



李洪亮, 孙玉友, 魏才强, 张艳茗, 曲金玲, 程杜娟, 解忠, 宋泽, 刘春光, 姜龙, 徐德海, 时新瑞. 天然火山石板熔岩台地土壤条件对水稻稻米品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10):172-186.

LI Hongliang, SUN Yuyou, WEI Caiqiang, ZHANG Yanming, QU Jinling, CHENG Dujuan, XIE Zhong, SONG Ze, LIU Chunguang, JIANG Long, XU Dehai, SHI Xinrui. Effects of the soil conditions of natural volcanic slate lava platform on rice grain quality[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10): 172-186.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.15

天然火山石板熔岩台地土壤条件对水稻稻米品质的影响

李洪亮¹ 孙玉友¹ 魏才强¹ 张艳茗² 曲金玲¹ 程杜娟¹ 解忠¹ 宋泽¹
刘春光¹ 姜龙¹ 徐德海¹ 时新瑞¹

(1. 黑龙江省农业科学院 牡丹江分院, 黑龙江 牡丹江 157041;

2. 武汉大学 生命科学学院/杂交水稻国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要 为揭示火山熔岩石板田土壤环境对提升寒地水稻稻米品质的机制,选取黑龙江省牡丹江响水火山玄武岩天然石板地水稻田(T_1)和临近5.2 km的非石板地水稻田(T_2),采集土壤样本测定理化性状和元素含量等指标,并测定水稻品种灌浆结实期叶片光合参数、植株各部位N、P、K养分吸收、籽粒碳氮代谢关键酶活性变化及稻米品质指标,分析各品质指标与性状的相关性。结果表明:1) T_1 土壤中有机质、有效硅及镁、铁、锌、硒等元素含量均显著高于 T_2 ($P < 0.05$)。2) 水稻各生育时期, T_1 水稻叶片的SPAD均显著高于 T_2 ($P < 0.05$),且植株鞘和叶、茎、穗各部位N、P、K养分的吸收和积累也显著高于 T_2 ($P < 0.05$)。3) 拔节-成熟期, T_1 水稻单穴干物质重显著低于 T_2 ($P < 0.05$),而单茎干物质重则显著高于 T_2 ($P < 0.05$)。4) T_1 籽粒中ADPG焦磷酸化酶和可溶性淀粉合成酶在灌浆后期仍能保持较高的活性,而谷氨酰胺合成酶在籽粒整个灌浆进程中酶活性均显著高于 T_2 ($P < 0.05$)。5) T_1 条件下稻米的17种氨基酸含量及Mg、Fe、Zn、Se等元素含量均显著高于 T_2 ($P < 0.05$); T_1 稻米的垩白米率、垩白度、粗蛋白含量均显著低于 T_2 ($P < 0.05$),整精米率和食味评分均显著高于 T_2 ($P < 0.05$); T_1 土壤可使水稻籽粒淀粉的峰值粘度升高,同时降低了籽粒淀粉的最低粘度、衰减值和回生值等淀粉RVA特征值。综上,火山熔岩石板田土壤环境可促使水稻植株光合能力及水稻单茎干物质积累量升高、促进植株对N、P、K养分及天然腐殖土中营养元素的吸收和积累、增加整个灌浆结实期或灌浆后期淀粉形成的关键酶代谢活性,进而改善稻米品质。

关键词 天然石板田; 光合物质生产; 碳氮代谢关键酶; 稻米品质

中图分类号 Q945.11; S511.2+2

文章编号 1007-4333(2024)10-0172-15

文献标志码 A

Effects of the soil conditions of natural volcanic slate lava platform on rice grain quality

LI Hongliang¹, SUN Yuyou¹, WEI Caiqiang¹, ZHANG Yanming², QU Jinling¹,
CHENG Dujuan¹, XIE Zhong¹, SONG Ze¹, LIU Chunguang¹, JIANG Long¹,
XU Dehai¹, SHI Xinrui¹

(1. Mudanjiang Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Mudanjiang 157041, China;

2. College of Life Sciences/National Key Laboratory of Hybrid Rice, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract In order to reveal the mechanism of the volcanic lava slate soil environment on improving rice quality in cold region, soil samples were collected from the natural volcanic lava paddy field (T_1) and

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 杂交水稻国家重点实验室(武汉大学)开放课题(KF202108); 黑龙江省自然科学基金省市联合引导项目(SS2023C003); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-102)

作者简介: 李洪亮(ORCID:0009-0001-6069-621X), 副研究员, 主要从事水稻遗传育种及栽培研究, E-mail: xplusr@163.com

ordinary rice field (T_2) adjacent to the Xiangshui's volcanic lava paddy field (5.2 km) in Mudanjiang City, Heilongjiang Province to determine their physical and chemical properties and soil element content. The photosynthetic parameters of leaves, N, P and K uptake, key enzyme activities of C and N metabolism at grain filling stage and rice quality indexes, and the correlation between various quality indicators and traits were investigated. The results showed that: The contents of organic matter, available silicon, magnesium, iron, zinc and selenium in T_1 soil were significantly higher than those in T_2 soil ($P < 0.05$). At various growth stages of rice, the SPAD of leaves in T_1 were significantly higher than those in T_2 ($P < 0.05$), and the absorption and accumulation of N, P, K in sheath, stem and panicle were also significantly higher ($P < 0.05$). From the jointing to maturity of rice, the dry matter weight per hole in T_1 was significantly lower than that in T_2 ($P < 0.05$), while the dry matter weight per stem was significantly higher ($P < 0.05$). The activities of ADPG phosphorylase and soluble starch synthase of T_1 grains were still higher in the late grain filling stage, and the activity of glutamine synthetase was significantly higher than that of T_2 during the whole grain filling period ($P < 0.05$). The contents of 17 amino acids, Mg, Fe, Zn and Se of rice under T_1 were significantly higher than those of T_2 ($P < 0.05$). The chalkiness rate, chalky degree and crude protein content of rice in T_1 were significantly lower than those of T_2 ($P < 0.05$), while head rice rate and taste score were significantly higher ($P < 0.05$). The peak viscosity of rice grain starch in T_1 was increased, while the minimum viscosity, attenuation and retrogradation value were decreased. To sum up, the soil environment of volcanic lava slate could increase the photosynthetic capacity of rice plant and dry matter accumulation per stem, promote the absorption and accumulation of N, P, K and nutrient elements in natural humus soil, and increase the metabolic activity of key enzymes for starch formation during the whole grain filling stage or late grain filling stage, and then improve the quality of rice.

Keywords natural volcanic lava paddy field; photosynthetic matter production; key enzymes of carbon and nitrogen metabolism; rice quality

水稻是我国主要粮食作物之一,全世界约一半以上人口以大米为主食^[1]。随着全球经济的不断发展和人们生活水平的提高,消费者对稻米品质的要求也越来越高^[2]。稻米品质优劣受产地环境影响较大,不同地域产出的稻米在品质上有较大差别,因此,探究优质水稻产区稻米品质的形成机理,对改善稻米品质具有重要意义。

响水石板大米产自黑龙江省宁安市渤海镇,是极具地方特色的优质农产品,其口感品质全国闻名^[3]。响水稻区是世界上唯一在石板田上种植水稻的地区,玄武岩“石板地”为火山爆发时火山岩浆流淌而形成,后经亿万年风化和腐殖沉积,形成了天然的黑色腐殖土层,灌溉水源为世界第二大高山堰塞湖-镜泊湖流出的地下泉水^[3]。响水大米具有悠久的种植历史,据《新唐上书·渤海传》记载,当时渤海国进贡给唐王朝的贡品之中,就有关于“卢城之稻”的描述,而“卢城之稻”指的就是响水大米。在1992年首届中国国际农业博览会上,响水大米获得“名牌产品”称号,并连续三届蝉联“中国农业博览会”金奖。目前,关于肥水管理和种植方式等对稻米品质的影响已有许多研究报道^[4-9],稻米品质的优

