluble protein, SP)含量。

1.3.4 秸秆基质块酚酸单体化合物

采用高效液相色谱和质谱联用外标法^[21]测定秸秆基质块酚酸单体化合物种类及含量。利用美国赛默飞公司的LC-ESI-MS(UHPLC-QE, Thermo, USA)分析,色谱仪为Waters超高效液相系统(Acquity UPLC, Waters, USA),色谱柱采用Waters HSS T3(100 mm × 2.1 mm, 1.8 μm),质谱仪为美国Thermo公司的Q Exactive高分辨质谱检测系统。

1.3.5 产量及构成因素测定

水稻成熟后每个小区随机取21穴采集植株样品,每个处理按3点取样法,将样品风干统计测定有效穗数、穗粒数、瘪粒数、结实率和千粒重,并计算理论产量^[18]。

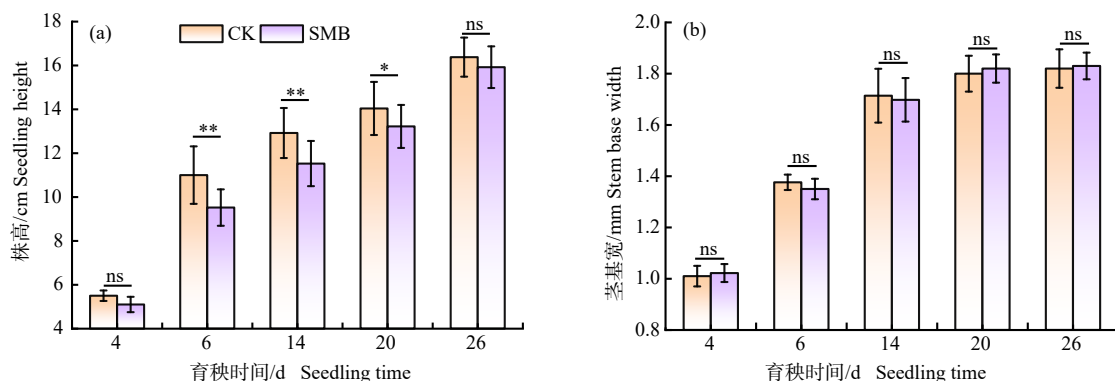
1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2022软件整理数据,使用IBM SPSS Statistics 20.0对试验数据统计分析,进行独立样本T检验及Duncan法显著性水平检验($P < 0.05$)并采用Origin 2022软件绘图。

2 结果与分析

2.1 秸秆基质块对水稻秧苗株高、茎基宽及秧苗素质的影响

由图1可知,育秧4 d后,秸秆基质块(SMB)和基质土(CK)的水稻幼苗株高之间差异显著,在第14天前,SMB株高较CK低10.79%;而在第14—26天,SMB与CK株高差异逐渐缩小;在第20和26天,SMB的株高比CK低5.84%和2.81%;在育秧14 d内,SMB水稻植株茎基宽略低于CK,而后SMB的茎基宽高于CK。可见,相较于CK,采用SMB有助于控制秧苗株高,增加茎基宽,利于培育壮苗。



SMB, 秸秆基质块; CK, 基质土。ns, *, ** 分别表示不显著, 显著 ($P \leq 0.05$) 和极显著 ($P \leq 0.01$)。下同。

SMB, straw matrix block; CK, matrix soil. ns, * and ** indicate no significant, significant ($P \leq 0.05$) and extremely significant ($P \leq 0.01$), respectively. The same below.

图1 育秧过程中水稻秧苗株高(a)及茎基宽(b)动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of seedling height (a) and stem base width (b) during seedling raising

由表1可知,SMB的水稻发芽率为84.44%,与CK差异不显著;SMB发芽指数(GI)达到72.39% ($P < 0.05$)。SMB的幼苗单株地上部鲜重和干重均略低于CK,但差异不显著;SMB地下部鲜重和干重分别比CK高2.70%和4.06% ($P < 0.05$),SMB的壮秧指数(SSI)为1.54,显著高于CK。此外,SMB的水稻秧苗SPAD略低于CK,但差异不显著。

2.2 秸秆基质块对水稻秧苗根系形态的影响

由表2可知,育苗第26天,SMB的秧苗总根长、根表面积和根体积比CK分别增加51.93%、27.81%和7.51% ($P < 0.05$)。SMB秧苗根系活力与CK在统计

学上的差异未达显著水平,但仍表现出4.69%的提升。因此,采用SMB育秧可有效促进水稻秧苗根系的生长和活力。

2.3 秧苗根系生理指标的变化

由图2可知,SMB的根系SOD活性总体呈先下降后缓慢上升的趋势,而CK根系的SOD活性呈先增加后下降再缓慢上升趋势。育苗第4天,SMB根系SOD活性比CK高26.55%,至第14天时,其SOD活性降低至1084.50 U/g,降幅达41.06%,而CK根系SOD活性升高16.47%,且显著高于SMB。但在育苗第20天时,CK根系SOD由1693.60 U/g下降至1074.45 U/g;

表1 秸秆基质块处理的水稻植株秧苗素质
Table 1 Straw matrix block on seedling quality of rice plant

处理 Treatment	发芽率/% GR	发芽指数/% GI	鲜重/mg Fresh weight		干重/mg Dry weight		SPAD	壮秧指数 SSI
			地上部 Overground	地下部 Underground	地上部 Overground	地下部 Underground		
CK	86.67 ^a	80.13 ^a	61.08 ^a	50.71 ^b	13.46 ^a	10.10 ^b	23.27 ^a	1.49 ^b
SMB	84.44 ^{ab}	72.39 ^b	56.28 ^b	52.08 ^a	13.37 ^a	10.51 ^a	21.81 ^b	1.54 ^a

注:同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

表2 不同处理的水稻根系活力及根系形态
Table 1 Root activity and root morphology of rice under different treatments

