

枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对水稻稻米品质的影响

王金玲 潘越 李思宇 沈炘垭 刘立军

(扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 225009, 江苏扬州)

摘要 生物菌剂是一种新型肥料,能够促进植物根系的生长发育,对改善作物养分吸收和产量形成有重要影响,然而其对水稻稻米品质的影响仍不清楚。本研究以常规粳稻品种南粳9108和淮稻5号为试验材料,在大田栽培条件下研究施用枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*, BS)和哈茨木霉菌(*Trichoderma harzianum*, TH)2种生物菌剂处理对水稻稻米品质的影响。结果表明,与不施用生物菌剂处理(CK)相比,施用2种菌剂对稻米的加工品质影响不显著,但BS处理使南粳9108和淮稻5号的垩白粒率分别降低了5.5%~5.7%和6.3%~7.2%,垩白度略有降低,而TH处理则使垩白粒率分别显著降低了7.7%~12.0%和9.3%~11.1%,垩白度分别显著降低了10.3%~10.6%和12.4%~12.5%。在2年试验中,BS处理不同程度降低了2个水稻品种的食味值,TH处理不同程度增加了稻米食味值,其中在2022年达到显著水平。此外,施用菌剂后,2个品种稻米直链淀粉含量降低,胶稠度和蛋白质含量增加,米粉的峰值黏度和崩解值提高,消解值下降。综上,施用枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌菌剂有助于改善稻米的外观品质和营养品质,同时哈茨木霉菌还有助于改善稻米的食味值。

关键词 水稻;生物菌剂;稻米品质;RVA谱;蛋白质含量

水稻作为全球最重要的粮食作物之一,其品质直接关系到人类的饮食健康和生活质量^[1]。随着人们生活水平的不断提高,对稻米品质的要求也越来越高,不仅关注其外观和口感,更注重其营养成分和安全性^[2-3]。传统的水稻生产方式主要依赖化肥和农药的大量使用,虽然在一定程度上提高了产量,但也带来了诸多问题,如土壤板结^[4]、环境污染^[5]和稻米品质下降^[6]等。近年来,随着绿色农业和可持续发展理念的深入人心,人们开始寻求更加环保高效的水稻生产方法。

生物菌剂作为一种新型肥料^[7],通过其中功能微生物及其代谢产物的共同作用,能迅速分解土壤中有有机物质,提高作物对养分的吸收与利用效率^[8],并促进植物生长^[9]、提高农作物品质^[10]。胡淑娟^[11]研究表明,生物菌剂具有固氮、解钾和解磷等功能,能够快速促进植物根系微生物的繁殖和生长。枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)是一种植物根际促生细菌,其在土壤中定殖后,会产生大量的植物激素和有机酸^[12],刺激根系的生长^[13],改良土壤质量^[14],促进作物生理代谢^[15],形成良性的植物-土壤-微生物生态系统,从而有效提高作

物品质。研究表明,哈茨木霉菌(*Trichoderma harzianum*)能够调整土壤酸碱性,可促进植物残体腐化及纤维素降解^[16],也可促进土壤团粒结构形成、使土壤疏松透气,进而提高土壤的保水保肥能力^[17],直接或者间接促进植物生长、提高作物品质以及增强植物对矿质营养的吸收利用能力^[18]。微生物菌剂还能增加稻米中具有抗氧化活性的多酚类化合物,如酚酸和类黄酮^[19],可进一步提高稻米品质。

近年来,有关枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对水稻影响的研究^[20-21]多集中于其对水稻产量和稻田土壤改良方面,而其对稻米品质影响的研究相对较少。本研究以2个常规粳稻为试验材料,通过施用枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌2种生物菌剂,探讨生物菌剂对稻米品质的影响,为水稻优质栽培和生物菌剂的科学应用提供理论与实践依据。

1 材料与方

1.1 试验材料与试验地概况

试验于2022-2023年在扬州大学江苏省作物栽培生理重点实验室试验农场进行。选用江苏省

作者简介:王金玲,研究方向为水稻栽培生理, E-mail: 1248346692@qq.com

刘立军为通信作者,主要从事作物栽培生理和作物营养管理研究, E-mail: ljliu@yzu.edu.cn

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(23)1035];江苏高校优势学科建设工程(PAPD);扬州大学“高端人才支持计划”