劣受氮素利用、种植密度等诸多因素的影响^[4-5]。Zhang等^[6]的研究表明,通过优化综合栽培管理可以提高籽粒产量和氮素利用效率,同时改善籽粒品质。李恩宇等^[7]的研究表明,不同种植模式下水稻叶片的SPAD、植株干物质积累和稻米品质等方面存在一定的差异。王颖姮等^[8]的研究通过分析氮肥施用对水稻光合特性、田间产量及其构成因素、稻米品质、香味等方面的影响发现,施用适量的氮肥可以提高水稻叶片的SPAD、净光合速率、叶片中蔗糖和淀粉的含量,并能够改善稻米品质及增加香味物质的积累量。姬景红等^[9]研究表明,施用氮肥使水稻增产的主要原因是其增加了水稻单位面积有效穗数和穗粒数,且同等施氮量条件下,控释尿素与普通尿素混合一次性施用较普通尿素分次施用可显著提高水稻的外观品质。目前,针对响水石板大米优良品质形成机理的深入研究尚未见报道。本研究在黑龙江省宁安市渤海镇上官地村天然火山玄武岩石板地水稻田和临近非石板地水稻田中采集土壤样本,测定土壤性质等指标,并比较不同水稻田中灌浆结实期水稻植株的光合参数、氮磷钾养分吸收和积累、籽粒碳氮代谢关键酶活性及稻米

品质等,分析各因素对稻米品质形成的影响及各因素与品质性状间的相关性,旨在揭示响水火山玄武岩天然石板地种植环境下优质稻米品质形成的机制,以为优质稻米的生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选用‘稻花香2号’(2009年黑龙江审定,定名为‘五优稻4号’)。该品种株型紧凑,剑叶直立,属晚熟品种,在适应区出苗至成熟生育日数在147 d左右,需 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 $2\ 800^{\circ}\text{C}$ 左右。由黑龙江省农业科学院生物技术研究所以供种。

1.2 试验地点

试验地点为黑龙江省宁安市渤海镇上官地村($44^{\circ}9'23''\text{N}$, $129^{\circ}8'34''\text{E}$;海拔256 m),以火山玄武岩天然石板地(T_1)和临近非石板地(T_2)为栽培土壤。天然玄武岩“石板地”为古代火山爆发时火山岩浆流淌而形成,后又有腐殖土沉积于玄武岩上,见图1。灌溉水源为镜泊湖流出的地下水。

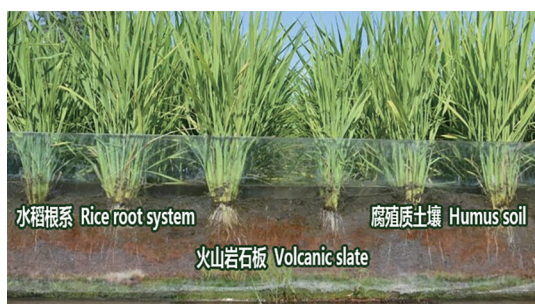


图1 响水天然玄武岩石板地水稻生长环境

Fig. 1 Rice growing environment in Xiangshui's natural volcanic lava paddy field

1.3 试验设计

以晚熟优质香型水稻品种‘稻花香2号’为供试品种,试验田块分别为天然火山玄武岩石板田(T_1)和临近非石板田(T_2)。氮磷钾肥用量:尿素 300 kg/hm^2 ,40%作基肥施用、60%作追肥施用,磷酸二铵 100 kg/hm^2 ,全部作基肥施用,硫酸钾 100 kg/hm^2 ,60%作基肥施用、40%作穗肥施用。试验分别于2021年4月15日播种、5月18日插秧和2022年4月18日播种、5月20日插秧,插秧规格为 $30\text{ cm}\times 14\text{ cm}$,20行区、30 m行长,3次重复,不同试验地点田块均采用当地最适的优质栽培技术及相关管理措施。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤理化性质和元素含量测定

采用电位法^[10]测定土壤pH,重铬酸钾容量法^[10]测定有机质含量,凯氏定氮法^[11]测定全氮含量,酸溶-钼锑抗比色法^[11]测定全磷含量,NaOH熔融法^[11]测定全钾含量;碱解氮含量测定采用碱解扩散法^[11],有效磷含量测定采用氟化铵-盐酸浸提钼锑抗比色法^[11],速效钾含量测定采用光焰光度法^[11]。采用微波消解法^[12]测定Cu、Fe、Zn、Se、Ca、Mg等元素含量。

1.4.2 水稻干物质重和叶片SPAD测定

每试验小区定点20穴调查分蘖动态,分别在水稻拔节期(J)、孕穗期(B)、抽穗期(H)、蜡熟期(W)和成熟期(M)记录茎蘖消长动态。于上述5个时期按照每小区茎蘖数的平均数取代表性植株10穴作为1个样本,分为叶、茎、鞘、穗几个部分(拔节期仅分为叶和茎鞘),于 105°C 下杀青30 min, 80°C 下烘干至恒重,测定各部分干物质重。分别在水稻齐穗后0(F_0)、10(F_1)、20(F_2)、30(F_3)、40(F_4)d和成熟期(M)利用日本柯尼卡美能达公司的SPAD-502 plus叶绿素仪连续测定10穴水稻倒1叶上部的SPAD,取其平均值作为测定值。

1.4.3 水稻籽粒碳、氮代谢关键酶活性测定

于水稻抽穗后10、15、20、25 d分别测定植株各部分的氮、磷、钾养分含量积累,并在每穗上选取灌浆基本一致的穗中部籽粒测定其酶活性,参照Nakamura等^[13]方法测定籽粒ADPG焦磷酸化酶、可溶性淀粉合成酶和淀粉分支酶活性,参照金正勋等^[14]方法测定谷氨酰胺合成酶活性。

1.4.4 水稻产量构成因素和稻米品质测定

成熟后每小区连续取样10穴,考查每穗粒数、结实率和千粒重等指标。成熟后每小区分别取样1.5 kg稻谷送至农业农村部谷物及制品质量监督检验测试中心(哈尔滨)进行稻米品质分析。

1.5 数据处理及分析

使用Microsoft Excel 2013进行数据处理,SPSS V22.0软件进行统计分析。2年试验结果总体趋势一致,主要以2022年的数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 天然石板田及非石板田土壤理化性状

由表1和表2可知,石板田(T_1)和非石板田(T_2)土壤在基本理化性状、有效硅含量及元素含量

表 1 不同土壤环境下土壤基本理化性状

Table 1 Soil physical and chemical properties in different soil environments										
土壤 类型 Soil type	pH	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (g/kg) Total P	全钾/ (g/kg) Total K	碱解氮/ (mg/kg) Alkali- hydrolyzable nitrogen	有效磷/ (mg/kg) Available P	速效钾/ (mg/kg) Available K	有机质/ (g/100g) Organic matter	有效硅/ (mg/kg) Effective silicon	
T ₁	5.82±0.11 Bb	2.83±0.16 Aa	1.44±0.08 Aa	22.90±0.51 Aa	343.15±6.3 6Aa	18.13±0.69 Aa	264.73±9.39 Aa	4.77±0.09 Aa	180.46±6.29 Aa	
T ₂	6.19±0.07 Aa	2.18±0.08 Bb	1.17±0.07 Bb	20.72±0.52 Bb	231.24±5.36 Bb	15.03±0.55 Bb	165.09±7.79 Bb	3.53±0.12 Bb	118.58±4.03 Bb	

注：T₁，石板田；T₂，非石板田。不同大小写字母分别表示在 1% 和 5% 水平上差异显著。下同。

Note: T₁, volcanic lava paddy field; T₂, ordinary rice field. Different uppercase and lowercase letters indicate significant differences at the 1% and 5% levels, respectively. The same below.

表 2 不同土壤环境下土壤部分元素含量

Table 2 The content of some elements in soil in different soil environments										
土壤 类型 Soil type	Na	Ca	Mg	Cu	Fe	Zn	Se			mg/kg
T ₁	375.31±10.24 Aa	1 595.48±23.66 Aa	2 786.66±44.28 Aa	58.01±1.12 Bb	712.69±6.53 Aa	128.79±2.88 Aa	0.33±0.03 Aa			
T ₂	251.52±11.34 Bb	1 457.93±26.83 Bb	2 357.22±31.59 Bb	76.99±1.05 Aa	407.69±5.07 Bb	109.59±3.02 Bb	0.23±0.02 Bb			

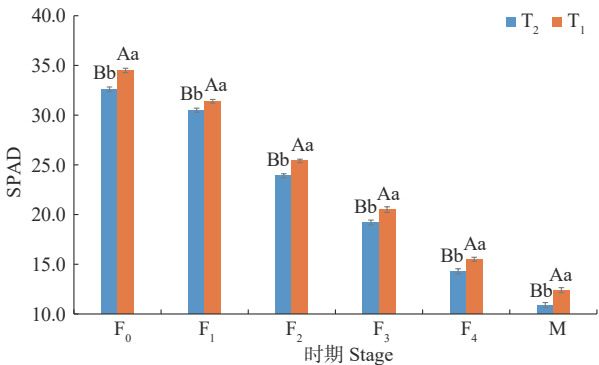
上均存在显著差异。 T_1 土壤中全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质和有效硅含量分别比 T_2 高出29.82%、23.08%、10.52%、48.40%、20.63%、60.35%、35.13%和52.18% ($P<0.05$); T_1 土壤中Na、Ca、Mg、Fe、Zn、Se元素含量比 T_2 分别高出49.22%、9.43%、18.22%、74.81%、17.52%、43.48%,而铜元素含量显著低于 T_2 ($P<0.05$)。