处理 Treatment	根系活力/($\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$) Root activity	总根长/cm Total root length	根表面积/ cm^2 Root surface area	根体积/ cm^3 Root volume
CK	244.52 $\pm$ 3.46 ^a	5.43 ^b	1.51 ^b	0.033 3 ^b
SMB	256.00 $\pm$ 5.67 ^a	8.25 ^a	1.93 ^a	0.035 8 ^a

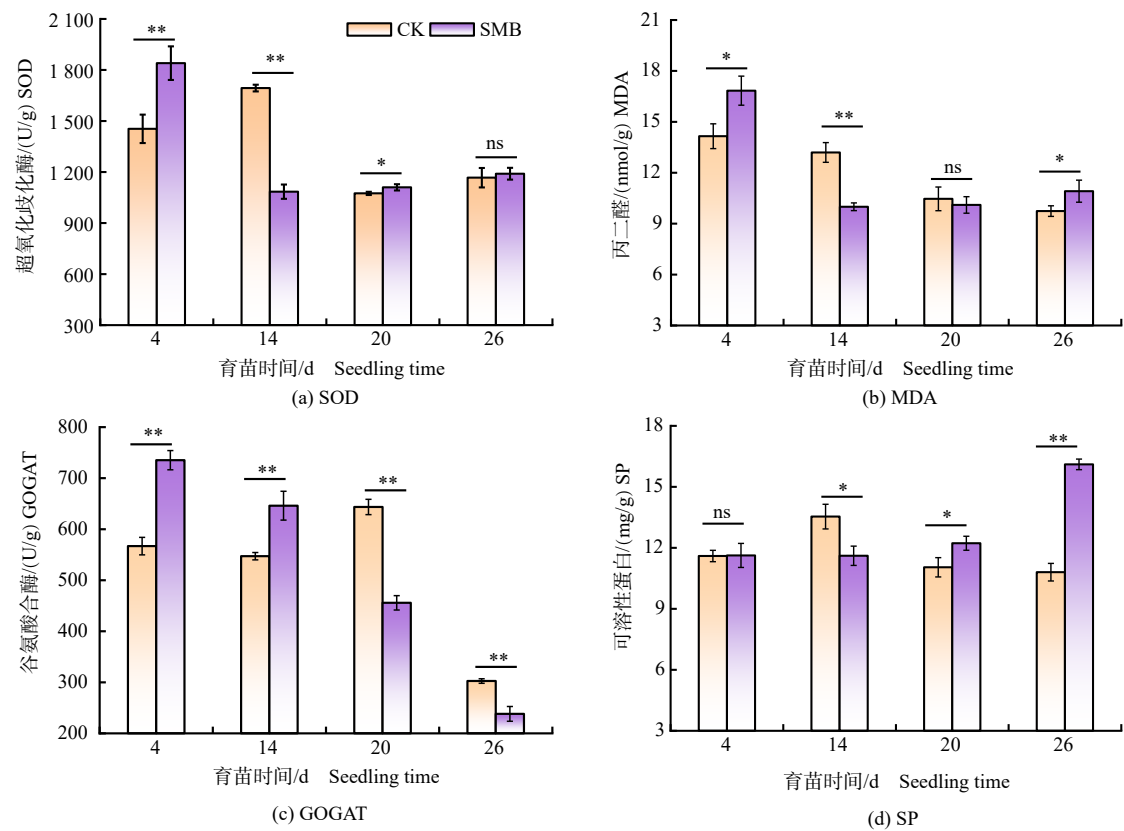


图2 秸秆基质块和基质土育秧的秧苗根系生理指标的变化

Fig. 2 Changes of physiological indexes of rice seedling roots in SMB and CK

育秧结束后,SMB的根系SOD降幅达35.33%,但其活性略高于CK,但差异不显著。
在整个育苗期,SMB和CK的水稻植株根系丙二

醛(MDA)含量均呈下降趋势。在育苗第4天,SMB的MDA比CK高18.96%;而在第14天,SMB的MDA降幅达40.63%,CK的MDA降幅相对平缓。苗期结

束时, SMB 和 CK 的 MDA 降幅分别为 35.18% 和 31.18%, 两者差异不显著(图 2(b))。随着水稻秧苗的生长发育, SMB 的 GOGAT 活性呈现下降趋势, CK 则表现出先增加后减小的趋势。在育苗第 4 和 14 天时, SMB 的根系 GOGAT 活性分别为 735.26 和 646.04 U/g, 比 CK 高出 29.70% 和 18.07% ($P < 0.05$)。在第 20 天时, SMB 的 GOGAT 活性下降至 455.80 U/g, 而 CK 则升高至 643.59 U/g; 第 26 天时, 两者的 GOGAT 均显著下降, SMB 和 CK 的 GOGAT 活性分别下降至 238.17 和 302.46 U/g, 两者差异显著 ($P < 0.05$)(图 2(c))。

育苗初期, 两者可溶性蛋白(SP)含量基本一致, 在育苗 14 d 内, CK 的 SP 含量高于 SMB, 但随后显著下降至 10.80 mg/g, 降幅为 6.85%。而 SMB 的 SP 含量在整个育苗期均呈上升趋势, 尤其是第 14—26 天时, 由 11.63 mg/g 增加至 16.11 mg/g, 增幅达 38.52%, 相比于 CK 具有显著性差异 ($P < 0.05$)(图 2(d))。

