刘红江,郭 智,张 敏,等. 增施中微量元素肥料对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 江苏农业学报,2026,42(2):273-282.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2026.02.006

增施中微量元素肥料对水稻产量及稻米品质的影响

刘红江[1], 郭 智[1], 张 敏[2], 张岳芳[1], 孙国峰[1], 周 炜[1], 盛 婧[1]
(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏 南京 210014; 2.南京市浦口区永宁街道农业服务中心,江苏 南京 211801)

摘要: 为了探明施用中微量元素肥料对水稻产量及稻米品质的影响,本研究采用大田小区试验,以优良食味品种水稻南粳46为供试材料,设置常规施肥(对照),增施硅肥、增施锌肥、增施镁肥、硅锌肥配施、硅镁肥配施、锌镁肥配施、硅锌镁肥配施等8个处理。结果表明,增施硅肥、锌肥、镁肥及其配合施用均能一定程度地提高水稻产量,其中2020年处理与对照的差异达到显著水平,其主要原因是水稻单位面积穗数和结实率较大幅度的提高;水稻产量的提高也与其生物产量较大幅度提高密切相关。增施硅肥、锌肥、镁肥及其配合施用整体上能够提高稻谷糙米率、精米率和整精米率,降低稻米垩白粒率和垩白度,提升稻米的加工品质与外观品质;降低稻米蛋白质含量,延伸稻米胶稠度,提升稻米的蒸煮食味品质;提高稻米的热浆黏度、峰值黏度、最终黏度和崩解值,降低稻米的消减值、峰值时间和起浆温度,调优稻米的快速黏度分析仪(RVA)谱特征值;提升稻米食味值;施用硅肥对提升稻米食味值的效果相对最好,相较对照,施用硅肥使稻米食味值显著提高。施用硅肥、锌肥、镁肥,不仅能提高水稻产量,提升水稻种植的经济效益,还能提高稻米食味值。其中,硅肥的施用效果最好,与锌肥和镁肥配施能够进一步提高水稻产量和提升稻米品质。

关键词: 水稻; 中微量元素; 产量; 稻米品质; 食味值
中图分类号: S143.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)02-0273-10

Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on rice yield and grain quality

LIU Hongjiang[1], GUO Zhi[1], ZHANG Min[2], ZHANG Yuefang[1], SUN Guofeng[1], ZHOU Wei[1], SHENG Jing[1]
(1.*Institute of Agricultural Resources and Environment*, *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences*, *Nanjing* 210014, *China*; 2.*Yongning Street Agricultural Service Center*, *Pukou District*, *Nanjing City*, *Nanjing* 211801, *China*)

Abstract: To investigate the effects of applying medium and trace element fertilizers on rice yield and grain quality, a field plot experiment was conducted using the high-quality tasting rice variety Nanjing 46 as the test material. Eight treatments were set up, including conventional fertilization (control), additional application of silicon fertilizer, additional application of zinc fertilizer, additional application of magnesium fertilizer, combined application of silicon and zinc fertilizers, combined application of silicon and magnesium fertilizers, combined application of zinc and magnesium fertilizers, and combined application of silicon, zinc, and magnesium fertilizers. The results indicated that the application of silicon, zinc, and magnesium fertilizers, either individually or in combination, could improve rice yield to some extent. In particular, the differences between the treatments and the control reached a significant level in 2020. This improvement was primarily attributed to a sub-

收稿日期: 2025-04-03
基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(22)1002];南京市农业重大技术协同推广计划项目[2024NJXTTG(04)]
作者简介: 刘红江(1979-),男,江苏建湖人,博士,副研究员,主要从事农业生态和稻麦栽培生理生态研究。(E-mail)Liuhongjiang2004@sohu.com
通讯作者: 盛 婧,(E-mail)nkysj@hotmail.com

stantial increase in the number of panicles per unit area and the seed-setting rate. Additionally, the increase in rice yield was closely related to a significant enhancement in biological yield. The application of silicon, zinc, and magnesium fertilizers, either individually or in combination, generally increased the brown rice rate, milled rice rate, and head rice rate, while reducing the chalky grain rate and chalkiness degree. This improvement enhanced the processing and appearance quality of rice. Furthermore, it decreased the protein content, extended the gel consistency, and thereby improved the cooking and eating quality. Additionally, it increased the hot paste viscosity, peak viscosity, final viscosity, and breakdown value, while decreasing the setback value, peak time, and pasting temperature. These changes optimized the Rapid Visco Analyzer (RVA) profile characteristics and ultimately improved the taste score of rice. The application of silicon fertilizer demonstrated the most pronounced effect on improving the rice taste score. Compared with the control, silicon fertilizer application significantly increased the rice taste score. The application of silicon, zinc, and magnesium fertilizers not only increased rice yield and enhanced the economic benefits of rice cultivation but also improved the rice taste score. Among them, silicon fertilizer showed the best effectiveness, and its combined application with zinc and magnesium fertilizers could further increase rice yield and improve rice quality.