2.2 不同土壤环境对水稻灌浆结实期叶片SPAD的影响

由图2可知, T_1 和 T_2 土壤环境下,水稻齐穗期-成熟期叶片SPAD总体变化趋势表现一致,齐穗时叶片SPAD最高,随着水稻灌浆进程叶片SPAD逐渐下降,至成熟期叶片SPAD降至最低。同一生育进程, T_1 水稻叶片SPAD均表现显著高于 T_2 ($P<0.05$), T_1 的叶片SPAD在齐穗后0、10、20、30、40 d和成熟期分别比 T_2 高出5.8%、3.0%、6.3%、6.8%、8.4%和13.8%,可见, T_1 更有利于灌浆结实期水稻植株进行光合作用。

2.3 不同土壤环境对水稻植株氮磷钾养分含量积累的影响

由表3可知, T_1 和 T_2 的水稻植株各部位氮、磷、钾总含量变化趋势表现一致,N、P总含量随灌浆进程表现为下降趋势,而K的总含量表现为先升高后



$F_0 \sim F_4$ 为齐穗后0、10、20、30、40 d; M 为成熟期。
 $F_0 \sim F_4$ were 0, 10, 20, 30, 40 d after heading stage, respectively.
 M , maturity.

图2 不同土壤环境下水稻灌浆结实期叶片的SPAD
Fig. 2 SPAD of rice leaves at grain filling stage in different soil environments

降低趋势,峰值出现在抽穗后15 d。其中,鞘和叶部分N、P、K含量随灌浆进程均表现为降低趋势;茎的N、P含量随灌浆进程表现为降低趋势,K含量则表现为上升趋势;穗中N、P、K含量随灌浆进程表现为先升高后降低趋势,峰值均出现在抽穗后15 d。除 T_1 抽穗后25 d茎的N含量显著低于 T_2 ($P<0.05$),其他各时期 T_1 的植株各部分N、P、K含量均显著高于 T_2 ($P<0.05$),说明 T_1 植株各部位N、P、K养分的吸收和积累均优于 T_2 。

表3 不同土壤环境下抽穗后水稻植株各部分氮磷钾养分含量积累

Table 3 Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in different parts of rice plant after heading in different soil environments

土壤类型		抽穗后 10 d			抽穗后 15 d		
Soil type		10 d after heading			15 d after heading		
		N	P	K	N	P	K
T_1	鞘和叶 Sheath and leaves	1.706±0.075 Aa	0.496±0.011 Aa	1.726±0.069 Aa	1.562±0.010 Aa	0.411±0.014 Aa	1.635±0.010 Aa
	茎 Stem	0.671±0.014 Aa	0.457±0.005 Aa	1.512±0.005 Aa	0.474±0.015 Aa	0.361±0.005 Aa	1.789±0.016 Aa
	穗 Panicle	0.902±0.015 Aa	0.201±0.009 Aa	0.449±0.012 Aa	0.931±0.005 Aa	0.276±0.011 Aa	0.528±0.015 Aa
	合计 Total	3.279±0.144 Aa	1.154±0.022 Aa	3.687±0.022 Aa	2.968±0.016 Aa	1.048±0.067 Aa	3.952±0.014 Aa

表 3（续）							
土壤 类型 Soil type	部位 Parts	抽穗后 10 d 10 d after heading			抽穗后 15 d 15 d after heading		
		N	P	K	N	P	K
T ₂	鞘和叶 Sheath and leaves	1. 525±0. 103 Bb	0. 458±0. 021 Bb	1. 545±0. 019 Bb	1. 471±0. 038 Bb	0. 338±0. 019 Bb	1. 416±0. 010 Bb
	茎 Stem	0. 596±0. 018 Bb	0. 366±0. 009 Bb	1. 318±0. 029 Bb	0. 432±0. 020 Bb	0. 298±0. 018 Bb	1. 676±0. 069 Bb
	穗 Panicle	0. 784±0. 052 Bb	0. 170±0. 011 Bb	0. 382±0. 018 Bb	0. 845±0. 012 Bb	0. 190±0. 009 Bb	0. 435±0. 017 Bb
	合计 Total	2. 904±0. 052 Bb	0. 994±0. 019 Bb	3. 244±0. 052 Bb	2. 749±0. 052 Bb	0. 826±0. 005 Bb	3. 527±0. 016 Bb
土壤 类型 Soil type	部位 Parts	抽穗后 20 d 20 d after heading			抽穗后 25 d 25 d after heading		
		N	P	K	N	P	K
T ₁	鞘和叶 Sheath and leaves	1. 481±0. 115 Aa	0. 333±0. 013 Aa	1. 422±0. 099 Aa	1. 360±0. 015 Aa	0. 273±0. 019 Aa	1. 066±0. 103 Aa
	茎 Stem	0. 281±0. 009 Aa	0. 268±0. 012 Aa	1. 923±0. 028 Aa	0. 104±0. 005 Bb	0. 197±0. 007 Aa	2. 232±0. 010 Aa
	穗 Panicle	0. 917±0. 013 Aa	0. 205±0. 006 Aa	0. 461±0. 007 Aa	0. 883±0. 009 Aa	0. 150±0. 008 Aa	0. 409±0. 006 Aa
	合计 Total	2. 679±0. 077 Aa	0. 806±0. 010 Aa	3. 806±0. 148 Aa	2. 347±0. 051 Aa	0. 620±0. 010 Aa	3. 707±0. 033 Aa
T ₂	鞘和叶 Sheath and leaves	1. 398±0. 007 Bb	0. 299±0. 011 Bb	1. 315±0. 008 Bb	1. 223±0. 009 Bb	0. 243±0. 008 Bb	0. 897±0. 008 Bb
	茎 Stem	0. 241±0. 007 Bb	0. 216±0. 005 Bb	1. 746±0. 013 Bb	0. 185±0. 004 Aa	0. 161±0. 007 Bb	2. 006±0. 120 Bb
	穗 Panicle	0. 764±0. 014 Bb	0. 163±0. 011 Bb	0. 379±0. 009 Bb	0. 722±0. 004 Bb	0. 137±0. 010 Bb	0. 342±0. 010 Bb
	合计 Total	2. 403±0. 065 Bb	0. 678±0. 022 Bb	3. 440±0. 028 Bb	2. 130±0. 062 Bb	0. 541±0. 018 Bb	3. 245±0. 011 Bb

2.4 不同土壤环境对水稻地上部干物质积累及产量的影响

由图 3 可知,在拔节期-成熟期整个生育进程

中,除在孕穗期 T₁的水稻穗的干物质积累略高于 T₂外,其余各生育时期 T₁的叶、茎、鞘和穗的干物质重均低于 T₂。2 种土壤田块的水稻从拔节期-抽穗期

水稻叶、茎、穗的干物质重均随生育进程持续增加,鞘的干物质重则呈先增加随后略有下降;抽穗期-成熟期水稻叶和鞘的干物质重随生育进程推进均表现为持续下降、穗的干物质重逐渐增加,而茎的干物质重表现为先下降后增加。从单穴和单茎干物

质重变化看,在拔节期-成熟期的进程中 T_1 的单穴干物质重显著低于 T_2 ($P < 0.05$),而单茎干物质重则显著高于 T_2 ($P < 0.05$)。从源、库角度分析,石板田(T_1)条件下单茎物质积累能力变强更有利于单茎穗粒的灌浆结实,进而促进稻米品质的提升。