2.4 水稻育秧过程中秸秆基质块释放的酚酸单体化合物种类及含量变化

由图 3 可知, SMB 和 CK 释放的酚酸单体主要是没食子酸、原儿茶酸、原儿茶醛、4-羟基苯甲酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、香草醛、对香豆酸、丁香醛、反式阿魏酸、芥子酸、苯甲酸、氢化肉桂酸和反式肉桂酸。主要酚酸单体释放量由高到低为: 对香豆酸 > 反式阿魏酸 > 香草醛 > 4-羟基苯甲酸, 第 1、4、14、20 和 26 天时, SMB 释放的 4 种主要酚酸单体化合物的浓度范围分别为 37.61~42.91、13.54~20.15、2.39~4.62 和 1.17~1.78 $\mu\text{g/g}$ 。CK 的浓度范围分别为 26.38~31.50、3.04~6.88、1.09~1.29 和 4.20~4.61 $\mu\text{g/g}$ 。SMB 所释放的酚酸总量是 CK 的 1.43~1.63 倍, 其中对香豆酸、反式阿魏酸、香草醛是 CK 的 1.27~1.52、2.44~4.45 和 2.09~3.67 倍, 而 CK 的 4-羟基苯甲酸是 SMB 的 2.59~3.89 倍, 二者释放的酚酸化合物总量差异显著 ($P < 0.05$), 且均是在第 20 天时总酚酸释放量达最高值(表 3)。

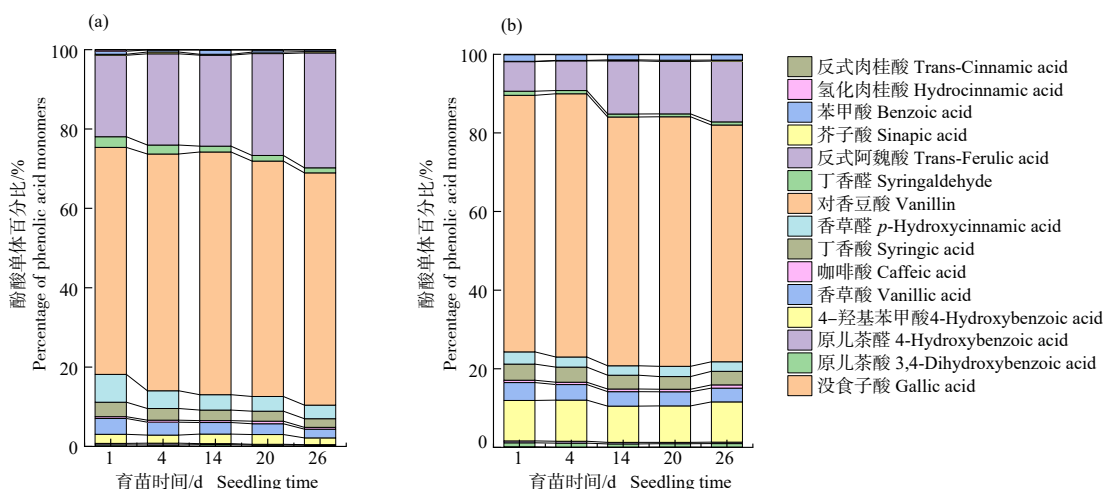


图3 秸秆基质块(a)和基质土(b)释放的酚酸化合物单体的种类和含量占比

Fig. 3 Types and contents of phenolic acid compound monomers released from SMB (a) and CK (b)

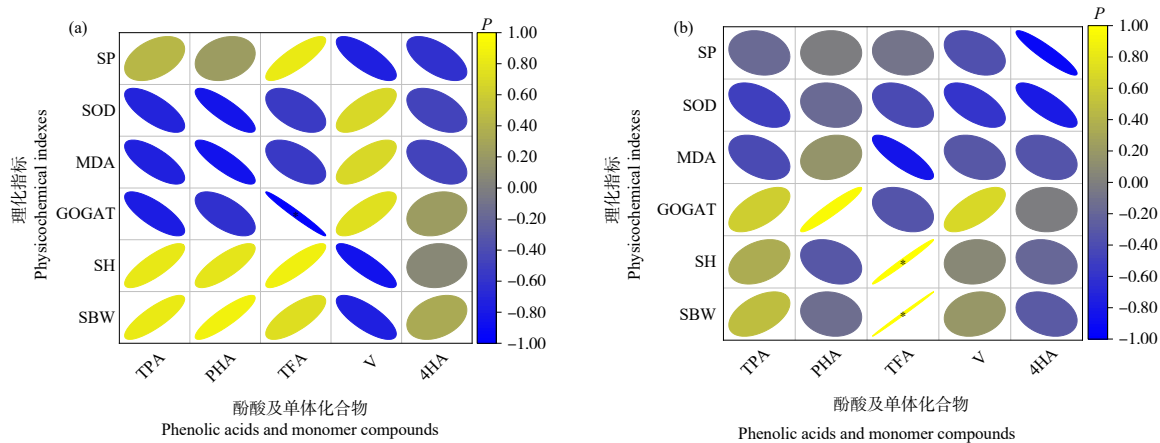
随育苗时间的延长, SMB 释放的对香豆酸、反式阿魏酸和 4-羟基苯甲酸占酚酸总量比例均呈增加趋势, 香草醛的下降趋势显著, 而 CK 释放的对香豆酸、香草醛和 4-羟基苯甲酸呈下降趋势, 反式阿魏酸的占比则呈极显著增加 ($P < 0.01$)。综上, 育苗期间释放的酚酸单体主要为对香豆酸、反式阿魏酸、香草醛和 4-羟基苯甲酸, 且 SMB 酚酸释放量高于 CK, 但总酚酸量处于安全阈值范围内, 见表 3。

2.5 SMB 释放的酚酸单体化合物与水稻生理指标间的相关性分析

由图 4 可知, SMB 释放的反式阿魏酸含量与水稻根系的 GOGAT 活性呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 SP 呈正相关 ($P = 0.17$); 对香豆酸与 SOD 活性和 MDA 含量呈负相关 ($P = 0.16, 0.15$); 株高、茎基宽与对香豆酸和反式阿魏酸释放量均呈正相关, 与香草醛的量则呈负相关, 但均未达显著水平。CK 的反式阿魏酸释放量与株高和茎基宽分别呈显著