收稿日期:2025-02-27;修回日期:2025-05-23;网络出版日期:2025-07-09

种植面积较广的 2 个常规粳稻品种（南粳 9108 和淮稻 5 号）为供试品种，每年 5 月 14–15 日播种，6 月 12–13 日移栽，株行距为 12 cm×30 cm，双本栽插。全生育期总施氮量为 270 kg/hm²，按基肥、分蘖肥和穗肥分别占比 50%、10%和 40%施用，化学氮与有机肥氮分别占比 70%和 30%。有机肥依据含氮率折算后以基肥形式一次性施入，基肥施氮量不足部分以化学氮肥补足。有机肥由河南莲花控股股份有限公司提供，氮、磷和钾含量分别为 5.35%、1.50%和 1.50%。化学氮肥为尿素（含氮 46.0%）。移栽前基施过磷酸钙（P₂O₅ 13.5%）300 kg/hm²，氯化钾（K₂O 62.5%）200 kg/hm²。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计，其中生物菌剂处理为主区，水稻品种为裂区。设置 3 个菌剂处理，分别为不施菌剂处理（CK）、施用枯草芽孢杆菌菌剂（BS，在 CK 处理中增施枯草芽孢杆菌菌剂）和施用哈茨木霉菌菌剂（TH，在 CK 处理中增施哈茨木霉菌菌剂）。枯草芽孢杆菌与哈茨木霉菌均为粉剂，由南京农业大学提供。枯草芽孢杆菌菌剂有效成分为枯草芽孢杆菌活芽孢（活菌数≥200 亿/g），哈茨木霉菌菌剂有效成分为哈茨木霉菌 T-22 株系（活菌数≥3 亿 CFU/g）。生物菌剂分 2 次等量施用，分别于施用基肥和穗肥时各施用 4.5 kg/hm²。每次施用时将菌剂对水制成悬浊液，均匀冲施于水层中，避免叶片和茎秆沾染菌剂。每个处理重复 3 次，小区面积 28 m²。

1.3 测定项目与方法

将风干后的稻谷储存 3 个月，待其理化特性稳定后，进行稻米品质的测定。在测定前，用 NP-4350 型风选机将所有处理样本统一等风量风选，以剔除空秕粒。

1.3.1 加工品质和外观品质 依据标准优质稻谷（GB/T 17891-2017）^[22]测定稻米的糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率和垩白度。

1.3.2 蒸煮食味品质 采用 FOSS-TECATOR Infratec™ 1241 近谷外谷物分析仪（Foss，丹麦）测定直链淀粉含量，依据《粮油检验 大米胶稠度的测定》（GB/T 22294-2008）^[23]测定胶稠度。按照如下步骤测定蒸煮品质：准确称取 30 g 精米，经过清洗至无明显浑浊状态后，按照米水比 1.00:1.33 在铝罐中加水浸泡 30 min。随后将浸泡

后的米放入电饭锅内煮 30 min，结束后焖 10 min。自然冷却 2 h 后，采用 STA1B 型米饭食味计（佐竹，日本）测定食味特性。以黑龙江粳稻为参考标准，对米饭硬度、黏度、平衡度和食味值等指标进行测定分析。

1.3.3 营养品质 采用 Infratec™ 1241 近谷外谷物分析仪测定蛋白质含量。

1.3.4 RVA 谱特征值 准确称取 3 g 经百目筛处理后的米粉，加入 25 g 超纯水，利用 Super3 型快速黏度分析仪（Newport Scientific，澳大利亚）测定热浆黏度、峰值黏度、消减值、崩解值、最终黏度和糊化温度等参数。使用 TWC 配套软件对数据进行分析。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理；用 SPSS 19.0 软件进行数据处理与统计分析；用 Origin 2024 绘图。

2 结果与分析

2.1 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米加工品质和外观品质的影响

与 CK 处理相比，BS 和 TH 处理均对南粳 9108 和淮稻 5 号稻米的糙米率、精米率和整精米率无显著影响（表 1），表明施用 BS 和 TH 2 种菌剂对稻米的加工品质不会产生明显影响。

与 CK 处理相比，在 2022–2023 年的试验中，BS 处理使 2 个品种的垩白粒率分别降低了 5.5%~5.7%和 6.3%~7.2%，垩白度有所降低，但未到达显著水平，而 TH 处理则使垩白粒率分别降低了 7.7%~12.0%和 9.3%~11.1%，垩白度分别降低了 10.3%~10.6%和 12.4%~12.5%，表明施用 BS 和 TH 菌剂均有助于改善稻米的外观品质。2 种菌剂处理间比较，TH 处理对稻米外观品质的改善作用要优于 BS 处理。

2.2 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米蒸煮食味品质的影响

与 CK 处理相比，施用菌剂后，南粳 9108 和淮稻 5 号的直链淀粉含量均不同程度降低，其中，2 年试验中施用 TH 菌剂均能够显著降低淮稻 5 号的直链淀粉含量，而 BS 处理使 2 个品种的直链淀粉含量均未达到显著水平。与 BS 处理相比，TH 处理使 2 个品种的直链淀粉含量不同程度降低