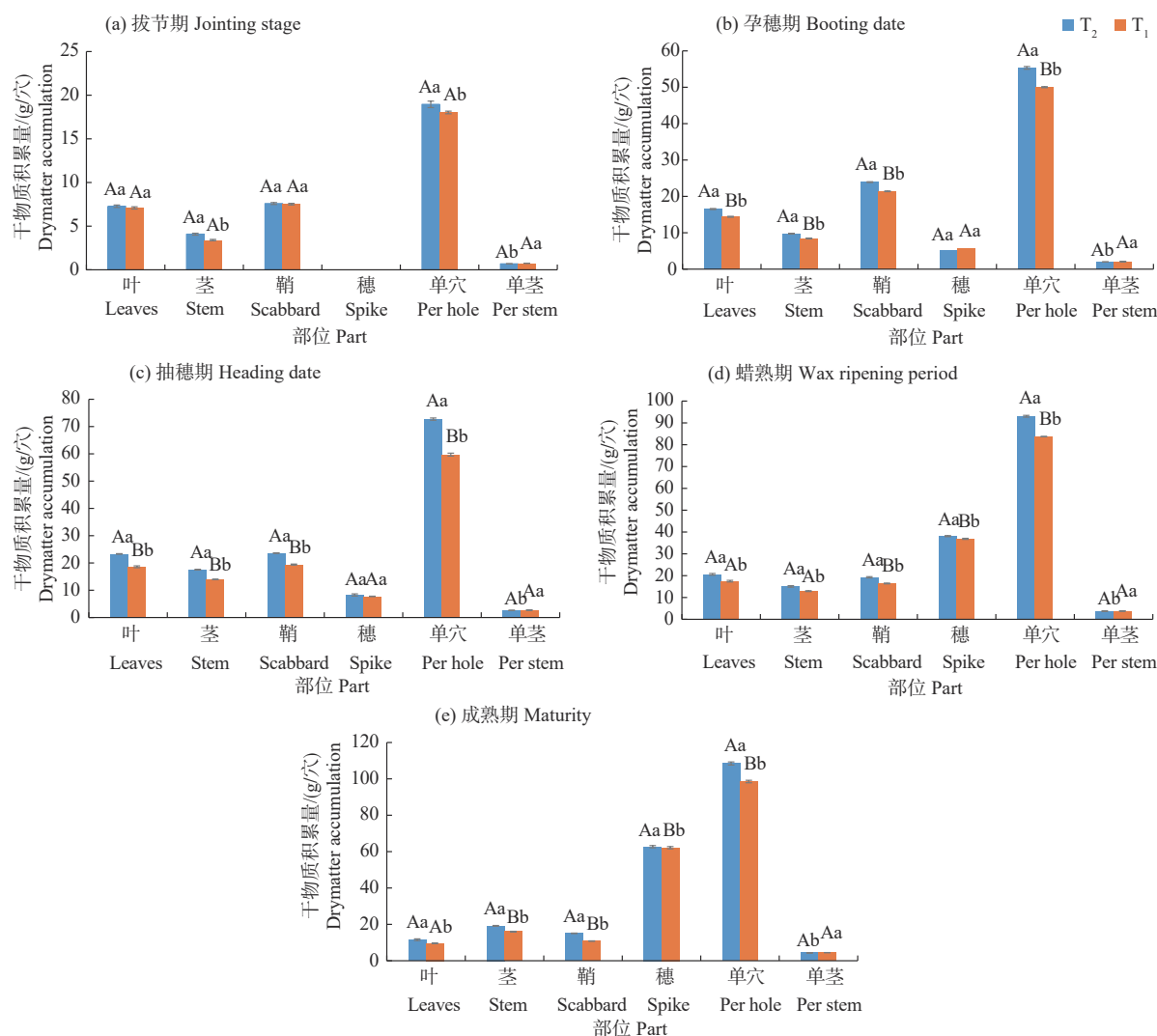


图3 不同土壤环境下水稻地上部每穴植株干物质积累

Fig. 3 Dry matter accumulation of aboveground plants in each hole in different soil environments

由表4可知,不同土壤环境下水稻产量构成因素间存在显著差异,其中 T_1 的水稻的单位面积有效穗数显著低于 T_2 ($P < 0.05$),而每穗粒数、结实率和千粒重三者均显著高于 T_2 ($P < 0.05$)。有效穗数是寒地粳稻产量高低的决定性因素,虽然 T_1 的水稻每穗粒数、结实率和千粒重三者均高于 T_2 ,但由于其有效穗数过低,致使产量低于 T_2 。

2.5 不同土壤环境对灌浆过程中籽粒碳、氮代谢关键酶活性的影响

由图4可知,不同土壤环境下,ADPG 焦磷酸化酶和可溶性淀粉合成酶随着水稻籽粒灌浆进程酶活性呈先升高后降低的趋势,即在抽穗后15 d达到峰值后逐渐下降,且 T_1 在抽穗后10和15 d籽粒ADPG 焦磷酸化酶和可溶性淀粉合成酶的酶活性均显著低于 T_2 ($P < 0.05$),而在抽穗

表 4 不同土壤环境下水稻产量构成因素间的差异

Table 4 Differences in yield components of rice in different soil environments

土壤类型 Soil type	单位面积穗数/(个/m ²) No. of panicles per unit area	每穗粒数 No. of spikelets per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g 1 000-grain weight	理论产量/(kg/hm ²) Theoretical yield
T ₁	354.4±1.48 Bb	111.3±0.82 Aa	91.2±0.49 Aa	27.3±0.05 Aa	9 809.0±36.87 Bb
T ₂	386.1±1.93 Aa	107.6±0.78 Bb	89.5±0.82 Bb	26.7±0.08 Bb	9 927.4±28.24 Aa

后 20 和 25 d 籽粒 ADPG 焦磷酸化酶的酶活性显著高于 T₂ ($P<0.05$), 可溶性淀粉合成酶的酶活性与 T₂ 差异不显著, 说明石板田 (T₁) 条件下 ADPG 焦磷酸化酶和可溶性淀粉合成酶在籽粒灌浆后期仍能保持较高酶活性。不同土壤环境

下, 淀粉分支酶在籽粒灌浆进程中酶活性变化趋势与 ADPG 焦磷酸化酶完全一致, 而 T₁ 的谷氨酰胺合成酶在籽粒整个灌浆进程中酶活性均显著高于 T₂ ($P<0.05$), 且酶活性的峰值出现在抽穗后 20 d。

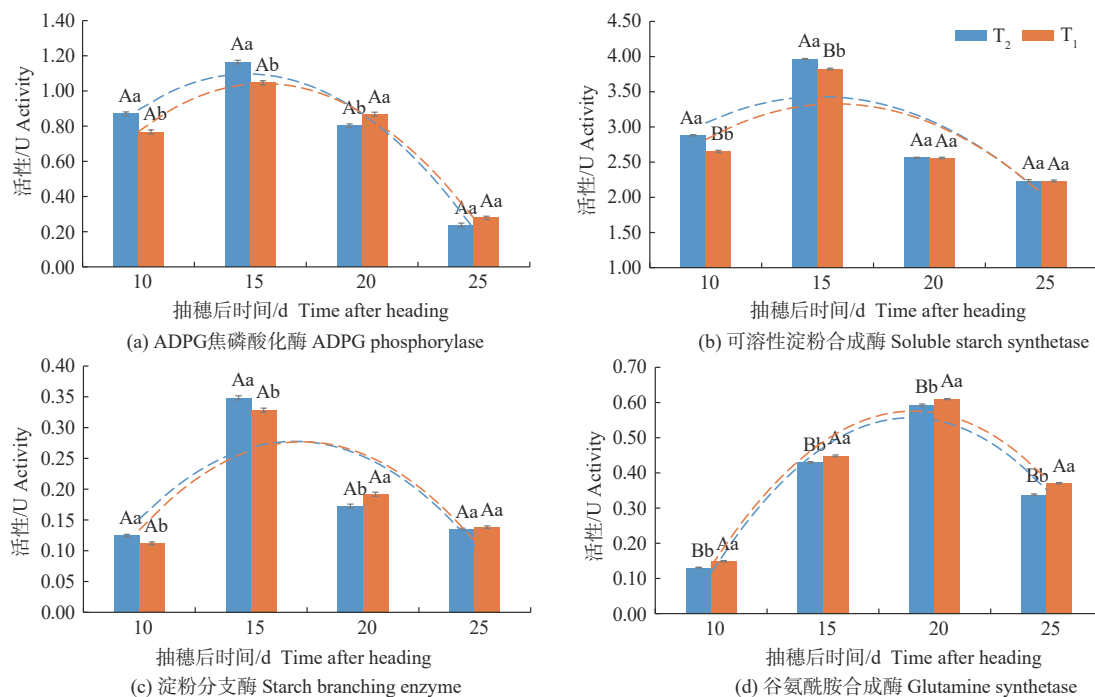


图 4 不同土壤环境下水稻籽粒碳、氮代谢关键酶活性

Fig. 4 Activities of key enzymes involved in carbon and nitrogen metabolism in rice grains in different soil environments