表3 育苗过程中秸秆基质块释放的主要酚酸单体化合物的种类和含量
Table 3 Types and contents of phenolic acid monomer compounds released from SMB during raising

处理 Treatment	育苗时间/d Seedling time	含量/(μg/g) Content				总酚酸/(μg/g) Total phenolic acid
		对香豆酸 p-Hydroxycinnamic acid	反式阿魏酸 Trans-Ferulic acid	香草醛 Vanillin	4-羟基苯甲酸 4-Hydroxybenzoic acid	
SMB	1	37.73 ^c	13.54 ^d	4.62 ^a	1.51 ^b	65.96 ^c
	4	37.61 ^c	14.50 ^c	2.82 ^b	1.30 ^c	63.02 ^d
	14	40.14 ^b	15.05 ^c	2.53 ^{bc}	1.57 ^b	65.61 ^c
	20	42.91 ^a	18.58 ^b	2.69 ^{bc}	1.78 ^a	72.33 ^a
	26	40.75 ^b	20.15 ^a	2.39 ^c	1.17 ^c	69.61 ^b
CK	1	26.38 ^c	3.04 ^c	1.26 ^a	4.16 ^a	40.41 ^c
	4	29.54 ^{ab}	3.33 ^c	1.13 ^a	4.61 ^a	44.13 ^b
	14	28.85 ^{abc}	6.16 ^b	1.10 ^a	4.20 ^a	45.58 ^b
	20	31.50 ^a	6.62 ^{ab}	1.29 ^a	4.61 ^a	49.61 ^a
	26	26.78 ^{bc}	6.88 ^a	1.09 ^a	4.55 ^a	44.46 ^b



TPA, 总酚酸量;PHA, 对香豆酸;TFA, 反式阿魏酸;V, 香草醛;4HA, 4-羟基苯甲酸;SP, 可溶性蛋白;SOD, 超氧化歧化酶;MDA, 丙二醛;GOGAT, 谷氨酸合酶;SH, 株高;SBW, 茎基宽。

TPA, total phenolic acid; PHA, p-Hydroxycinnamic acid; TFA, trans-ferulic acid; V, vanillin; 4HA, 4-Hydroxybenzoic acid; SP, soluble protein; SOD, superoxide dismutase; MDA, malondialdehyde; GOGAT, glutamate synthase; SH, seedling height; SBW, stem base width.

图4 秸秆基质块(a)和基质土(b)释放的酚酸单体与水稻秧苗根系酶活、株高、茎基宽之间的相关性

Fig. 4 Correlation between released phenolic acid monomer and root enzyme activity, plant height and stem base width of rice seedlings of SMB (a) and CK (b)

和极显著正相关($P<0.05,0.01$),与MDA含量呈负相关($P=0.17$);对香豆酸释放量与水稻根系的GOGAT呈正相关($P=0.054$);而4-羟基苯甲酸与SP表现负相关($P=0.075$)。

2.6 秸秆基质块育秧对水稻产量及产量构成的影响

由表4可知,SMB的水稻结实率为94.60%,比CK低1.49%,但其千粒重为30.16 g,高出CK

4.50%;SMB有效穗数为 $330.05\times10^4/\text{hm}^2$,较CK高出 $6.60\times10^4/\text{hm}^2$,增幅为2.04%($P<0.05$);而穗粒数与CK差异不显著。SMB的水稻理论产量为 $11.36\text{ t}/\text{hm}^2$,比CK高4.70%;由于后期秧苗生长过程中各种因素的影响,SMB和CK的实际产量均低于其理论产量,但整体而言,SMB的产量仍比CK高5.07%。可见,秸秆基质块育秧有利于增加水稻的有效穗数和千粒重,进而提升水稻产量。

表 4 不同处理的秧苗移栽后产量构成要素

Table 4 Yield components of SMB seedlings after transplanting under different treatments

处理 Treatment	有效穗数/ ($\times 10^4/\text{hm}^2$) EPN	穗粒数 KNPS	结实率/% SR	千粒重/g TKW	理论产量/ (t/hm^2) TY	实际产量/ (t/hm^2) AY
CK	323.45 $\pm$ 9.67 ^{ab}	120.92 $\pm$ 15.98 ^a	96.09 $\pm$ 1.04 ^a	28.86 $\pm$ 0.91 ^b	10.85 $\pm$ 0.49 ^{ab}	9.87 $\pm$ 0.34 ^{ab}
SMB	330.05 $\pm$ 8.93 ^a	120.60 $\pm$ 16.11 ^a	94.60 $\pm$ 3.90 ^a	30.16 $\pm$ 0.66 ^a	11.36 $\pm$ 0.62 ^a	10.37 $\pm$ 0.63 ^a