Key words: rice; medium and trace elements; yield; grain quality; taste score

作为中国最主要的口粮作物之一,水稻生产具有极其重要的地位[1]。本世纪以来,得益于中国粮食产量的连年丰收,稻米的稳定供应保证了居民的消费需求[2]。伴随经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高,老百姓在保证吃得饱的基础上,对吃得好的关注度日益提高。因此,在水稻生产上,科研部门和农技推广部门,逐渐从重视提高水稻单产向提升稻米品质方向转变[3]。近年来,一大批优良食味水稻新品种的不断育成与推广应用[4],为中国稻米品质的进一步提升打下了坚实的基础。在通过栽培措施提高稻米品质方面,前人做了大量的研究工作。如适期栽插[5]、钵苗移栽[6]、施用有机肥[7]、氮肥减量[8]、合理灌水[9]、适时收获[10]等均能在一定程度上改善稻米品质。这些研究结果为中国稻米品质的提升提供了有力支撑。与此同时,微量元素对稻米品质也存在较大的影响。研究结果表明,施用硅、锌、镁等元素均能够促进水稻光合产物的形成和转运,对水稻增产和米质提升均具有一定的积极作用[11-13]。目前为止,关于几种中微量元素配合施用对江苏省南部地区水稻产量和稻米品质影响方面的比较研究,报道较少。为此,本研究于 2020 年和 2021 年在江苏省镇江市句容市后白镇五星村试验田,通过设置常规施肥(对照)、单施硅肥、单施锌肥、单施镁肥及硅锌镁肥配合施用等 8 个处理,研究增施中微量元素肥料对水稻产量及稻米品质的影响,以期为调优稻米品质和保障国家粮食安全提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2020 年和 2021 年在江苏省镇江市句容市后白镇五星村(31°48′N,119°10′E)进行,当地具有明显的北亚热带中部季风气候特征,四季分明,降水丰沛,光照充足,热量充裕,年无霜期长。多年平均气温 15.2 ℃,全年日均温大于 10.0 ℃的天数达 226 d,总积温达4 859.6 ℃,多年平均降雨量超 1 050.0 mm,常年平均光照时间达2 157 h。土壤质地为黏质壤土,周年采用稻麦轮作种植方式。土壤基本理化性质:全氮含量和总磷含量分别为 1.54 g/kg和 0.48 g/kg;速效氮含量、速效磷含量、速效钾含量依次为 107.35 mg/kg、14.19 mg/kg、121.43 mg/kg;硅元素含量、锌元素含量、镁元素含量依次为 203.79 g/kg、29.46 mg/kg、4.13 g/kg;有机质含量为 25.62 g/kg,土壤容重为 1.23 g/cm^3,pH 为 6.77。

1.2 试验设计

于 2020 年和 2021 年种植两季水稻,将上季小麦秸秆机械粉碎,耕翻还田。以常规施肥[氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)施用量依次是 270.0 kg/hm^2、67.5 kg/hm^2、135.0 kg/hm^2]为对照,按照基肥∶分蘖肥∶穗肥=4∶3∶3 施氮肥;磷肥全部作为基肥施用;钾肥按照基肥与穗肥1∶1 施用。在此基础上,设置增施中微量元素肥料硅、锌、镁 3 种元素及其配方复合肥料等处理。具体为对照、单施硅肥、单施锌肥、单施镁肥、硅肥+锌肥、硅肥+镁肥、锌肥+镁肥、硅肥+锌肥+

镁肥等 8 个处理。根据不同处理,将有效硅含量 30%~40%的钢渣硅肥按 300 kg/hm^2、有效锌含量 98%的硫酸锌按 15 kg/hm^2、有效镁含量 98%的硫酸镁按 15 kg/hm^{2}均作为基肥,与化肥人工拌匀后施用。试验共 8 个处理,重复 3 次,小区规格为 6 m×8 m。水分管理措施按当地高产栽培进行,适时进行病虫草害防治。

供试水稻品种为南粳 46,手栽模拟机插秧,行距 30 cm,株距 14 cm,每穴4~5 苗,2020 年 6 月 12 日栽秧,11 月 8 日收获,2021 年 6 月 14 日栽秧,11 月 11 日收获。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 *水稻产量的测定* 于水稻成熟期,在各小区选择长势较为均衡的连续水稻植株 100 穴,记录穗数,折算单穴平均穗数,据此选取 5 穴接近平均穗数的植株,进行取样、脱粒、晾干、水漂、烘干、考种,计算穗粒数、结实率、千粒重及理论产量。

1.3.2 *水稻生物产量和经济系数的测定* 将 1.3.1 的水稻植株置于烘箱,70 ℃烘干至恒重后,使用天平称重,计算生物产量和经济系数。

1.3.3 *稻米品质的测定* 将成熟期取得的用于稻米品质检测的待检稻谷样品,保存 3 个月后,按照国标《优质稻谷》(GB/17891-2017)检测稻米的糙米率、精米率、整精米率、整精米长和宽、垩白粒率、垩白度、蛋白质含量、直链淀粉含量、胶稠度、稻米快速黏度分析仪(RVA)谱特征值和食味值等指标。用北京东孚久恒公司的大米食味计测定稻米的蛋白质含量、直链淀粉含量及食味值[14],用瑞典波通仪器公司的 RVA 黏度测定仪测定稻米 RVA 谱特征值[15]。每个样品 3 次重复。