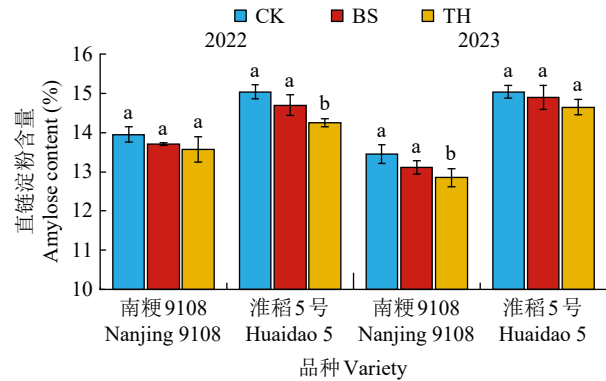
表 1 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米加工和外观品质的影响
Table 1 Effects of *B.subtilis* and *T.harzianum* on the processing and appearance quality of rice %

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	糙米率 Brown rice rate	精米率 Milled rice rate	整精米率 Head milled rice rate	垩白粒率 Chalkiness rate	垩白度 Chalkiness degree
2022	南粳 9108	CK	84.0±1.1a	73.4±1.2a	69.6±0.6a	9.0±0.1a	7.2±0.2a
		BS	83.8±0.1a	74.3±0.7a	69.8±1.9a	8.9±0.0b	7.0±0.1a
		TH	84.3±1.2a	75.1±0.6a	71.4±0.5a	8.3±0.1c	6.4±0.2b
	淮稻 5 号	CK	83.7±0.7a	73.1±0.7a	69.9±0.4a	9.0±0.1a	7.1±0.1a
		BS	84.4±0.7a	72.8±0.8a	69.1±1.3a	8.3±0.0b	6.9±0.3a
		TH	83.9±0.3a	73.4±0.2a	70.1±0.8a	8.2±0.2b	6.0±0.2b
2023	南粳 9108	CK	83.5±1.3a	74.3±0.4b	69.6±0.8b	9.2±0.1a	7.1±0.0a
		BS	84.8±0.5a	75.1±0.5a	70.0±0.8ab	8.7±0.1b	6.5±0.3b
		TH	84.9±0.7a	75.9±0.3a	71.0±0.4a	8.5±0.1c	6.3±0.1b
	淮稻 5 号	CK	84.4±0.9a	73.9±0.4a	70.2±0.3a	8.6±0.1a	6.7±0.3a
		BS	83.8±0.3a	72.5±1.2a	69.3±1.2a	8.0±0.0b	6.1±0.3b
		TH	85.0±1.1a	73.3±0.3a	69.9±0.1a	7.6±0.1c	5.9±0.2b

同一品种同列数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著，下同。

Different lowercase letters after the same variety and column data indicate significant difference at $P < 0.05$ level, the same below.

(图 1)。胶稠度(图 2)与直链淀粉含量呈相反趋势，在 BS 处理下，南粳 9108 和淮稻 5 号的胶稠度较 CK 处理分别提高了 5.5%~6.3%和 3.3%~5.1%；在 TH 处理下，2 个水稻品种胶稠度分别提高了 6.5%~9.4%和 6.0%~6.3%，表明施用 2 种菌剂



不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著，下同。
Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level, the same below.

图 1 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米直链淀粉的影响
Fig.1 Effects of *B.subtilis* and *T.harzianum* on amylose contents of rice

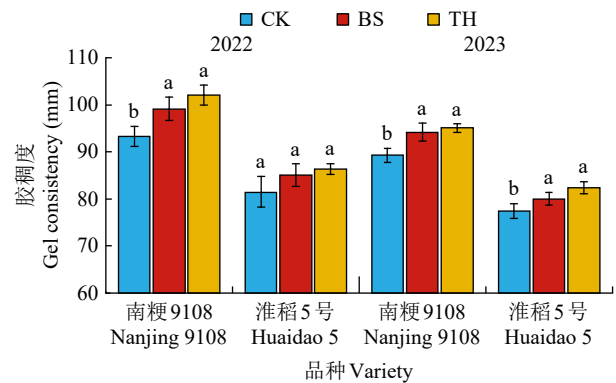


图 2 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米胶稠度的影响
Fig.2 Effects of *B.subtilis* and *T.harzianum* on gel consistency of rice