2.6 不同土壤环境对稻米主要品质性状及淀粉 RVA 特征谱的影响

由表 5 可知, 不同土壤环境下, T₁ 稻米在出糙率、直链淀粉含量、脂肪含量、胶稠度指标上与 T₂ 相比表现为差异不显著, 在整精米率和食味评分指标上显著高于 T₂ ($P<0.05$), 在垩白米率、垩白度、粗蛋白含量指标上显著低于 T₂ ($P<0.05$)。因此, T₁ 稻米总体上表现出优良食味、高出米率和优良外观。

由图 5 可知, T₁ 的稻米 17 种氨基酸含量均显著

高于 T₂ ($P<0.05$), 其中包含苯丙氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸和赖氨酸 6 种人体必需氨基酸, 6 种氨基酸含量分别高出 T₂ 13.89%、22.22%、21.05%、26.83%、20.93% 和 17.65%, 总氨基酸含量比 T₂ 高出 24.24%。

由表 6 可知, 不同土壤环境下, T₁ 的稻米中 K、Ca、Na、Mg、Fe、Zn、Se 含量分别比 T₂ 高出 12.6%、1.8%、54.3%、21.0%、300.0%、10.3%、70.0% ($P<0.05$)。尤其以 Fe 和 Se 含量比 T₂ 高出幅度较

表5 不同土壤环境下稻米主要品质性状

Table 5 Main quality characters of rice in different soil environments

土壤类型 Soil type	出糙率/% Brown rice rate	整精米率/% Head rice rate	垩白米率/% Chalky rate	垩白度/% Chalkiness degree	直链淀粉含量/ (g/100 g) Amylose content
T ₁	83.9±0.497 Aa	64.4±0.170 Aa	18.8±0.510 Bb	2.7±0.125 Bb	19.59±0.254 Aa
T ₂	83.1±0.125 Aa	59.2±0.082 Bb	24.8±0.579 Aa	5.1±0.141 Aa	19.95±0.048 Aa

土壤类型 Soil type	粗蛋白含量/(g/100 g) Crude protein content	脂肪含量/(g/100 g) Fat content	胶稠度/mm Gel consistency	食味评价 Rice taste value
T ₁	6.33±0.022 Ab	0.2±0.047 Aa	74±0.471 Aa	84±0.943 Aa
T ₂	6.52±0.024 Aa	0.3±0.047 Aa	72±0.471 Aa	82±0.816 Ab

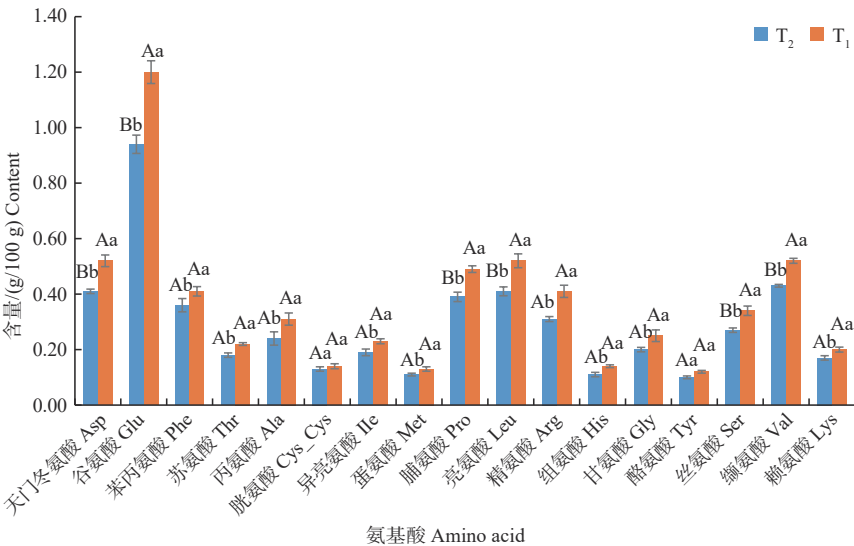


图5 不同土壤环境下稻米的氨基酸含量

Fig. 5 Amino acid content of rice in different soil environments

大,而铜元素含量则显著低于T₂(*P*<0.05)。

由表7可知,不同土壤环境下,稻米籽粒淀粉RVA特征值存在一定差异,T₁的稻米籽粒淀粉的糊化温度、最低粘度、最终粘度、衰减值、回生值显著低于T₂(*P*<0.05),而峰值粘度显著高于T₂(*P*<0.05)。T₁土壤可使籽粒淀粉的峰值粘度升高,即

表6 不同土壤环境下稻米元素含量

Table 6 Element content of rice in different soil environments

土壤类型 Soil type	K/(mg/100 g)	Ca/(mg/kg)	Na/(mg/100 g)	Mg/(mg/kg)
T ₁	68.6±0.785 Aa	79.2±0.898 Aa	1.99±0.043 Aa	106.0±1.320 Aa
T ₂	60.9±1.452 Ab	77.8±0.939 Bb	1.29±0.029 Bb	87.6±0.858 Bb

土壤类型 Soil type	Cu/(mg/kg)	Fe/(mg/kg)	Zn/(mg/kg)	Se/(mg/kg)
T ₁	1.2±0.082 Bb	1.2±0.047 Aa	12.9±0.492 Aa	0.017±0.001 Aa
T ₂	1.7±0.047 Aa	0.3±0.082 Bb	11.7±0.205 Ab	0.010±0.001 Bb

提高了淀粉的膨胀能力,同时降低了最低粘度、衰减
减值、回生值等指标,进而使蒸煮出的米饭软而粘,
有弹性,适口性好,冷饭也很柔软。综上,T₁土壤环
境通过提高稻米籽粒淀粉的峰值粘度,降低籽粒淀
粉的最低粘度、衰减减值、回升值等,进而提升了石板
田稻米的蒸煮食味品质。

表 7 不同土壤环境下稻米籽粒淀粉 RVA 特征谱
Table 7 RVA profile of rice grain starch in different soil environments

土壤类型 Soil type	糊化温度/℃ Gelatinization temperature	峰值粘度/(Pa·s) Peak viscosity	峰值时间/min Peak time	最低粘度/(Pa·s) Minimum viscosity
T ₁	86.3±0.125 Ab	2.368±0.006 Aa	6.2±0.047 Aa	1.460±0.003 Ab
T ₂	87.2±0.094 Aa	2.234±0.007 Bb	6.2±0.047 Aa	1.488±0.005 Aa

土壤类型 Soil type	最终粘度/(Pa·s) Final viscosity	衰减减值/(Pa·s) Attenuation	回生值/(Pa·s) Retrogradation value
T ₁	2.105±0.013 Bb	0.618±0.003 Bb	0.755±0.009 Bb
T ₂	0.774±0.012 Aa	0.774±0.012 Aa	0.880±0.005 Aa

2.7 水稻植株 N、P、K 养分吸收和物质积累及籽粒
碳、氮代谢关键酶活性变化与稻米品质的相
关性

由表 8 可知,水稻抽穗后期 N、P、K 养分吸收与
直链淀粉含量相关性均不显著,K 的养分吸收与出
糙率相关性不显著,N 养分吸收与食味评价相关性
不显著,除此之外,植株抽穗后期 N、P、K 养分吸收
与其他稻米品质性状均呈显著或极显著的正相关
或负相关($P<0.05$)。成熟期单穴干物重除与出糙
率、直链淀粉含量相关性不显著外,与其他稻米品
质性状均呈显著或极显著的正相关或负相关($P<$
 0.05)。成熟期单茎干物重与直链淀粉含量、胶稠
度、食味评价相关性不显著,而与其他稻米品质
性状均呈显著或极显著的正相关或负相关($P<0.05$)。

由表 9 可知,籽粒中 ADPG 焦磷酸化酶活性与
出糙率相关性不显著,且在抽穗后 15 d(灌浆前期)
与直链淀粉含量相关性不显著,在抽穗后 25 d(灌浆
后期)与食味评价相关性不显著,与其他稻米品质
性状均呈显著或极显著的正相关或负相关($P<0.05$, $P<0.01$)。可溶性淀粉合成酶在灌浆前
期除与出糙率相关性不显著外,与其他稻米品质性
状均呈显著或极显著的正相关或负相关,而在灌浆
后期则与所有稻米品质性状的相关性均不显著。
淀粉分支酶在灌浆前期与出糙率、直链淀粉含量、
胶稠度、食味评价相关性不显著,而与其他稻米品