3 讨 论

3.1 秸秆基质块对水稻根系形态及生长的影响

水稻秧苗素质对水稻产量起着重要的影响^[3,18]。Cui等^[22]研究表明稻秆中的酚酸化感物质通过淋溶、挥发、分解等途径向环境中释放次生代谢物质(化感物质),从而影响周围植株的生长和发育。已有研究表明秸秆基质块(SMB)是一种优良的水稻育秧基质^[2, 5-6, 23]。由于秸秆腐解程度较低,育苗过程中会释放较多的酚酸化感物质,对水稻秧苗的生长有一定的抑制作用^[1]。但王艳萍等^[24]研究结果表明,外源脱落酸诱导可促进水稻的根系形态建成,根系由“躲避”模式转为“侵入”模式,提高了水稻酚酸类物质的分泌释放。本研究发现,育苗前期,秸秆基质块(SMB)对秧苗株高的影响大于基质土(CK),株高低于CK,而对茎基宽的影响较小,后期略优于CK,采用SMB育秧有利于控制株高,增加茎基宽,最终表现为壮秧指数(SSI)显著增加,且SMB对水稻种子的发芽基本无毒害影响^[25-26]。此外,SMB水稻秧苗的根系活力、总根长、根表面积和根体积均显著高于CK,这与SMB显著增加水稻地下部鲜重、干重及壮秧指数的影响相一致(表1),采用SMB育秧可促进根系生长发育。Hierro等^[27]研究表明,酚酸化合物介导的根系分布模式通常侧重于化感作用,根分泌物中的功能性代谢产物发挥着重要的调节作用。本研究中,SMB释放的酚酸量呈增加趋势,共检测到15种酚酸单体(图3),这与谢东锋等^[28]研究结果一致。已有研究表明,试验涉及的22种常见酚酸类化合物的分子结构中多数包含苯环和活性羧基结构^[29],主要以对香豆酸、反式阿魏酸、香草醛和4-羟基苯甲酸为主^[29]。而SMB所释放的酚酸单体化合物含量与刘翀等^[21]研究结果不一致,这是因为SMB制备过程中添加一定量的纳米锰氧化物,能够降解主要酚酸化合物,显著降低SMB的自毒效应^[1,30]。每种酚酸单体化合物对水稻根系形态和生长发育的具体影响有待进一步探讨。

3.2 秸秆基质块对水稻生理指标的影响

杨舒贻等^[31]研究发现,抗氧化酶系统是植株遭受逆境胁迫的重要防御体系,秧苗的抗逆性和长势等可通过测定其生理指标包括抗氧化酶活性、可溶性蛋白和丙二醛等间接体现。廖莎等^[20]研究表明,施用适量的芸薹素内酯可以提高秧苗的生理活性,降低秧苗MDA含量;此外,Morales等^[32]研究发现对香豆酸具有抗灰霉菌的活性,可延缓分生孢子萌发和抑制菌丝生长;而本研究中,育苗前期SMB释放的有害物质相对较多(表3),根系MDA含量较高,说明对水稻根细胞的膜脂造成了一定程度的过氧化损伤^[33],而随着育苗时间延长,SMB秧苗根系逐渐适应于逆境胁迫的环境,膜脂过氧化减弱(图4)。使用SMB育苗过程中释放量最多的对香豆酸(37.61~42.91 $\mu\text{g}/\text{g}$)与MDA呈显著负相关(图4),可能是对香豆酸通过抑制产生自由基的酶,间接增强了SOD活性^[34-35],从而降低水稻根系MDA的含量,表明SMB育秧可有效防御或减轻氧自由基对细胞膜系统的伤害,进而抵抗逆境胁迫对水稻秧苗带来的不利影响^[32]。而即使对香豆酸与SOD活性也表现出负相关,但在育苗后期其SOD活性略高于CK,说明SMB育苗后期根系消除生物体产生有害物质的能力增强,降低了细胞的氧化应激,表现出较高的壮苗指数(表1),这可能与对香豆酸化合物具促生作用有关^[36]。此外,酚酸单体释放量第二位的反式阿魏酸与根系可溶性蛋白(SP)呈显著正相关,表明SMB可提高水稻秧苗根系的SP含量,改善根系细胞的保水能力,从而增加秧苗的鲜重,促进壮苗的形成,为后期提升水稻产量构成奠定基础。育苗期间,SMB释放的4-羟基苯甲酸的量显著低于CK,且其释放量与根系SP呈负相关。表明4-羟基苯甲酸含量在1.17~4.61 $\mu\text{g}/\text{g}$ 对提升根系SP含量可能具有促进作用。然而,具体作用机制仍需深入研究。

育苗前期,SMB可以显著增加根系中无机氮的

转化(图2),而后期由于其氮素养分供应量的缺乏导致GOGAT活性下降,对氮同化作用降低。SMB育苗中后期,水稻根系SP增加,从而使根系具有较高活力,可能是由于SMB秧苗对逆境环境的适应性反映,秧苗根系在氮源的吸收和利用上有所改善,进一步促进SMB植株根系合成SP。GOGAT参与氮同化的调控,可催化无机氮转化为稳定的有机氮^[37-38]。然而,育苗结束后,SMB秧苗根系SP的增加与GOGAT活性降低之间的关系及相互作用仍需进一步阐明。此外,CK中释放的4-羟基苯甲酸酚酸单体含量较高,是否是导致对照组根系活力低、根系形态差和壮秧指数低的主要原因尚需进一步试验明确。同时,在育秧过程中,SMB产生的反式阿魏酸含量处于“低促”阈值范围内^[1]。而本研究发现,反式阿魏酸与GOGAT活性之间呈显著负相关($P<0.05$)。因此,秸秆基质块中低含量反式阿魏酸对水稻生长发育影响的内在机制有待进一步解析。

4 结 论

采用秸秆基质块(SMB)育苗的水稻秧苗茎基宽高于基质土(CK),壮秧指数增加3.36%,根系活力、总根长、根表面积和根体积分别升高4.69%、51.93%、27.81%和7.51%,SMB育苗能够有效培育壮苗,促进水稻秧苗根系生长发育。SMB育苗前期,秧苗根系中MAD含量、SOD及GOGAT的活性均显著高于CK,育苗结束后,其秧苗根系中SOD活性和MAD含量分别降低35.33%和35.21%,而SP含量增幅达38.52%,说明SMB可提高水稻秧苗的抗性。整个育苗过程中,SMB释放的总酚酸量处于低浓度安全阈值。其中,对香豆酸可有效增强SOD活性,4-羟基苯甲酸和反式阿魏酸对提升SP含量均具有促进作用,且反式阿魏酸利于水稻秧苗株高和茎基宽的增加。采用SMB育秧能够显著提高有效穗数、千粒重及水稻产量。综上,水稻育秧中使用秸秆基质块(SMB)可提高水稻幼苗抗性及其产量构成,适用于规模化水稻育苗生产。