均有助于改善稻米的胶稠度。

由表 2 可知，与 CK 相比，2022~2023 年施用 BS 菌剂均改善了南粳 9108 和淮稻 5 号稻米的外观值，增幅达 10.2%~12.3%和 12.1%~25.8%，TH 处理外观值分别提高 6.8%~13.9%和 7.2%~29.0%。在施用菌剂后，各处理的黏度和平衡度上升，而硬度下降。在 2 年试验中，BS 处理不同程度降低了 2

表 2 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米蒸煮食味品质的影响
Table 2 Effect of *B.subtilis* and *T.harzianum* on flavor characteristics of rice

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	外观 Appearance	硬度 Hardness	黏度 Viscosity	平衡值 Balance degree	食味值 Taste value
2022	南粳 9108	CK	6.02±0.03c	6.95±0.24a	6.10±0.10c	6.09±0.18b	67.20±1.05b
		BS	6.76±0.13a	6.54±0.07b	6.59±0.04b	6.21±0.12b	63.00±2.33c
		TH	6.43±0.08b	6.66±0.09ab	7.46±0.13a	6.64±0.07a	70.70±1.87a
	淮稻 5 号	CK	5.25±0.10c	7.63±0.11a	5.17±0.09a	5.18±0.04b	60.90±1.24b
		BS	5.88±0.05a	7.37±0.02b	5.28±0.07a	5.47±0.08a	54.90±3.36c
		TH	5.62±0.17b	7.53±0.08a	5.31±0.10a	5.29±0.12b	64.30±1.88a

续表 2 Table 2 (continued)

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	外观 Appearance	硬度 Hardness	黏度 Viscosity	平衡值 Balance degree	食味值 Taste value
2023	南粳 9108	CK	5.71±0.04b	7.13±0.07a	4.67±0.24b	4.97±0.17c	62.10±3.21ab
		BS	6.29±0.21a	6.94±0.11b	5.38±0.06a	5.26±0.05b	61.10±0.38b
		TH	6.49±0.09a	6.62±0.18c	5.63±0.24a	5.60±0.17a	63.10±1.03a
	淮稻 5 号	CK	4.47±0.19b	7.60±0.13a	4.66±0.13b	4.41±0.18c	59.10±1.29ab
		BS	5.63±0.05a	7.36±0.13a	5.33±0.04a	5.04±0.09b	58.30±0.71b
		TH	5.77±0.02a	7.12±0.06b	5.43±0.06a	5.41±0.07a	60.90±1.73a

个水稻品种的食味值，而 TH 处理不同程度增加了稻米食味值，其中在 2022 年达到显著水平，表明施用 TH 菌剂对改善稻米食味值有一定促进作用，而施用 BS 菌剂可能会降低稻米的食味值。

2.3 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米蛋白质含量的影响

施用菌剂可以提高稻米中蛋白质含量，对改善稻米营养品质具有促进作用（图 3）。在 2 年试验中，淮稻 5 号在 BS 处理下的籽粒蛋白质含量与 CK 处理相比提高了 10.3%~10.4%，在 TH 处理下提高了 6.2%~8.8%，施用菌剂虽然可以提高南粳 9108 的籽粒蛋白质含量，但差异并不显著。与 BS 处理相比，南粳 9108 在 TH 处理下蛋白质含量增加，而淮稻 5 号在 TH 处理下则相反，2 年趋势一致。

2.4 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对米粉 RVA 谱特征值的影响

由表 3 可知，与 CK 处理相比，在 BS 菌剂处理下南粳 9108 和淮稻 5 号的崩解值分别提高了

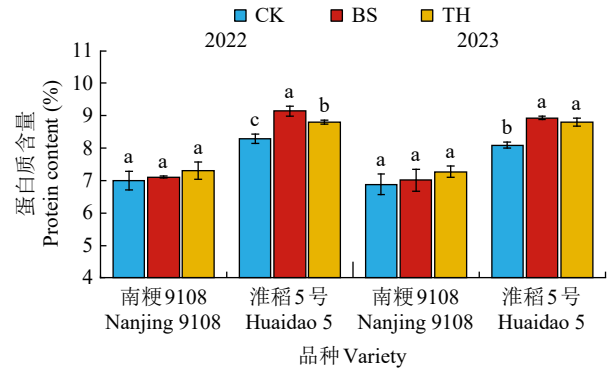


图 3 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米蛋白质含量的影响
Fig.3 Effects of *B.subtilis* and *T.harzianum* on protein content of rice

24.4%~42.0%和 5.6%~9.4%，在 TH 菌剂处理下分别提高了 27.3%~35.3%和 6.5%~11.5%。此外，南粳 9108 和淮稻 5 号在施用 BS 和 TH 菌剂时，其峰值黏度和热浆黏度显著提高，消解值不同程度降低，而对米粉糊化温度和峰值时间的影响较小。以上结果表明，施用 2 个菌剂有助于改善米粉的糊化特性，进而对稻米食味值具有一定的促进作用。