质性状均呈显著或极显著的正相关或负相关,在灌
浆后期仅与直链淀粉含量、胶稠度、最终粘度呈显
著或极显著的正相关或负相关。谷氨酰胺合成酶
除与出糙率、直链淀粉含量(抽穗后 25 d)相关性不
显著外,与其他稻米品质性状均呈显著或极显著的
正相关或负相关。综上,水稻植株对 N、P、K 养分
的吸收、物质积累及籽粒碳氮代谢关键酶活性变化
与稻米品质性状关系密切,决定了稻米品质的优劣。

3 讨 论

水稻光合生产是产量的基础和保障,叶片
SPAD 在一定程度上是反映群体光合生产能力的一
项重要指标^[15-16]。本研究结果表明,同一生育进程,
石板田(T₁)的水稻叶片 SPAD 均显著高于非石板
田(T₂)($P<0.05$),说明与 T₂相比,T₁种植条件下
更有利于灌浆结实期水稻植株进行光合作用,且植
株鞘和叶、茎、穗各部位 N、P、K 养分的吸收和积
累也表现为优于 T₂。朱莉等^[17]、王勋等^[18]和童平等^[19]
研究均指出生态环境对水稻干物质积累量具有显
著影响。邓飞等^[20]研究证明,生态条件和秧龄等栽
培措施的改变均能导致水稻产量的差异,而水稻产
量是植株干物质积累、分配、运输与转化的结果。
杨惠杰等^[21]、马均等^[22]和敖和军等^[23]研究均认为抽
穗至成熟阶段干物质的积累量与水稻产量密切相
关。邹应斌等^[24]研究指出水稻高产的前提取决于
不同生长阶段的干物质积累比例是否协调。本研

表8 水稻植株N、P、K养分吸收和干物质积累与稻米品质的相关性分析

Table 8 Correlation analysis of N, P, K uptake and dry matter accumulation in rice plants with rice quality

指标 Index	抽穗后期 Late heading stage			成熟期 Maturity	
	N	P	K	单穴干物重 Dry weight per hole	单茎干物重 Dry weight per stem
出糙率 Brown rice rate	0.86*	0.76*	0.66	-0.64	0.88**
整精米率 Head rice rate	0.88**	0.94**	0.99**	-0.99**	0.91**
垩白米率 Chalky rate	-0.82*	-0.92**	-0.99**	1.00**	-0.82*
垩白度 Chalkiness degree	-0.91**	-0.94**	-0.98**	0.98**	-0.90**
直链淀粉含量 Amylose content	-0.71	-0.70	-0.68	0.73	-0.56
粗蛋白 Crude protein content	-0.81*	-0.96**	-0.96**	0.97**	-0.86*
胶稠度 Gel consistency	0.79*	0.95**	0.88**	-0.92**	0.74
食味评价 Rice taste value	0.45	0.80*	0.85*	-0.87*	0.49
氨基酸总量 Total amount of amino acids	0.80*	0.90**	0.95**	-0.91**	0.91**
糊化温度 Gelatinization temperature	-0.86*	-0.87*	-0.98**	0.96**	-0.88**
峰值粘度 Peak viscosity	0.86*	0.94**	0.99**	-0.98**	0.90**
最低粘度 Minimum viscosity	-0.94**	-0.87*	-0.93**	0.94**	-0.91**
最终粘度 Final viscosity	-0.92**	-0.89**	-0.93**	0.95**	-0.85*
衰减值 Attenuation	-0.89**	-0.91**	-0.99**	0.99**	-0.89**
回生值 Retrogradation value	-0.91**	-0.95**	-0.98**	0.98**	-0.91**

注:**和*分别表示1%和5%显著水平。下同。

Note: ** and * indicate significant levels of 1% and 5%, respectively. The same below.

究结果表明,拔节-成熟期整个生育进程中T₁条件下水稻单穴干物质积累量显著低于T₂($P<0.05$),致使水稻最终群体产量低于T₂($P<0.05$);而由于T₁土壤耕层薄使得水稻单穴分蘖茎数少于T₂,这反而促使T₁条件下水稻的单茎物质积累能力变强,更利于单茎穗粒的灌浆结实。

已有很多研究表明,ADPG焦磷酸化酶、可溶性淀粉合成酶、淀粉分支酶、谷氨酰胺合成酶等是籽粒淀粉和蛋白质代谢的关键酶,对水稻籽粒中淀粉和蛋白质的合成和积累起着重要的调节作用;其中,可溶性淀粉合成酶和淀粉分支酶是决定籽粒淀粉最终含量高低的关键因子^[25-27]。本研究结果表

明,与T₂相比,T₁条件下ADPG焦磷酸化酶和可溶性淀粉合成酶在籽粒灌浆后期仍能保持较高酶活性,而谷氨酰胺合成酶在籽粒整个灌浆进程中酶活性均显著高于T₂($P<0.05$),这表明T₁条件下水稻籽粒碳氮代谢关键酶活性变化整体上有利于籽粒中淀粉和蛋白质的合成与积累。T₁和T₂在稻米外观品质和稻米元素含量方面存在显著差异,分析其原因可能在于T₁的天然腐殖土中含有丰富的硅及其他矿质元素。其中,T₁土壤中钠、钙、镁、铁、锌、硒元素含量均显著高于T₂($P<0.05$),使得稻米中上述这些元素含量也显著高于T₂($P<0.05$)。罗来杨等^[28]、王力等^[29]、张国良等^[30]和商全玉等^[31]针对

表 9 抽穗后 15 和 25 d 水稻籽粒碳和氮代谢关键酶活性变化与稻米品质的相关性

Table 9 Correlation analysis of key enzyme activities of C and N metabolism in rice plants with rice quality after heading 15 and 25 d

指标 Index	ADPG 焦磷酸化酶 ADPG phosphorylase		可溶性淀粉合成酶 Soluble starch synthase		淀粉分支酶 Starch branching enzyme		谷氨酰胺合成酶 Glutamine synthetase	
	15 d	25 d	15 d	25 d	15 d	25 d	15 d	25 d
出糙率 Brown rice rate	−0.70	0.68	−0.75	−0.15	−0.69	0.41	0.60	0.66
整精米率 Head rice rate	−0.99**	0.88**	−0.98**	−0.05	−0.95**	0.63	0.96**	0.99**
垳白米率 Chalky rate	0.98**	−0.86*	0.96**	0.03	0.90**	−0.73	−0.98**	−0.99**
垳白度 Chalkiness degree	0.98**	−0.88**	0.98**	0.04	0.92**	−0.72	−0.97**	−0.99**
直链淀粉含量 Amylose content	0.60	−0.80*	0.76*	0.39	0.50	−0.96**	−0.79*	−0.74
粗蛋白含量 Crude protein content	0.99**	−0.81*	0.94**	0.04	0.92**	−0.58	−0.90**	−0.94**
胶稠度 Gel consistency	−0.89**	0.80*	−0.90**	−0.17	−0.73	0.84*	0.90**	0.89**
食味评价 Rice taste value	−0.80*	0.68	−0.77*	−0.15	−0.72	0.61	0.81*	0.81*
氨基酸总量 Total amount of amino acids	−0.95**	0.82*	−0.92**	−0.06	−0.98**	0.40	0.84*	0.90**
糊化温度 Gelatinization temperature	0.93**	−0.94**	0.98**	0.14	0.94**	−0.65	−0.97**	−0.98**
峰值粘度 Peak viscosity	−0.98**	0.89**	−0.98**	−0.09	−0.97**	0.60	0.94**	0.98**
最低粘度 Minimum viscosity	0.96**	−0.81*	0.94**	−0.10	0.88**	−0.71	−0.95**	−0.96**
最终粘度 Final viscosity	0.92**	−0.88**	0.95**	0.07	0.82*	−0.84*	−0.98**	−0.97**
衰减值 Attenuation	0.98**	−0.88**	0.98**	0	0.93**	−0.71	−0.99**	−1.00**
回生值 Retrogradation value	0.98**	−0.89**	0.98**	0.07	0.92**	−0.70	−0.96**	−0.98**

硅肥对稻米品质影响的相关研究结果表明,硅确实可以影响稻米的整精米率、垳白米率和垳白度等品质特性。本研究中 T₁ 稻米的整精米率、垳白米率和垳白度等指标与 T₂ 的差异,很大可能是其天然腐殖土中的硅起到了主导作用,需进一步试验验证。