1.3.4 *经济效益分析* 根据不同处理的水稻产量和稻谷单价计算产值和新增产值;结合中微量元素的施用量以及销售价格和施用人工成本计算成本增加量,折算经济效益。

1.4 数据分析

使用 Excel 2007 进行数据分析和作图,使用 SPSS19.0 进行数据统计分析,使用 R 软件进行多元回归分析。

2 结果与分析

2.1 增施中微量元素肥料对水稻产量及其构成的影响

增施中微量元素肥料对水稻产量及其构成的影响如表 1 所示。2020 年,单独增施硅肥,以及硅锌肥、硅镁肥、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻产量($P<0.05$);2021 年,单独增施硅肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻产量($P<0.05$),单独增施锌肥、镁肥,以及锌镁肥配施水稻产量与对照差异不显著($P>0.05$)。水稻产量构成因素,单位面积穗数,2020 年和 2021 年,均为单独增施硅肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻单位面积穗数($P<0.05$);单独增施锌肥、镁肥,以及锌镁肥配施水稻单位面积穗数与对照差异不显著($P>0.05$)。2020 年和 2021 年,不同处理间每穗粒数差异均不显著($P>0.05$)。结实率,2020 年,单独增施硅肥、锌肥、镁肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、锌镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻结实率($P<0.05$);2021 年,单独增施硅肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、锌镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻结实率($P<0.05$),单独增施锌肥、镁肥对水稻结实率的影响不显著($P>0.05$)。2020 年和 2021 年,不同处理间千粒重差异均不显著($P>0.05$)。综上,增施硅肥较增施锌肥和镁肥提高水稻产量效果更为明显,且硅锌镁肥配施处理水稻产量最高。说明,硅肥、锌肥、镁肥两两组合施用,或者三者配施,比单施硅肥、锌肥、镁肥对水稻产量的提升幅度相对更大,因此它们之间对提高水稻产量存在一定的协同效应。而增施中微量元素肥料提高水稻产量的主要原因是其单位面积穗数和结实率有较大幅度提高。

2.2 增施中微量元素肥料对水稻生物产量与经济系数的影响

增施中微量元素肥料对水稻生物产量与经济系数的影响如表 2 所示。2020 年和 2021 年,水稻生物产量均以对照为最低,单独增施硅肥、锌肥、镁肥,以及硅锌配施、硅镁配施、锌镁配施、硅锌镁配施均能显著提高水稻生物产量($P<0.05$),其中硅锌镁肥配施水稻生物产量提高幅度相对较大。2020 年和 2021 年,增施中微量元素肥料使水稻的经济系数整体略有增加,但处理间的差异均未达到显著水平($P>0.05$)。说明,硅肥、锌肥、镁肥对提高水稻生物产量存在一定的协同效应;而增施中微量元素肥料对水稻经济系数均无显著影响。

表 1 增施中微量元素肥料对水稻产量及其构成的影响

Table 1 Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on rice yield and its components

年份	处理	穗数（$\times10^6$穗，1 hm^2）	穗粒数（粒）	结实率（%）	千粒重（g）	产量（kg/hm^2）
2020	常规施肥（对照）	3.82b	103.2a	88.4b	25.58a	8 905.9c
	增施硅肥	4.07a	104.4a	90.7a	25.81a	9 947.7a
	增施锌肥	3.81b	104.4a	90.6a	25.74a	9 285.0b
	增施镁肥	3.84b	103.6a	90.6a	25.54a	9 206.3b
	硅锌肥配施	4.08a	105.5a	90.9a	25.80a	10 084.0a
	硅镁肥配施	4.08a	104.8a	90.6a	25.82a	9 991.4a
	锌镁肥配施	3.81b	105.2a	90.4a	25.52a	9 238.9b
	硅锌镁肥配施	4.06a	105.3a	90.5a	26.17a	10 120.2a
2021	常规施肥（对照）	3.32c	121.0a	86.4b	25.29a	8 774.9c
	增施硅肥	3.44a	120.8a	89.0a	25.36a	9 367.0ab
	增施锌肥	3.34bc	122.0a	88.7ab	25.37a	9 181.0bc
	增施镁肥	3.33c	124.3a	87.6ab	25.17a	9 120.9bc
	硅锌肥配施	3.45a	122.4a	89.2a	25.24a	9 498.4ab
	硅镁肥配施	3.42ab	122.2a	89.4a	25.16a	9 400.2ab
	锌镁肥配施	3.38bc	120.8a	89.7a	25.29a	9 256.5bc
	硅锌镁肥配施	3.46a	122.2a	90.5a	25.25a	9 660.6a

同一年份同列数据后不同小写字母表示处理间存在显著差异（$P<0.05$）。

表 2 增施中微量元素肥料对水稻生物产量与经济系数的影响

Table 2 Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on the biological yield and harvest index of rice

处理	生物产量（$\times10^4$ kg/hm^2）		经济系数	
	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年
常规施肥（对照）	1.85c	1.79c	0.482a	0.491a
增施硅肥	2.04ab	1.88ab	0.487a	0.498a
增施锌肥	1.92b	1.86b	0.483a	0.495a
增施镁肥	1.90b	1.85b	0.485a	0.492a
硅锌肥配施	2.06a	1.90ab	0.489a	0.501a
硅镁肥配施	2.03ab	1.88ab	0.491a	0.500a
锌镁肥配施	1.92b	1.87ab	0.481a	0.495a
硅锌镁肥配施	2.08a	1.93a	0.487a	0.502a