参考文献 References

- [1] 张晶, 曲萍, 赵奕然, 孙恩惠, 雍成, 曹云, 孙倩, 靳红梅, 黄红英. 秸秆基质块育秧过程中酚酸释放规律及自毒作用消减[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(3): 85-94

Zhang J, Qu P, Zhao Y R, Sun E H, Yong C, Cao Y, Sun Q, Jin H M,

- Huang H Y. Release mechanism of phenolic acids and autotoxicity reduction during the process of seedling raising with straw substrate block [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(3): 85-94 (in Chinese)
- [2] 凌宇飞, 许方甫, 卫平洋, 颜超, 魏海燕, 张洪程, 刘国栋. 水稻秸秆基质块无盘育秧对秧苗素质与栽插质量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 9-17
 - Ling Y F, Xu F F, Wei P Y, Yan C, Wei H Y, Zhang H C, Liu G D. Effects of rice straw matrix board on seedling quality and transplanting quality[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(1): 9-17 (in Chinese)
 - [3] 杜国明, 姜莹莹, 刘钊. 不同棚式育秧对寒地水稻产量及其构成要素的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(1): 48-55
 - Du G M, Jiang Y Y, Liu Z. Effects of different shed raising seedlings on rice yield and its components in cold area [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1): 48-55 (in Chinese)
 - [4] Chen Y Z, Cui B, Dou Y H, Fan H Y, Fang Y J, Wang L, Duan Z H. Characteristics of biofilms on polylactic acid microplastics and their inhibitory effects on the growth of rice seedlings: A comparative study of petroleum-based microplastics[J/OL]. *Journal of Hazardous Materials*, (2024-08-09). DOI: doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135469
 - [5] Fu B, Sun E H, Yong C, Chen L, Wei Z G, Huang H Y, Gao B, Qu P. Binderless board made from composted rice straw as substrate for rice seedlings[J]. *Bioresources*, 2022, 17(3): 5000-5010
 - [6] 孙恩惠, 黄红英, 曲萍, 雍成, 石祖梁, 李欣欣, 徐跃定. 一种水稻旱育秧用免秧盘秸秆可降解基质块. 中国, ZL202010000411.6[P]. 2021-06-18
 - Sun E H, Huang H Y, Qu P, Yong C, Shi Z L, Li X X, Xu Y D. A degradable straw substrate block for dry rice seedling raising without tray. China, ZL202010000411.6[P]. 2021-06-18 (in Chinese)
 - [7] 徐超. 木质纤维素对秸秆基质性能的影响及预处理调控机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023
 - Xu C. Effect of lignocellulose on the properties of straw matrix and its pretreatment regulation mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese)
 - [8] 杜益涵, 肖红娟, 沙春阳, 许方甫, 王秋君, 雍成, 陈玲, 曲萍, 黄红英, 魏海燕, 孙恩惠. 打印秸秆基质盘播种对水稻秧苗素质、栽插质量及产量的影响[J]. 中国稻米, 2023, 29(2): 81-84
 - Du Y H, Xiao H J, Sha C Y, Xu F F, Wang Q J, Yong C, Chen L, Qu P, Huang H Y, Wei H Y, Sun E H. Effects of printed seeding straw matrix blocks on population growth of rice seedlings and transplanting quality[J]. *China Rice*, 2023, 29(2): 81-84 (in Chinese)
 - [9] 余常兵, 胡威, 吕驰驰, 柯奇画, 李银水, 庞静. 添加水稻秸秆对油菜 (*Brassica napus* L.) 幼苗生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 253-261
 - Yu C B, Hu W, Lv C C, Ke Q H, Li Y S, Pang J. Allelopathic effect of rice straw on rape (*Brassica napus* L.) seedlings [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3): 253-261 (in Chinese)
 - [10] 李佳男, 杨长琴, 束红梅, 张国伟, 王晓婧, 刘瑞显, 陈嘉敏, 王飞兵, 陈新红. 小麦秸秆还田后茬棉田土壤 NO_3^- -N 和酚酸变化对棉苗根系生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(6): 868-876
 - Li J N, Yang C Q, Shu H M, Zhang G W, Wang X J, Liu R X, Chen J M, Wang F B, Chen X H. Effects of content dynamics of NO_3^- -N and phenolic acids in soil on root growth of cotton seedlings under the return of wheat straw [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(6): 868-876 (in Chinese)