表 3 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对米粉 RVA 特征值的影响
Table 3 Effects of *B.subtilis* and *T.harzianum* on RVA eigenvalues of rice flour

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity (cP)	热浆黏度 Hot viscosity (cP)	崩解值 Breakdown value (cP)	最终黏度 Final viscosity (cP)	消解值 Setback value (cP)	峰值时间 Peak time (min)	糊化温度 Pasting temperature (°C)
2022	南粳 9108	CK	2166.0±32.2b	1655.0±20.1c	510.0±11.1c	2099.0±73.0b	-62.0±11.0a	6.5±0.2ab	74.9±0.3a
		BS	2433.0±34.0a	1760.0±25.7a	724.0±17.6a	2268.0±22.3a	-134.0±12.0c	6.4±0.1b	74.2±0.3a
		TH	2397.0±27.1a	1708.0±15.3b	690.0±10.5b	2290.0±31.7a	-110.0±9.0b	6.6±0.2a	74.4±0.6a
	淮稻 5 号	CK	2209.0±53.0c	1979.0±57.1c	234.0±10.5b	2715.0±52.7c	588.0±30.5a	6.9±0.1a	74.6±0.6a
		BS	2299.0±23.5b	2048.0±12.5b	256.0±10.0a	2829.0±14.1b	529.0±20.0b	6.8±0.1a	73.6±0.6a
		TH	2376.0±25.7a	2118.0±52.3a	261.0±11.0a	2876.0±27.0a	497.0±7.5c	6.9±0.1a	74.5±0.4a
2023	南粳 9108	CK	2185.0±80.8b	1531.0±33.7c	651.0±32.5b	2110.0±76.9b	-73.0±10.5a	6.6±0.0a	75.5±0.6a
		BS	2460.0±27.9a	1649.0±22.2b	810.0±8.5a	2236.0±40.6a	-216.0±34.6b	6.3±0.1b	75.3±0.1a
		TH	2486.0±71.6a	1698.0±18.8a	829.0±22.0a	2258.0±64.6a	-222.0±19.0b	6.6±0.1a	75.6±1.3a
	淮稻 5 号	CK	2308.0±54.2b	1859.0±18.0c	444.0±12.6b	2620.0±80.5a	312.0±29.5a	6.8±0.1b	73.8±0.3b
		BS	2372.0±58.5ab	1899.0±12.6b	469.0±11.9ab	2629.0±106.0a	260.0±10.5b	7.0±0.2ab	75.4±1.2a
		TH	2419.0±27.6a	1951.0±22.5a	473.0±5.8a	2662.0±35.7a	241.0±6.0c	7.0±0.1a	74.7±0.4ab

2 种类型菌剂处理间比较可以看出,BS 菌剂对南粳 9108 的 RVA 谱特征值影响更明显,而 TH 菌剂则对改善淮稻 5 号的 RVA 谱特征值效果更好。

3 讨论

3.1 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米加工及外观品质的影响

近年来,随着生活水平的提升,人们对稻米品质的要求日益严格,推动高产优质的稻米生产已成为必然趋势。稻米品质不仅受品种固有的差异和遗传特性制约,还受到生长环境、栽培管理以及施肥策略等外部因素的影响^[24-25]。研究^[26]表明,施用含有枯草芽孢杆菌的有机肥能够提高番茄果实的抗氧化活性和类胡萝卜素含量,进而改善番茄品质。哈茨木霉菌可以显著改善烟叶中的化学成分^[27];提升苹果的可溶性糖和维生素 C 含量,从而极大地改善苹果品质^[28]。本研究观察到,施用枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米的综合品质也有一定的改善作用。

Xiong 等^[29]研究中观察到,随着生物菌肥的施用,稻米的糙米率和整精米率有所提高。本试验中枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌菌剂处理较不施用菌剂相比,糙米率、精米率和整精米率无显著差异,这与上述研究^[29]结果有差异,其原因可能是灌浆期温度过高,水稻叶片的光合能力显著下降,光合产物的运输和卸载能力减弱,进而影响籽粒的充实度,导致施用菌剂后并没有对稻米加工品质产生明显的促进作用^[30]。高捷^[31]研究表明,与不施用菌剂相比,施用生物菌剂能够降低垩白度和垩白粒率,显著改善稻米的外观品质。本研究中施用枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌 2 种菌剂不同程度降低了 2 种稻米的垩白粒率和垩白度,改善了其稻米外观品质,与上述研究^[31]结果相似。另外,本研究发现,在稻米外观改善方面,枯草芽孢杆菌优于哈茨木霉菌这一结果可能与枯草芽孢杆菌的生物学特性有关^[32]。氧化胁迫会降低水稻籽粒的灌浆速率和灌浆持续时间,进而影响籽粒的充实度和籽粒发育^[33],导致垩白的形成,而枯草芽孢杆菌能够提高水稻的抗氧化能力、减少氧化胁迫、降低垩白度和垩白率^[34]。枯草芽孢杆菌通过调节植物体内脱落酸含量,促进水稻籽粒淀粉合成酶的活性,同时抑制部分水解酶的活性,提高籽粒对蔗糖的卸载和转化能力,从而