同一列数据后不同小写字母表示处理间存在显著差异（$P<0.05$）。

2.3 增施中微量元素肥料对稻米品质的影响

2.3.1 *加工品质* 增施中微量元素肥料对稻米加工品质的影响如表 3 所示。2020 年，水稻糙米率以对照为最低，单独增施镁肥，以及硅镁肥配施、锌镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻糙米率（$P<0.05$），单独增施硅肥、锌肥，以及硅锌肥配施对水稻糙米率的影响未达到显著水平（$P>0.05$）；2021 年，水稻糙米率也以对照为最低，单独增施硅肥，以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、锌镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻糙米率（$P<0.05$），单独增施锌肥、镁肥对水稻糙米率的影响未达到显著水平（$P>0.05$）。2020 年，水稻精米率以对照为最低，单独增施硅肥、锌肥、镁肥，以及它们两两或三者配施均显著提高了水稻精米率（$P<0.05$）；2021 年，水稻精米率也以对照为最低，单独增施硅肥，以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻精米率（$P<0.05$），单独增施锌肥、镁肥，以及锌镁肥配施对水稻精米率的影响未达到显著水平（$P>0.05$）。2020 年，与对照相比，单独增施硅肥、锌肥、镁肥，以及它们两两或三者配施对水稻整精米率的影响未达到显著水平（$P>0.05$）；2021 年，水稻整精米率也以对照为最低，单独增施硅肥，以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、锌镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了水稻整精米率（$P<0.05$），单独增施锌肥、镁肥对水稻整精米率的影响未达到显著水平（$P>0.05$）。综上，2021 年，硅肥及其与锌肥、镁肥配合施用能使稻谷的糙米率、精米率和整精米率显著提

高;而硅锌镁肥配施对稻谷糙米率、精米率和整精米率提高幅度相对最大。说明,硅肥、锌肥、镁肥对提升水稻加工品质存在一定的协同效应。

表 3 增施中微量元素肥料对稻米加工品质的影响

Table 3 Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on the processing quality of rice

年份	处理	糙米率(%)	精米率(%)	整精米率(%)
2020	常规施肥(对照)	82.4b	74.1b	66.6a
	增施硅肥	84.2ab	76.7a	68.5a
	增施锌肥	84.1ab	76.3a	68.0a
	增施镁肥	84.4a	76.4a	68.0a
	硅锌肥配施	83.9ab	76.9a	68.3a
	硅镁肥配施	84.6a	77.0a	68.3a
	锌镁肥配施	85.2a	76.8a	67.9a
	硅锌镁肥配施	85.4a	77.2a	68.5a
2021	常规施肥(对照)	79.7b	72.2b	64.7b
	增施硅肥	82.2a	73.7a	66.8a
	增施锌肥	81.3ab	73.4ab	65.6ab
	增施镁肥	80.8ab	73.0ab	65.0ab
	硅锌肥配施	82.4a	74.2a	67.0a
	硅镁肥配施	82.7a	74.3a	67.1a
	锌镁肥配施	81.9a	73.4ab	66.1a
	硅锌镁肥配施	83.1a	74.6a	67.3a

同一年份同一列数据后不同小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。

2.3.2 外观粒型品质 增施中微量元素肥料对稻米外观粒型品质的影响如表 4 所示。2020 年和 2021 年,2 年的研究结果均表明,增施中微量元素对水稻整精米长、整精米宽和整精米长宽比影响不显著($P>0.05$)。2020 年,稻米垩白粒率以对照为最高,单独增施硅肥、锌肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著降低了稻米垩白粒率($P<0.05$),单独增施镁肥,以及锌镁肥配施对稻米垩白粒率的影响未达到显著水平($P>0.05$);2021 年,稻米垩白粒率也以对照为最高,单独增施硅肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、锌镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著降低了稻米垩白粒率($P<0.05$),单独增施锌肥、镁肥对稻米垩白粒率的影响未达到显著水平($P>0.05$)。2020 年,稻米垩白度以对照为最高,单独增施硅肥、锌肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、锌镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著降低了稻米垩白度($P<0.05$),单独增施镁肥对稻米垩白度的影响未达到显著水平($P>0.05$);2021 年,稻米垩白度也以对照为最高,单独增施硅肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著降低了稻米垩白度($P<0.05$),单独增施锌肥、镁肥,以及锌镁肥配施对稻米垩白度的影响未达到显著水平($P>0.05$)。综上,增施中微量元素肥料对稻米的大小影响不明显;但能降低稻米的垩白粒率和垩白度,硅锌镁肥配施条件下稻米垩白粒率和垩白度降低幅度相对最大。说明,硅肥、锌肥、镁肥对提升稻米外观品质存在一定的协同效应。

表 4 增施中微量元素肥料对稻米外观粒型品质的影响

Table 4 Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on the appearance and grain shape quality of rice