- [11] 董淑琦, 席瑞泽, 高舒林, 胡春艳, 郭振宇, 宋喜娥, 赵娟, 李晓瑞, 王家刚, 任建宏, 马永清, 原向阳. 谷子秸秆浸提液及田间覆盖对4种杂草的化感作用研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 38-50
Dong S Q, Xi R Z, Gao S L, Hu C Y, Guo Z Y, Song X E, Zhao J, Li X R, Wang J G, Ren J H, Ma Y Q, Yuan X Y. Allelopathic effects of foxtail millet straw extracts and field mulching on four kinds of weeds[J]. *Chinese Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(9): 38-50 (in Chinese)
- [12] 张国伟, 杨长琴, 刘瑞显, 倪万潮. 对羟基苯甲酸和间苯三酚对棉花幼苗根系线粒体功能和根系生长的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 231-237
Zhang G W, Yang C Q, Liu R X, Ni W C. Effects of p-hydroxybenzoic acid and phloroglucinol on mitochondria function and root growth in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedling roots[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 231-237 (in Chinese)
- [13] 张国伟, 刘瑞显, 杨长琴, 杨富强. 棉花秸秆浸提液对小麦种子萌发及幼苗生长的化感效应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(4): 555-562
Zhang G W, Liu R X, Yang C Q, Yang F Q. Allelopathic effects of cotton straw extract on seed germination and seedling growth of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(4): 555-562 (in Chinese)
- [14] 刘瑞显, 张国伟, 杨长琴, 张雷, 倪万潮. 小麦秸秆浸提液和腐解液对棉花种子发芽及幼苗生长的化感效应[J]. 棉花学报, 2016, 28(4): 375-383
Liu R X, Zhang G W, Yang C Q, Zhang L, Ni W C. Allelopathic effects of wheat straw extract and decomposition liquid on cotton seed germination and seedling growth[J]. *Cotton Science*, 2016, 28(4): 375-383 (in Chinese)
- [15] 于建光, 吴一凡, 贺笑, 顾克军, 汪吉东, 张永春, 常志州. 不同条件育秧提高水稻秧苗抗逆性的研究[J]. 土壤, 2017, 49(2): 289-294
Yu J G, Wu Y F, He X, Gu K J, Wang J D, Zhang Y C, Chang Z Z. Study on different methods of rice seedling raising to improve its resistance[J]. *Soils*, 2017, 49(2): 289-294 (in Chinese)
- [16] 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 章秀福, 陈松, 褚光, 刘元辉. 水培条件下根际氧环境对水稻幼苗磷吸收的影响及其生理机制[J]. 中国农业科学, 2023, 56(2): 236-248
Xiao D S, Xu C M, Wang D Y, Zhang X F, Chen S, Chu G, Liu Y H. Effects of rhizosphere oxygen environment on phosphorus uptake of rice seedlings and its physiological mechanisms in hydroponic condition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(2): 236-248 (in Chinese)
- [17] 白志刚. 氮肥运筹对水稻氮代谢及稻田氮肥利用率的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019
Bai Z G. Effects of nitrogen application on nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency in rice field[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2019 (in Chinese)
- [18] 吕伟生, 黄国强, 邵正英, 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 魏赛金. 接种菌剂腐熟稻草育秧基质提高机插秧苗素质及产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 195-202
Lv W S, Huang G Q, Shao Z Y, Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, Wei S J. Straw substrate with decomposition agent improving seedling quality and yield of machine-transplanted rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(11): 195-202 (in Chinese)
- [19] 魏倩倩, 汪玉磊, 孔海民, 徐青山, 颜玉莲, 潘林, 迟春欣, 孔亚丽, 田文昊, 朱练峰, 曹小闯, 张均华, 朱春权. 信号分子硫化氢参与硫肥缓解铝对水稻生长抑制作用的机制[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(3): 290-302
Wei Q Q, Wang Y L, Kong H M, Xu Q S, Yan Y L, Pan L, Chi C X, Kong Y L, Tian W H, Zhu L F, Cao X C, Zhang J H, Zhu C Q. Mechanism of signal molecule hydrogen sulfide participating in sulfur fertilizer to alleviate in the inhibitory effect of aluminum on rice growth by sulfur fertilizer[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(3): 290-302 (in Chinese)
- [20] 廖莎, 谭雪明, 李木英, 胡凯, 潘晓华, 石庆华. 芸苔素内酯对稻草基质育秧水稻秧苗生理特性及栽后生长的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(2): 181-190
Liao S, Tan X M, Li M Y, Hu K, Pan X H, Shi Q H. Effects of brassinolide on physiological characteristics and growth of straw substrate-cultured rice seedlings after transplanting[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(2): 181-190 (in Chinese)
- [21] 刘舫, 张瑞婷, 刘本国, 郑学玲. 蒸汽爆破处理对麦麸的酚酸组成及其抗氧化活性的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 308-314
Liu C, Zhang R T, Liu B G, Zheng X L. Effect of steam explosion treatment on phenolic acid composition of wheat bran and its antioxidant capacity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 308-314 (in Chinese)
- [22] Cui S Q, Ma X B, Wang X H, Zhang T A, Hu J J, Tsang Y F, Gao M T. Phenolic acids derived from rice straw generate peroxides which reduce the viability of staphylococcus aureus cells in biofilm [J/OL]. *Industrial Crops and Products*, (2019-08-10). DOI: doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111561
- [23] 董小菁, 孙洪武, 张倩, 黄红英, 孙恩惠. 水稻秸秆育秧基质综合效益评价及市场应用前景分析[J]. 农村经济与科技, 2023, 34(21): 5-9
Dong X J, Sun H W, Zhang Q, Huang H Y, Sun E H. Comprehensive benefit evaluation and market application prospect analysis of rice straw seedling substrate[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2023, 34(21): 5-9 (in Chinese)
- [24] 王艳萍, 范宇浚, 马华燕, 胡锦弘, 崔祖铭, 李家玉. 外源脱落酸对水稻苗期根系形态建成及其诱导化感作用的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(1): 126-132
Wang Y P, Fan Y H, Ma H Y, Hu J H, Cui Z M, Li J Y. Effects of exogenous abscisic acid on root morphogenesis and induced allelopathy of rice at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2024, 30(1): 126-132 (in Chinese)
- [25] Meng X Y, Liu B, Zhang H, Wu J W, Yuan X F, Cui Z J. Co-composting of the biogas residues and spent mushroom substrate: Physicochemical properties and maturity assessment[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 276: 281-287
- [26] 顾元, 常志州, 于建光, 宗良纲. 外源酚酸对水稻种子和幼苗的化感效应[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(2): 240-246
Gu Y, Chang Z Z, Yu J G, Zong L G. Allelopathic effects of exogenous phenolic acids composted by wheat straw on seed germination and seedling growth of rice[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 29(2): 240-246 (in Chinese)
- [27] Hierro J L, Callaway R M. The ecological importance of allelopathy[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2021, 52: 25-45
- [28] 谢东锋, 张光灿, 夏宣宣, 郎莹. 不同浓度酚酸对欧美杨 1-107 苗木生长和光合特性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1789-1798
Xie D F, Zhang G C, Xia X X, Lang Y. Effects of phenolic acids on the growth and photosynthesis of *Populus × euramericana* 'Neva' [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1789-1798 (in Chinese)
- [29] 李敏, 闫兴富, 马丽, 马璐, 时榕. 酚酸类化感自毒物质对枸杞种子萌发的抑制作用[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2072-2079
Li M, Yan X F, Ma L, Ma L, Shi R. Allelopathic inhibition of phenolic acids on germination of wolfberry (*Lycium barbarum* Linn.) [J]. *Acta*

- Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 2072-2079(in Chinese)
- [30] Li J, Jiang M J, Su P, Lv Q X, An L Q, Zeng G, Hou X Y, Li W Q, Chen C Z, Ma J, Yang T. Generation of $\cdot\text{OH}$ and intermediate manganese species for the efficient removal of micropollutants via photocatalysis of permanganate by indium oxide [J/OL]. *Chemical Engineering Journal*, (2024-01-26). DOI: doi. org/10.1016/j.cej.2024.149084
- [31] 杨舒贻, 陈晓阳, 惠文凯, 任颖, 马玲. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2016, 45(5): 481-489
Yang S Y, Chen X Y, Hui W K, Ren Y, Ma L. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2016, 45(5): 481-489 (in Chinese)
- [32] Morales J, Mendoza L, Cotoras M. Alteration of oxidative phosphorylation as a possible mechanism of the antifungal action of p-coumaric acid against botrytis cinerea [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2017, 123(4): 969-976
- [33] 汪敦飞, 郑新宇, 肖清铁, 王微, 林瑞余. 铜绿假单胞菌对镉胁迫苗期水稻根系活力及叶片生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2767-2774
Wang D F, Zheng X Y, Xiao Q T, Wang W, Lin R Y. Effects of *Pseudomonas aeruginosa* on root activity and leaf physiological characteristics in rice (*Oryza sativa* L.) seedling under cadmium stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(8): 2767-2774 (in Chinese)
- [34] Chen B X, Peng Y X, Gao J D, Zhang Q, Liu Q J, Liu J. Coumarin-induced delay of rice seed germination is mediated by suppression of abscisic acid catabolism and reactive oxygen species production [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2019-07-19). DOI: 10.3389/fpls.2019.00828
- [35] Zhang G F, Yang Z, Zhou S, Zhu J J, Liu X Q, Luo J. Cellulose synthase-like *OsCSLD4*: A key regulator of agronomic traits, disease resistance, and metabolic indices in rice [J]. *Plant Cell Reports*, (2024-10-16). DOI: 10.1007/s00299-024-03356-y
- [36] 马修兵. 以水稻秸秆为原料的植物源杀菌剂-植物源生长调节剂-乙醇生产多联产工艺开发[D]. 上海: 上海大学, 2019
Ma X B. Development of polygeneration process of plant-derived bactericide-plant-derived growth regulator-ethanol production with rice straw as raw material [D]. Shanghai: Shanghai University, 2019 (in Chinese)
- [37] 张露, 陈书融, 吴龙龙, 黄晶, 田仓, 张均华, 曹小闯, 朱春权, 孔亚丽, 金千瑜, 朱练峰. 减施氮肥和增氧灌溉对水稻氮代谢关键酶活性及氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 81-90
Zhang L, Chen S R, Wu L L, Huang J, Tian C, Zhang J H, Cao X C, Zhu C Q, Kong Y L, Jin Q Y, Zhu L F. Effects of nitrogen fertilizer reduction and oxygen-enhancing irrigation on the key enzyme activities of nitrogen metabolism and nitrogen utilization in rice [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(9): 81-90 (in Chinese)
- [38] Han M, Okamoto M, Beatty P H, Rothstein S J, Good A G. The genetics of nitrogen use efficiency in crop plants [J]. *Annual Review of Genetics*, 2015, 49: 269-289

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 孙恩惠, 博士, 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所副研究员, 硕士生导师, 农业废弃物资源化利用创新团队首席助理, 企业导师, 江苏省产业教授, 江苏省秸秆综合利用专家库成员, 江苏省绿色包装标准化技术委员会植物纤维基绿色包装工作组成员, 江苏省新型胶黏剂工程技术研究中心特聘专家。长期从事农业废弃物资源化、绿色低碳化秸秆预处理技术、全生物降解农用材料开发及应用研究工作。主持国家青年基金、省重点研发、省自主创新、省农垦科技创新专项、院青年人才及院国际合作基金等共9项, 参与省部/国家级项目15项; 发表论文40余篇, 授权发明专利20件, 美国、欧洲、南非等国际专利4件; 制定江苏省地方标准2项、行业标准1件; 参编中文著作2部; 国家部委/省主推技术7项; 专利成果产业化转化3项; 中央秸秆综合利用重点县编制方案10余件; 获江苏农业科技奖(科技创新)一等奖1项, 江苏省农业科学院科技创新奖二等奖1项。



通讯作者简介: 黄红英, 硕士, 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所研究员, 硕士生导师, 江苏省现代农业产业技术体系水禽产业体系粪污处理创新团队岗位专家。长期从事规模畜禽养殖污染控制与农业废弃物资源化利用研究。主持承担国家科技重大专项课题、国家重点研发课题、江苏省重点研发、江苏省农业科技自主创新资金和江苏省现代产业体系项目等20余项。发表学术论文70余篇, 其中SCI/EI论文30余篇; 参编著作1部。获国家发明专利授权近50件, 实用新型专利授权10余件, 专利成果转化4件。获部省级主推技术10项, 制定相关地方标准6项。获神农中华农业科技奖一、二等奖各1项, 江苏省科技进步奖二、三等奖各1项, 江苏省农业技术推广三等奖1项, 南京市科技进步二等奖1项。