RVA 谱特征与稻米食味品质间存在极为密切的关系,隋炯明等^[32]研究证明,垳白增加可导致淀

粉 RVA 谱热浆粘度、冷胶粘度、消减值、回复值的上升,造成米饭质地硬而糙,适口性差,易返生,这说明垳白的有无、垳白率的高低并不简单地决定外观品质上的优劣,也关系着稻米的食味性状。隋炯明等^[32]、舒庆尧等^[33]和李欣等^[34]研究指出,崩解值、消减值和回复值等特征值能较好地反映稻米蒸煮食味品质的优劣。舒庆尧等^[33]和胡培松等^[35]研究

认为,RVA特征值与稻米理化品质指标中的直链淀粉含量、胶稠度关系密切,直链淀粉含量越高的品种,崩解值越小,而冷胶黏度、回复值和消减值越大。本研究结果表明, T_1 与 T_2 在淀粉RVA谱特征上存在一定差异, T_1 土壤可提高籽粒淀粉的峰值粘度,同时降低了最低粘度、衰减值、回生值等参数,因而有利于石板大米优良品质的形成,这也说明RVA谱特征在一定程度上是通过影响米饭的柔软性、粘散性、香味、光泽等特性进而影响稻米蒸煮食味的优劣。

4 结 论

石板田(T_1)土壤环境下,水稻籽粒灌浆期植株光合作用、氮磷钾养分的吸收和积累、单茎干物质积累等均显著高于非石板田(T_2)($P<0.05$),且 T_1 籽粒碳、氮代谢关键酶活性的变化特征更利于稻米优良品质的形成。 T_1 稻米中多种氨基酸及营养元素含量均显著高于 T_2 ($P<0.05$); T_1 稻米的垩白米率、垩白度显著低于 T_2 ($P<0.05$),而整精米率显著高于 T_2 ($P<0.05$); T_1 土壤可提高籽粒淀粉的峰值粘度,同时降低最低粘度、衰减值和回生值等淀粉RVA特征值。综上,天然石板田通过提高灌浆结实期水稻植株光合能力及水稻单茎干物质积累量,促进植株各部位对N、P、K养分及天然腐殖土中营养元素的吸收和积累,提高籽粒碳、氮代谢关键酶在整个灌浆结实期或灌浆后期的酶活性,进而促进稻米品质的提升。

参考文献 References

- [1] Kusano M, Yang Z G, Okazaki Y, Nakabayashi R, Fukushima A, Saito K. Using metabolomic approaches to explore chemical diversity in rice [J]. *Molecular Plant*, 2015, 8(1): 58-67
- [2] 卜容燕, 韩上, 程文龙, 胡润, 朱勤, 李敏, 王慧, 唐杉, 武际. 皖南单季稻区种植利用紫云英对水稻产量、氮肥利用率及稻米品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(8): 184-190
Bu R Y, Han S, Cheng W L, Hu R, Zhu Q, Li M, Wang H, Tang S, Wu J. Effects of Chinese milk vetch on yield, nitrogen use efficiency and quality of rice in single cropping rice area of Southern Anhui Province [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(8): 184-190 (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 中国重要农业文化遗产实录[EB/OL]. (2015-09-28) [2024-01-01]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zywhycsl/dsp/201509/t20150928_4847054.htm
Ministry of agriculture and rural affairs of the people's republic of China. A record of important agricultural cultural heritages in China [EB/OL]. (2015-09-28) [2024-01-01]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zywhycsl/dsp/201509/t20150928_4847054.htm
- [4] 张凯, 陈明睿, 刘秋员. 减氮增密对籼梗杂交稻产量和稻米品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2023, 52(10): 14-21
Zhang K, Chen M R, Liu Q Y. Effects of reduced nitrogen application rate with increased density on yield and quality of indica-japonica hybrid rice [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(10): 14-21 (in Chinese)
- [5] Jiang Q, Du Y L, Tian X Y, Wang Q S, Xiong R H, Xu G C, Yan C, Ding Y F. Effect of panicle nitrogen on grain filling characteristics of high-yielding rice cultivars [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 74: 185-192
- [6] Zhang H, Hou D P, Peng X L, Ma B J, Shao S M, Jing W J, Gu J F, Liu L J, Wang Z Q, Liu Y Y, Yang J C. Optimizing integrative cultivation management improves grain quality while increasing yield and nitrogen use efficiency in rice [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(12): 2716-2731
- [7] 李恩宇, 陈光辉, 方希林, 莫旭, 肖海强. 不同种植模式对水稻生长发育与产量品质的影响[J]. *湖南农业科学*, 2023(11): 14-18, 29
Li E Y, Chen G H, Fang X L, Mo X, Xiao H Q. Effects of different planting patterns on rice growth, yield, and quality [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2023(11): 14-18, 29 (in Chinese)
- [8] 王颖姮, 陈丽娟, 崔丽丽, 詹生威, 宋煜, 陈世安, 解振兴, 姜照伟, 吴方喜, 卓传营, 蔡秋华, 谢华安, 张建福. 施氮量对优质稻“福香占”光合特性、产量及品质的影响[J]. *中国水稻科学*, 2023, 37(1): 89-101
Wang Y H, Chen L J, Cui L L, Zhan S W, Song Y, Chen S A, Xie Z X, Jiang Z W, Wu F X, Zhuo C Y, Cai Q H, Xie H A, Zhang J F. Effects of nitrogen rate on photosynthesis, yield and grain quality of superior quality rice “fuxiangzhan” [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(1): 89-101 (in Chinese)
- [9] 姬景红, 刘双全, 马星竹, 郝小雨, 郑雨, 赵月, 刘颖, 张明怡, 暴帅. 施氮对北方粳稻产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. *东北农业科学*, 2024, 49(1): 1-6
Ji J H, Liu S Q, Ma X Z, Hao X Y, Zheng Y, Zhao Y, Liu Y, Zhang M Y, Bao S. Effects of nitrogen application on yield, quality and fertilizer efficiency of japonica rice in Northern China [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2024, 49(1): 1-6 (in Chinese)
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil Agrochemical Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000 (in Chinese)
- [12] 余晚霞, 陈勇杏, 郭磊, 鲁斌, 朱书红, 华燕. 滇黄精品质评价及与土壤元素相关性分析[J]. *西部林业科学*, 2023, 52(6): 64-72
Yu W X, Chen Y X, Guo L, Lu B, Zhu S H, Hua Y. Quality evaluation of *Polygonatum kingianum* and correlation between quality and soil elements [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2023, 52(6): 64-72 (in Chinese)
- [13] Yasunori N, Kazuhiro Y, Shin-Young P, Toshihide O. Carbohydrate metabolism in the developing endosperm of rice grains [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1989, 30(6): 833-839
- [14] 金正勋, 钱春荣, 杨静, 刘海英. 水稻灌浆成熟期籽粒谷氨酰胺合成酶活性变化及其与稻米品质关系的初步研究[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(1): 103-106
Jin Z X, Qian C R, Yang J, Liu H Y. Changes of activity of glutamine synthetase during grain filling and its influence on rice grain quality [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(1): 103-106 (in Chinese)