年份	处理	整精米长(mm)	整精米宽(mm)	整精米长宽比	垩白粒率(%)	垩白度(%)
2020	常规施肥(对照)	4.77a	2.80a	1.70a	12.27a	4.55a
	增施硅肥	4.80a	2.82a	1.70a	10.77b	3.41c
	增施锌肥	4.80a	2.82a	1.70a	11.13b	4.04b
	增施镁肥	4.70a	2.76a	1.70a	11.37ab	4.33ab
	硅锌肥配施	4.73a	2.78a	1.70a	9.90c	3.38c
	硅镁肥配施	4.77a	2.80a	1.70a	9.87c	3.36c
	锌镁肥配施	4.80a	2.82a	1.70a	11.30ab	3.99b
	硅锌镁肥配施	4.70a	2.76a	1.70a	9.73c	3.33c
2021	常规施肥(对照)	4.83a	2.69a	1.80a	13.83a	4.57a
	增施硅肥	4.80a	2.72a	1.77a	12.23b	3.80b
	增施锌肥	4.80a	2.72a	1.77a	12.90ab	4.17ab
	增施镁肥	4.83a	2.69a	1.80a	13.13ab	4.43a
	硅锌肥配施	4.83a	2.69a	1.80a	11.93bc	3.67bc
	硅镁肥配施	4.80a	2.72a	1.77a	11.73bc	3.60bc
	锌镁肥配施	4.80a	2.72a	1.77a	12.60b	4.17ab
	硅锌镁肥配施	4.80a	2.67a	1.80a	11.13c	3.23c

同一年份同一列数据后不同小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。

2.3.3 蒸煮食味与营养品质 增施中微量元素肥料对稻米蒸煮食味与营养品质的影响如表 5 所示。2020 年,稻米蛋白质含量以对照为最高,单独增施硅肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著降低了稻米蛋白质含量($P<0.05$),单独增施锌肥、镁肥,以及锌镁肥配施对稻米蛋白质含量的影响未达到显著水平($P>0.05$);2021 年,稻米蛋白质含量也以对照为最高,但仅硅锌镁肥配施显著降低了稻米蛋白质含量($P<0.05$),其他处理对稻米蛋白质含量的影响未达到显著水平($P>0.05$)。2020 年,稻米胶稠度以对照为最短,单独增施硅肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了稻米胶稠度($P<0.05$),单独增施锌肥、镁肥,以及锌镁肥配施对稻米胶稠度的影响未达到显著水平($P>0.05$);2021 年,稻米胶稠度也以对照为最短,硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均显著提高了稻米胶稠度($P<0.05$),单独增施硅肥、锌肥、镁肥,以及硅锌肥配施、锌镁肥配施对稻米胶稠度的影响未达到显著水平($P>0.05$)。2020 年和 2021 年不同处理间稻米直链淀粉含量差异不显著。综上,硅锌镁肥配施处理稻米蛋白质含量降低和胶稠度延长幅度均最大,处理间的差异达到显著水平。说明,增施中微量元素肥料降低了稻米的蛋白质含量,延长了稻米的胶稠度,提升了稻米的蒸煮食味品质;硅肥、锌肥、镁肥对提升稻米的蒸煮食味品质存在一定的协同效应。

2.3.4 RVA 谱特征值 增施中微量元素肥料对稻米 RVA 谱特征值的影响如表 6 所示。2020 年和 2021 年,稻米的热浆黏度、峰值黏度及最终黏度均以对照为最低,增施硅肥、锌肥、镁肥及其配合施用均能提高稻米的热浆黏度、峰值黏度和最终黏度;其中,硅锌镁肥配合施用处理使稻米的热浆黏度、峰值黏度和最终黏度提高幅度最大,与对照差异显著($P<0.05$)。2020 年和 2021 年,稻米的崩解值也是以对照为最低,硅锌肥配施、硅镁肥配施、锌镁肥配施能显著提高稻米的崩解值;稻米的消减值均为负数,且以对照为相对较高,2021 年,增施硅肥、硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施均能显著降低稻米的消减值;稻米的回复值均以对照为相对较高,增施硅肥、锌肥、镁肥及其配合施用均不同程度降低稻米的回复值,但对照与处理间的差异不显著($P>0.05$);稻米的峰值时间和起浆温度均以对照为相对较高,增施硅肥、锌肥、镁肥及其配合施用均不同程度降低稻米的峰值时间和起浆温度。统计分析结果表明,2 个试验年度,硅锌镁肥配施处理显著提高稻米的热浆黏度、峰值黏度和最终黏度,显著提高 2021 年度稻米的崩解值;硅锌镁肥配施处理,显著降低了稻米的峰值时间和起浆温度以及 2021 年度稻米的消减值。说明,增施中微量元素肥料可以提高稻米的热浆黏度、峰值黏度、最终黏度和崩解值,降低稻米的消减值、峰值时间和起浆温度。

表 5 增施中微量元素肥料对稻米蒸煮食味与营养品质的影响

Table 5 Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on the cooking, eating and nutritional quality of rice

年份	处理	蛋白质含量(%)	胶稠度(mm)	直链淀粉含量(%)
2020	常规施肥(对照)	8.27a	78.7c	9.40a
	增施硅肥	7.90b	82.7ab	9.57a
	增施锌肥	8.08ab	80.0c	9.40a
	增施镁肥	8.05ab	79.7c	9.53a
	硅锌肥配施	7.82b	83.3a	9.57a
	硅镁肥配施	7.86b	83.7a	9.73a
	锌镁肥配施	8.04ab	80.7bc	9.47a
	硅锌镁肥配施	7.80b	83.7a	9.43a
2021	常规施肥(对照)	8.10a	72.8b	9.27a
	增施硅肥	7.75ab	76.0ab	9.43a
	增施锌肥	7.97a	73.8b	9.23a
	增施镁肥	8.01a	72.9b	9.40a
	硅锌肥配施	7.67ab	76.8ab	9.53a
	硅镁肥配施	7.70ab	77.3a	9.27a
	锌镁肥配施	7.80a	74.0b	9.33a
	硅锌镁肥配施	7.59b	78.1a	9.40a