促进籽粒内淀粉合成与积累^[35],影响稻米籽粒中垩白的形成,这可能也是改善稻米外观品质的原因之一。

3.2 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米蒸煮食味品质的影响

研究^[13,18]表明,枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌都能够增强根系活力,提高光合效率,从而使更多的光合产物(蔗糖)转化为淀粉,使稻米中的直链淀粉含量增加。而在本研究中,施用枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌后,南粳 9108 和淮稻 5 号的直链淀粉含量降低,而胶稠度增加。本研究结果与上述研究结果相反,原因可能是在抽穗灌浆期的温度过高,导致稻米中的直链淀粉合成酶活性降低,从而降低直链淀粉比例。鲁杰等^[36]研究表明,施用生物菌肥可以改善稻米食味。本研究中,施用枯草芽孢杆菌虽然能够改善稻米的外观、黏度和平衡值,降低米饭硬度,但是与常规施肥相比,其食味值降低,这可能是由于枯草芽孢杆菌使籽粒中蛋白质含量增加,而食味值与蛋白质含量通常呈负相关,高蛋白会抑制淀粉的糊化,所以导致食味值降低。一般而言,口感上乘的稻米通常展现出较高的峰值黏度、热浆黏度和崩解值,而维持较低的消解值^[37]。本研究中经过枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌处理的稻米,其峰值黏度和崩解值与不施菌剂相比均有所提升,消解值则有所下降,这些变化均表明生物菌剂的施用对改善米粉的 RVA 谱特征值有一定的促进作用。

3.3 枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌对稻米营养品质的影响

黄涛等^[38]研究表明,施用生物菌剂可以提高水稻籽粒中的蛋白质含量,本试验中,施用枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌都可以增加稻米中的食味值,与上述结果相似。这 2 种生物菌剂可以增强光合产物向籽粒运输的能力,使胚乳中存有充足的蛋白质^[39]。枯草芽孢杆菌还可以分解土壤中的有机质,释放铵态氮等植物可以利用的氮源,激活水稻体内的氮代谢酶,促进氮素向籽粒的转运^[11]。同时,哈茨木霉菌可以促进根系的生长,扩大根系表面积,从而提高植株的吸氮能力,使蛋白质等在籽粒中的含量增加,稻米营养品质从而得到充分提升^[40]。一般认为,蛋白质含量越低,粳米的米饭食味值越高,蛋白质含量大于 8% 的品种往往米饭生硬且口感差,食味不佳;而蛋白质含量在 6%~7% 的稻米,

米饭硬度小且黏性强, 食味较好^[41]。本研究中, 南粳 9108 的蛋白质含量在 6.8%~7.3%, 尽管施用枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌不同程度提高了稻米蛋白质含量, 但优质食味水稻品种南粳 9108 的蛋白质含量在施用菌剂后仍未超过 8%, 依然保证了其良好的食味品质。究其原因可能是这 2 种菌剂可以通过增强水稻根系活力和吸收能力、优化土壤环境来促进稻米食味值和蛋白质含量的协同提升。未来有必要深入研究这 2 种生物菌剂影响稻米品质的生理机制以及二者组合施用对水稻高产优质的影响, 以为水稻优质栽培提供理论依据。

4 结论

与不施用菌剂相比, 施用枯草芽孢杆菌和哈茨木霉菌可以不同程度降低稻米的垩白粒率和垩白度, 提高籽粒中的蛋白质含量, 从而改善稻米的外观品质和营养品质。在蒸煮食味品质方面, 施用哈茨木霉菌会增加稻米的食味值, 而施用枯草芽孢杆菌会降低稻米的食味值。