- [15] 李杰, 冯跃华, 王旭, 许桂玲, 麻井彪, 吴彦利, 李香玲, 叶勇, 黄佑岗, 牟桂婷. 水稻叶片 SPAD 值分布特征及其与施氮量的关系[J]. 南方农业学报, 2017, 48(1): 38-45
- Li J, Feng Y H, Wang X, Xu G L, Ma J B, Wu Y L, Li X L, Ye Y, Huang Y G, Mou G T. Distribution characteristics of SPAD value in rice leaf and its relationship with nitrogen application rate [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2017, 48(1): 38-45 (in Chinese)
- [16] 王志君, 李红宇, 夏玉莹, 范名宇, 赵海成, 鲁洁婷, 赵朝勇, 郑桂萍. 寒地水稻叶片 SPAD 值与稻米蛋白质含量的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 150-161
- Wang Z J, Li H Y, Xia Y Y, Fan M Y, Zhao H C, Lu J T, Zhao C Y, Zheng G P. Relationship between blade SPAD value and protein content of rice in cold region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(5): 150-161 (in Chinese)
- [17] 朱莉, 李贵勇, 周伟, 朱世林, 李珍珍, 夏海晓, 陶有凤, 任万军, 胡剑锋. 不同生态条件下氮高效水稻品种干物质积累和产量特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1015-1028
- Zhu L, Li G Y, Zhou W, Zhu S L, Li Z Z, Xia H X, Tao Y F, Ren W J, Hu J F. Dry matter accumulation and yield characteristics of high-nitrogen efficient rice cultivars under different ecological conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(6): 1015-1028 (in Chinese)
- [18] 王勋, 戴廷波, 姜东, 荆奇, 曹卫星. 不同生态环境下水稻基因型产量形成与源库特性的比较研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 615-619
- Wang X, Dai T B, Jiang D, Jing Q, Cao W X. Yield-formation and source-sink characteristics of rice genotypes under two different eco-environments [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 615-619 (in Chinese)
- [19] 童平, 杨世民, 马均, 吴合洲, 傅泰露, 李敏, 王明田. 不同水稻品种在不同光照条件下的光合特性及干物质积累[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 505-511
- Tong P, Yang S M, Ma J, Wu H Z, Fu T L, Li M, Wang M T. Photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of hybrid rice varieties under different light conditions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 505-511 (in Chinese)
- [20] 邓飞, 王丽, 刘利, 刘代银, 任万军, 杨文钰. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1930-1942
- Deng F, Wang L, Liu L, Liu D Y, Ren W J, Yang W Y. Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(10): 1930-1942 (in Chinese)
- [21] 杨惠杰, 李义珍, 杨仁崔, 姜照伟, 郑景生. 超高产水稻的干物质生产特性研究[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 265-270
- Yang H J, Li Y Z, Yang R C, Jiang Z W, Zheng J S. Dry matter production characteristics of super high yielding rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2001, 15(4): 265-270 (in Chinese)
- [22] 马均, 朱庆森, 马文波, 田彦华, 杨建昌, 周开达. 重穗型水稻光合作用、物质积累与运转的研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4): 375-381
- Ma J, Zhu Q S, Ma W B, Tian Y H, Yang J C, Zhou K D. Studies on the photosynthetic characteristics and accumulation and transformation of assimilation product in heavy panicle type of rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(4): 375-381 (in Chinese)
- [23] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 彭少兵, 唐启源, 方远祥, 肖安民, 陈玉梅, 熊昌明. 超级杂交稻干物质生产特点与产量稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1927-1936
- Ao H J, Wang S H, Zou Y B, Peng S B, Tang Q Y, Fang Y X, Xiao A M, Chen Y M, Xiong C M. Study on yield stability and dry matter characteristics of super hybrid rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7): 1927-1936 (in Chinese)
- [24] 邹应斌, 黄见良, 屠乃美, 李合松, 黄升平, 张杨珠. “旺壮重”栽培对双季杂交稻产量形成及生理特性的影响[J]. 作物学报, 2001, 27(3): 343-350
- Zou Y B, Huang J L, Tu N M, Li H S, Huang S P, Zhang Y Z. Effects of the VSW cultural method on yield formation and physiological characteristics in double cropping hybrid rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(3): 343-350 (in Chinese)
- [25] 沈鹏, 金正勋, 罗秋香, 金学泳, 孙艳丽. 水稻灌浆过程中籽粒淀粉合成关键酶活性与蒸煮食味品质的关系[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(1): 58-64
- Shen P, Jin Z X, Luo Q X, Jin X Y, Sun Y L. Relationship between activity of key starch synthetic enzymes during grain filling and quality of eating and cooking in rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(1): 58-64 (in Chinese)
- [26] 杨建昌, 彭少兵, 顾世梁, Romeo M Vesperas, 朱庆森. 水稻灌浆期籽粒中 3 个与淀粉合成有关的酶活性变化[J]. 作物学报, 2001, 27(2): 157-164
- Yang J C, Peng S B, Gu S L, Vesperas R M, Zhu Q S. Changes in activities of three enzymes associated with starch synthesis in rice grains during grain filling [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(2): 157-164 (in Chinese)
- [27] 李晓光, 刘海英, 金正勋, 刘洪亮, 黄星, 徐美兰. 水稻杂交后代灌浆成熟期籽粒淀粉合成关键酶和谷氨酰胺合成酶活性变化的初步研究[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(4): 443-446
- Li X G, Liu H Y, Jin Z X, Liu H L, Huang X, Xu M L. Changes in activities of key enzymes for starch synthesis and glutamine synthetase during grain filling of rice hybrid progeny [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(4): 443-446 (in Chinese)
- [28] 罗来杨, 吴晓峰, 刘凯丽, 罗立华, 龙伟雄, 罗险英, 徐伟标, 李永辉. 硅肥对优质稻产量、品质及抗倒伏性的影响[J]. 杂交水稻, 2023, 38(2): 149-153
- Luo L Y, Wu X F, Liu K L, Luo L H, Long W X, Luo X Y, Xu W B, Li Y H. Effects of silicon fertilizer on yield, quality and lodging resistance of high-quality rice [J]. *Hybrid Rice*, 2023, 38(2): 149-153 (in Chinese)
- [29] 王力, 孙影, 张洪程, 魏海燕, 朱大伟, 朱盈, 徐栋, 霍中洋. 不同时期施用锌硅肥对优良食味梗稻产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(6): 885-898
- Wang L, Sun Y, Zhang H C, Wei H Y, Zhu D W, Zhu Y, Xu D, Huo Z Y. Effect of Zn and Si fertilizers applied at different stages on yield and quality of japonica rice with good eating quality [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(6): 885-898 (in Chinese)
- [30] 张国良, 戴其根, 王建武, 张洪程, 霍中洋, 凌励, 王显, 张军. 施硅量对梗稻品种武育梗 3 号产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 299-303
- Zhang G L, Dai Q G, Wang J W, Zhang H C, Huo Z Y, Ling L, Wang X, Zhang J. Effects of silicon fertilizer rate on yield and quality of japonica rice Wuyujing 3 [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(3): 299-303 (in Chinese)
- [31] 商全玉, 张文忠, 韩亚东, 荣蓉, 徐海, 徐正进, 陈温福. 硅肥对北方梗稻产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(6): 661-664
- Shang Q Y, Zhang W Z, Han Y D, Rong R, Xu H, Xu Z J, Chen W F. Effect of silicon fertilizer application on yield and grain quality of japonica rice from Northeast China [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(6): 661-664 (in Chinese)

- [32] 隋炯明, 李欣, 严松, 严长杰, 张蓉, 汤述翥, 陆驹飞, 陈宗祥, 顾铭洪. 稻米淀粉RVA谱特征与品质性状相关性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 657-663
- Sui J M, Li X, Yan S, Yan C J, Zhang R, Tang S Z, Lu J F, Chen Z X, Gu M H. Studies on the rice RVA profile characteristics and its correlation with the quality [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(4): 657-663 (in Chinese)
- [33] 舒庆尧, 吴殿星, 夏英武, 高明尉, Anna Mc Clung. 稻米淀粉RVA谱特征与食用品质的关系[J]. 中国农业科学, 1998, 31(3): 25-29
- Shu Q Y, Wu D X, Xia Y W, Gao M W, Clung A M. Relationship between RVA profile character and eating quality in *Oryza sativa* L [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(3): 25-29 (in Chinese)
- [34] 李欣, 张蓉, 隋炯明, 梁国华, 沈新平, 严长杰, 顾世梁, 顾铭洪. 稻米淀粉粘滞性谱特征的表现及其遗传[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(5): 384-390
- Li X, Zhang R, Sui J M, Liang G H, Shen X P, Yan C J, Gu S L, Gu M H. Performance and inheritance of rice starch viscosity (RVA profile) characteristics [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(5): 384-390 (in Chinese)
- [35] 胡培松, 翟虎渠, 唐绍清, 万建民. 利用RVA快速鉴定稻米蒸煮及食味品质的研究[J]. 作物学报, 2004, 30(6): 519-524
- Hu P S, Zhai H Q, Tang S Q, Wan J M. Rapid evaluation of rice cooking and palatability quality by RVA profile [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(6): 519-524 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 李洪亮, 黑龙江省农业科学院牡丹江分院水稻研究所副研究员, 主要从事水稻遗传育种与栽培研究。目前为国家水稻产业技术体系牡丹江综合试验站主要成员, 黑龙江省作物学会会员, 牡丹江优质稻米产业技术创新战略联盟专家技术委员会成员。主持和参与省部级、国家重点实验室等各类科研项目36项。审定水稻新品种10个, 获得植物新品种授权15项、实用新型专利授权2项, 制定地方标准4项。在《中国水稻科学》《中国农业大学学报》等期刊上发表学术论文40余篇, 参编《寒地粳稻育种》等论著4部。获得各类成果奖项7项, 其中, 神农中华农业科技二等奖1项, 黑龙江省科技进步二等奖2项。