同一年份同一列数据后不同小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。

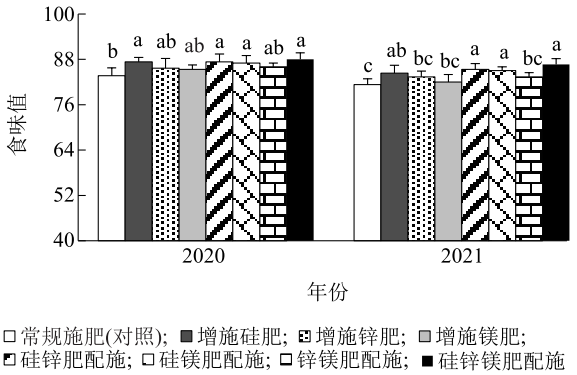
2.3.5 稻米食味值 增施中微量元素肥料对稻米食味值的影响如图 1 所示。不同年度间,2020 年稻米食味值明显高于 2021 年。不同处理间比较,2020 年和 2021 年,稻米食味值均以对照为最低,单独增施硅肥,以及硅锌肥配施、硅镁肥配施、硅锌镁肥配施显著提高了稻米食味值($P<0.05$);单独增施锌肥、镁肥,以及锌镁肥配施对稻米食味值影响不显著($P>0.05$)。统计结果表明,增施硅肥以及硅肥与锌肥、镁肥配合施用均显著提高稻米食味值。说明,增施硅肥、锌肥、镁肥均能提升稻米食味值,而硅肥对提升稻米食味值的效果相对较好,同时,硅肥、锌肥、镁肥对提升稻米食味值存在一定的协同效应。

表 6 增施中微量元素肥料对稻米快速黏度分析仪(RVA)谱特征值的影响

Table 6 Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on the Rapid Visco Analyzer (RVA) spectral characteristics of rice

年份	处理	峰值黏度(cP)	热浆黏度(cP)	最终黏度(cP)	崩解值(cP)	消减值(cP)	回复值(cP)	峰值时间(min)	起浆温度(℃)
2020	常规施肥(对照)	2 514.7c	1 726.7b	2 051.7b	788.0b	-463.0a	325.0a	6.97a	77.3a
	增施硅肥	2 687.3ab	1 887.0ab	2 204.7ab	800.3ab	-482.7a	317.7a	6.32c	74.6ab
	增施锌肥	2 572.0bc	1 778.7b	2 085.7b	793.3b	-486.3a	307.0a	6.56bc	76.3a
	增施镁肥	2 586.0bc	1 745.0b	2 064.0b	841.0a	-522.0a	319.0a	6.69ab	76.7a
	硅锌肥配施	2 734.7a	1 911.7ab	2 219.7ab	823.0a	-515.0a	308.0a	6.33bc	74.7ab
	硅镁肥配施	2 720.0a	1 893.7ab	2 216.0ab	826.3a	-504.0a	322.3a	6.26c	74.0b
	锌镁肥配施	2 628.3b	1 802.0b	2 118.7b	826.3a	-509.7a	316.7a	6.54bc	76.2a
	硅锌镁肥配施	2 782.7a	1 963.7a	2 283.7a	819.0ab	-499.0a	320.0a	6.22c	73.6b
2021	常规施肥(对照)	2 208.7c	1 546.3c	1 736.7c	662.3c	-472.0a	190.3a	6.76a	76.2a
	增施硅肥	2 423.7ab	1 650.7ab	1 815.7ab	773.0ab	-608.0b	165.0a	6.52a	73.8ab
	增施锌肥	2 264.3bc	1 594.0bc	1 760.7bc	670.3c	-503.7a	166.7a	6.65a	74.9a
	增施镁肥	2 243.0bc	1 574.0bc	1 749.0c	669.0c	-494.0a	175.0a	6.67a	75.3a
	硅锌肥配施	2 515.7a	1 671.0a	1 837.7a	844.7a	-678.0bc	166.7a	6.41ab	73.6ab
	硅镁肥配施	2 483.3ab	1 684.0a	1 828.0a	799.3ab	-655.3bc	144.0a	6.43ab	73.2ab
	锌镁肥配施	2 319.3b	1 609.0b	1 780.7b	710.3b	-538.7ab	171.7a	6.59a	74.4a
	硅锌镁肥配施	2 564.3a	1 706.7a	1 851.7a	857.7a	-712.7c	145.0a	6.23b	72.2b

同一年份同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。



同一年份图上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 增施中微量元素肥料对稻米食味值的影响

Fig.1 Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on rice taste score

2.4 增施中微量元素肥料对水稻经济效益的影响

增施中微量元素肥料对水稻经济效益的影响如表 7 所示。施用中微量元素肥料可以提高水稻产量,从而增加产值,其中,硅肥及其与锌肥、镁肥配合施用处理的产量增加较多,水稻新增产值相对较高;施用中微量元素肥料处理增加了肥料购买和施肥成本,从而增加了生产成本,本研究中,由于硅肥的施用量较大,使硅肥及其与锌肥、镁肥配合施用处理成本增加较多。从综合新增经济效益看,2 年的平均值也以硅肥及其与锌肥、镁肥配合施用处理经济效益最高。