参考文献

- [1] Alam M, Lou G, Abbas W, et al. Improving rice grain quality through ecotype breeding for enhancing food and nutritional security in Asia-Pacific region. *Rice*, 2024, 17(1): 1-21.
- [2] Wu J J, Jin L, Wang N, et al. Effects of combined application of chemical fertilizer and biochar on soil physio-biochemical properties and maize yield. *Agriculture*, 2023, 13: 1200.
- [3] 张洪程, 胡雅杰, 杨建昌, 等. 中国特色水稻栽培学发展与展望. *中国水稻科学*, 2021, 54(7): 1301-1321.
- [4] 朱利群, 王珏, 王春杰, 等. 有机肥和化肥配施技术农户采纳意愿影响因素分析——基于苏、浙、皖三省农户调查. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(3): 671-679.
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [6] 张卫信, 申智锋, 邵元虎, 等. 土壤生物与可持续农业研究进展. *生态学报*, 2020, 40(10): 3183-3206.
- [7] Deng Z H, Wang J W, Yan Y R, et al. Biochar-based *Bacillus subtilis* inoculants promote plant growth: Regulating microbial community to improve soil properties. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373(7): 1235-1241.
- [8] Wen Y F, Ma Y M, Wu Z N, et al. Enhancing rice ecological production: synergistic effects of wheat-straw decomposition and microbial agents on soil health and yield. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15(21): 812-820.
- [9] 宋琪, 周杨, 朱红惠, 等. 微生物肥料研究领域发展现状与趋势. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(3): 783-792.
- [10] Wu A L, Jiao X Y, Fan F F, et al. Effect of continuous sorghum cropping on the rhizosphere microbial community and the role of *Bacillus amyloliquefaciens* in altering the microbial composition. *Plant Growth Regulation*, 2019, 89(3): 299-308.
- [11] 胡淑娟. 微生物肥料的研究现状与发展趋势分析. *中国标准化*, 2018(22): 234-235.
- [12] Mahapatra S, Yadav R, Ramakrishna W. *Bacillus subtilis* impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde. *Journal of Applied Microbiology*, 2022, 132(5): 3543-3562.
- [13] 张娜, 朱艳, 肖娴, 等. 沼泽红假单胞菌与枯草芽孢杆菌混施对水稻根域细菌多样性与功能的影响. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(1): 58-71.
- [14] 徐洪宇, 孙兴权, 张强, 等. 枯草芽孢杆菌有机肥对土壤条件及烤烟产质量的影响. *湖南农业科学*, 2017(7): 55-58, 64.
- [15] Vanama S, Pesari M, Rajendran G, et al. Correlation of the effect of native bioagents on soil properties and their influence on stem rot disease of rice. *Sustainability*, 2023, 15: 11768.
- [16] Zhang Y, Yang J S, Luo L J, et al. Low-cost cellulase-hemicellulase mixture secreted by *Trichoderma harzianum* EM0925 with complete saccharification efficacy of lignocellulose. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(2): 371.
- [17] Li C M, Tan Y, Liu C Y, et al. A study on the changes in rice composition under reduced fertilization conditions using Raman spectroscopy technology. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 27030.
- [18] Thanwisai L, Siripornadulsil W, Siripornadulsil S. *Kosakonia oryziphila* NP19 bacterium acts as a plant growth promoter and biopesticide to suppress blast disease in KDML105 rice. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 17944.
- [19] 张靖洁. 微藻生物肥改善土壤肥力及根际菌群和提高小油菜产量品质效应的研究. 晋中: 山西农业大学, 2020.
- [20] Yang L Y, Zhou S Y D, Lin C S, et al. Effects of biofertilizer on soil microbial diversity and antibiotic resistance genes. *Science of the Total Environment*, 2022, 820: 153170.
- [21] 屈成, 刘芬, 傅爱斌, 等. 生物菌肥与化肥配施对水稻生长特性及产量的影响. *杂交水稻*, 2023, 38(4): 134-139.
- [22] 全国粮油标准化技术委员会. 优质稻谷: GB/T 17891-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 全国粮油标准化技术委员会. 粮油检验 大米胶稠度的测定: GB/T 22294-2008. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [24] 周婵婵, 陈海强, 王术, 等. 氮肥运筹和移栽密度对水稻产量和品质形成的影响. *中国稻米*, 2019, 25(5): 42-46.
- [25] Chen Y, Guo W, Ngo H H, et al. Ways to mitigate greenhouse gas production from rice cultivation. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 1752-1761.
- [26] 田慧敏, 郭成, 袁树先, 等. 微生物菌剂在番茄上的应用效果比较研究. *赤峰学院学报(自然科学版)*, 2021, 37(1): 25-28.
- [27] 汪坤, 魏跃伟, 姬小明, 等. 生物炭基肥与哈茨木霉菌剂配施对烤烟和植烟土壤质量的影响. *作物杂志*, 2021(3): 106-113.
- [28] 赵璐, 刘胜, 胡同乐, 等. 复合微生物菌剂对苹果再植病害的预防效果测定及拮抗菌株鉴定. *植物保护学报*, 2019, 46(1): 8.
- [29] Xiong W, Guo S, Jousset A, et al. Bio-fertilizer application induces soil suppressiveness against *Fusarium* wilt disease by reshaping the soil microbiome. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 114: 238-247.
- [30] 杨再强, 李伶俐, 殷剑敏, 等. 灌浆初期不同时长高温胁迫对早稻叶片光合和荧光参数的影响. *中国农业气象*, 2014, 35(1): 80-84.
- [31] 高捷. 有机肥、生物菌剂与化学氮肥配施对水稻产量和品质的影响及其机理. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [32] Chen Z J, Zhang P, Wang B, et al. Harnessing the role of rhizo-bacteria to mitigate salinity stress in rice (*Oryza sativa*);