2.5 硅肥、锌肥、镁肥在水稻产量和稻米食味值中的解释度

增施硅肥、锌肥、镁肥在水稻产量和稻米食味值中的解释度如图 2 所示。解释度是某个自变量对因变量的影响程度和解释能力,多元回归分析结果表明,增施硅肥、锌肥、镁肥在水稻产量中的解释度分别为 57.21%、5.70%、1.99%;增施硅肥、锌肥、镁肥在稻米食味值中的解释度分别为 31.20%、7.05%、1.89%。说明,中微量元素肥料对水稻产量和稻米品质影响力的大小均表现为硅肥>锌肥>镁肥。

表 7 增施中微量元素肥料对水稻经济效益的影响

Table 7 Effects of increasing the application of medium and trace element fertilizers on the economic benefits of rice

年份	处理	产量 (kg/hm^2)	产值 (元,1 hm^2)	新增产值 (元,1 hm^2)	增加成本 (元,1 hm^2)	新增效益 (元,1 hm^2)
2020	常规施肥(对照)	8 905.9	22 264.8	–	–	–
	增施硅肥	9 947.7	24 869.2	2 604.4	900	1 704.4
	增施锌肥	9 285.0	23 212.4	947.6	165	782.6
	增施镁肥	9 206.3	23 015.7	750.9	210	540.9
	硅锌肥配施	10 084.0	25 210.1	2 945.3	1 050	1 895.3
	硅镁肥配施	9 991.4	24 978.6	2 713.8	1 095	1 618.8
	锌镁肥配施	9 238.9	23 097.2	832.4	345	487.4
	硅锌镁肥配施	10 120.2	25 300.4	3 035.6	1 245	1 790.6
2021	常规施肥(对照)	8 774.9	21 937.3	–	–	–
	增施硅肥	9 367.0	23 417.6	1 480.3	900	580.3
	增施锌肥	9 181.0	22 952.4	1 015.1	165	850.1
	增施镁肥	9 120.9	22 802.3	865.0	210	655.0
	硅锌肥配施	9 498.4	23 746.0	1 808.7	1 050	758.7
	硅镁肥配施	9 400.2	23 500.5	1 563.2	1 095	468.2
	锌镁肥配施	9 256.5	23 141.3	1 204.0	345	859.0
	硅锌镁肥配施	9 660.6	24 151.5	2 214.2	1 245	969.2

稻谷单价按照当地当年的收购价格 1 kg 2.5 元,硅肥、锌肥、镁肥的单价按照 1 kg 2.5 元、7.0 元、10.0 元计算;增加成本还包括硅肥、锌肥、镁肥、硅肥+锌肥、硅肥+镁肥、锌肥+镁肥、硅肥+锌肥+镁肥的施用成本,分别按 666.7 m^{2}10 元、4 元、4 元、13 元、13 元、6 元、16 元折算。

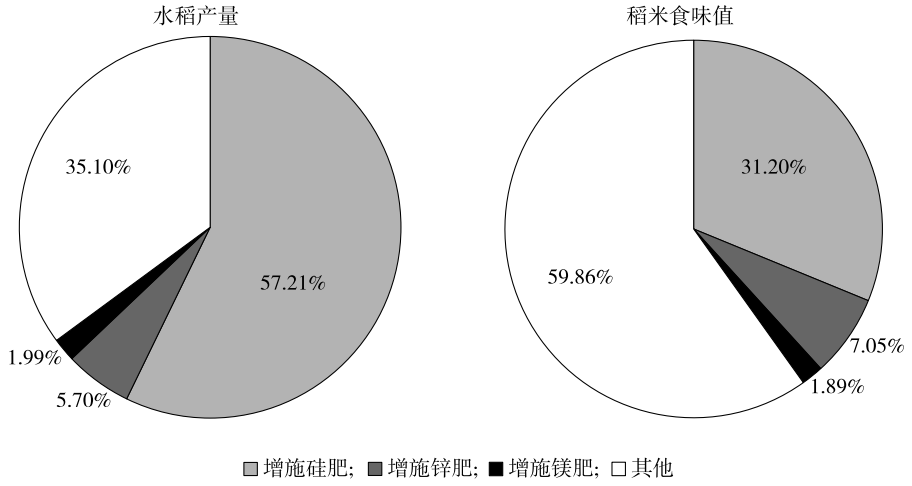


图 2 硅、锌、镁元素肥料在水稻产量和稻米食味值中的解释度

Fig.2 The explanatory power of silicon, zinc, and magnesium fertilizers for rice yield and taste score

3 讨 论

中微量元素硅、锌、镁等作为水稻光合生产、干物质转运、器官建成、籽粒灌浆等生长发育过程的重要底物[16-17],能够直接影响水稻的产量形成。前人研究结果表明,氮肥配施硅肥能促进水稻生长和养分吸收利用,提高水稻产量[18-19];基肥施用锌肥能够提高不同水稻品种的产量,通过基施锌肥配合开花期叶面喷施锌肥能够进一步提高水稻产量[20];硅肥和锌肥配合施用,在不同土壤类型[21]和不同施用方式[22]下均能够大幅度提高水稻产量。此外,杨瑞翔等[23]的研究结果表明,福建省水稻区土壤相对缺