- Focus on antioxidant defense system, photosynthesis response, and rhizosphere microbial diversity. *Rhizosphere*, 2025, 101043: 2452-2198.
- [33] 韦还和, 张翔, 朱旺, 等. 盐胁迫对水稻籽粒灌浆特性及产量形成的影响. *作物学报*, 2024, 50(3): 734-746.
- [34] 程新杰, 施伟, 张梦龙, 等. 水稻垩白形成机制的研究进展. *中国农学通报*, 2024, 40(2): 1-7.
- [35] 杨建昌, 王国忠, 王志琴, 等. 早种水稻灌浆特性与灌浆期籽粒中激素含量的变化. *作物学报*, 2002, 28(5): 615-621.
- [36] 鲁杰, 刘宝忠, 周传远, 等. 生物有机菌肥对水稻产量及稻米品质的影响. *中国农学通报*, 2009, 25(6): 146-150.
- [37] 陈梦云, 李晓峰, 程金秋, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味水稻产量及品质的影响. *作物学报*, 2017, 43(12): 1802-1816.
- [38] 黄涛, 吴良欢, 贾惠娟, 等. 应用酵素菌肥的有机和传统栽培稻米品质比较研究. *中国稻米*, 2009(5): 19-21.
- [39] 王鹏, 吴云艳. 生物菌肥对丹东地区水稻产量性状和品质的影响. *中国稻米*, 2019, 25(2): 86-88.
- [40] 尹丹, 朱忆雯, 胡敏, 等. 水稻根际微生物及其驱动的土壤碳氮磷循环. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(11): 2207-2220.
- [41] 周舟, 沈妍埏, 王俊, 等. 控释肥与普通尿素组合对水稻产量、氮肥利用率和米质的影响. *作物杂志*, 2024(4): 180-187.

The Effects of *Bacillus subtilis* and *Trichoderma harzianum* on Rice Grain Quality

Wang Jinling, Pan Yue, Li Siyu, Shen Xinya, Liu Lijun

(Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou University / Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Crop Production, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

Abstract Microbial agents are a novel type of fertilizer that can promote the growth and development of plant roots, and they have an important impact on improving nutrient absorption and yield formation in crops. However, their effects on rice grain quality remain unclear. This study used two conventional *japonica* rice varieties, Nanjing 9108 and Huaidao 5, as experimental materials to investigate the effects of two microbial agents of *Bacillus subtilis* (BS) and *Trichoderma harzianum* (TH) on rice grain quality under field cultivation conditions. The results showed that compared with the treatment without microbial agent (CK), the application of the BS and TH had no significant effect on the processing quality of rice. However, the BS treatment reduced the chalkiness rate by 5.5%-5.7% in Nanjing 9108 and 6.3%-7.2% in Huaidao 5, with a slightly decrease in chalkiness degree. The TH treatment significantly reduced the chalkiness rate by 7.7%-12.0% in Nanjing 9108 and 9.3%-11.1% in Huaidao 5, while the chalkiness degree decreased significantly by 10.3%-10.6% and 12.4%-12.5%, respectively. In a two-year experiment, the BS treatment decreased the taste value of two varieties to varying degrees, while the TH treatment increased it, reaching a significant level in 2022. Additionally, after microbial agent application, the amylose content of the rice decreased, while gel consistency and protein content increased. The peak viscosity and breakdown value of rice flour increased, whereas the setback value decreased. In conclusion, the application of *B. subtilis* and *T. harzianum* microbial agents contributed to improving the appearance and nutritional quality of rice. Furthermore, *T. harzianum* also enhanced the taste value of rice.

Key words Rice; Microbial agents; Rice grain quality; RVA profile; Protein content