少镁元素,施用镁肥能够增加土壤交换性镁的供应量,增强水稻的光合作用能力,提高水稻的干物质积累,最终显著提高水稻产量。本研究结果表明,施用硅锌镁肥能够提高水稻产量,产量提高的主要原因是水稻单位面积穗数和结实率的大幅度提高,与前人的研究结果基本一致。同时,本研究结果表明,单施硅肥较锌肥和镁肥对水稻单位面积穗数提高幅度相对较大,这和商全玉等[24]的研究结果(施用硅肥能够通过显著提高水稻穗数,从而获得水稻高产)基本一致。本研究结果还表明,硅锌镁肥配合施用对水稻产量的提高具有一定的协同效应,可能与硅、锌、镁等在水稻生长发育过程中分别发挥不同的生理功能、对水稻产量的提升具有叠加效益有关[25]。但也有研究报道,施用硅锌肥等中微量元素对水稻增产效果不明显,可能主要与该研究地区土壤中微量元素含量背景值较高有关[26];同时,部分地区较高的土壤 pH 值,伴随长时间淹水条件下的稻田,可能会通过降低土壤中交换性硅、锌[21]元素的含量,从而影响补施硅锌肥对水稻的增产效果。

大量研究结果表明,中国稻田耕层土壤硅[27]、锌[28]、镁[23]等中微量元素含量总体偏低,补施中微量元素肥料不仅能提高水稻产量,还能提高稻米品质。施用硅肥能显著提高稻米的出糙率、精米率和整精米率等加工品质指标[29],降低垩白度和垩白粒率等指标,从而提高稻米外观品质[30],降低稻米直链淀粉和蛋白质含量,提高蒸煮食味品质[31]。施用锌肥可以提高稻米吸水率和膨胀率,改善其蒸煮食味品质[32];此外,锌元素除了能提高稻米的香气物质含量[33],还能促进稻米蒸煮过程中风味物质的水解来提升食味品质[34]。施用镁肥能够提高稻米的加工和外观品质[35]。硅锌肥料配施研究结果表明,水稻倒 4 叶期土壤追施硅肥和抽穗期叶面喷施锌肥,能够有效提高优良食味稻米的整精米率,增加香气,提升食味品质[22]。但关于硅锌镁配施对稻米品质影响研究的报道尚不多,本研究结果表明,增施硅肥、锌肥、镁肥及其配施总体能够提升稻米的加工、外观、营养和蒸煮食味品质,最终提升稻米食味值;其中,硅肥对提升稻米食味值的效果相对最好;同时,硅肥、锌肥和镁肥三者配合施用,对提高水稻产量和提升稻米品质存在一定的协同效应。这与前人的研究结果基本一致。但也有研究结果表明,水稻穗肥配施硅肥会显著增加稻米垩白度和垩白粒率而降低其外观品质,增加蛋白质含量使稻米的食味品质降低[36],在拔节孕穗期配施锌肥和镁肥,虽然能够改善稻米的加工品质和营养品质,却也降低了稻米的外观品质和蒸煮食味品质[37]。这可能与不同研究中微量元素肥料的施用时间以及试验地土壤类型不同有关[38]。

4 结 论

增施中微量元素硅肥、锌肥、镁肥及其配合施用均能一定程度提高水稻产量,产量提高的主要原因是水稻单位面积穗数和结实率的提高;施用中微量元素肥料增加了水稻的干物质生产量,最终提高生物产量,也是水稻籽粒产量提高的重要原因。同时,施用中微量元素肥料还能不同程度提升稻米品质,从而实现水稻生产的量质同步提升。从提高经济效益,以及中微量元素对水稻产量和稻米品质影响力的角度考虑,水稻生产实践中应当主要重视硅肥的施用。关于施用中微量元素对不同类型水稻品种产量和稻米品质的影响,以及不同中微量元素的最佳施用时期值得进一步研究;此外,从长期来看,同一田块可能不需要每年都重复施用中微量元素肥料,其施用机制有待深入研究。

参考文献:

[1] 周 甜,吴少华,康建宏,等. 不同种植模式对水稻籽粒淀粉含量及淀粉关键酶活性的影响[J]. 中国水稻科学,2024,38(3):303-315.

[2] 李建平,李俊杰,李文娟,等. “十四五”期间我国水稻增产潜力与实现路径[J]. 农业经济问题,2021,42(7):25-37.

[3] 张昌泉,赵冬生,李钱峰,等. 稻米品质性状基因的克隆与功能研究进展[J]. 中国农业科学,2016,49(22):4267-4283.

[4] 赵 飞,刘 建,曹高燚,等. 水稻品质育种与优质化栽培问题的探讨[J]. 杂交水稻,2022,37(2):1-6.

[5] 赵庆勇,朱 镇,张亚东,等. 播期和地点对不同生态类型粳稻稻米品质性状的影响[J]. 中国水稻科学,2013,27(3):297-304.

[6] 胡 群,夏 敏,张洪程,等. 氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2016,42(11):1666-1676.

[7] 文春燕,熊运华,王 萍,等. 减施化肥配施不同有机肥对优质籼稻产量和品质的影响[J]. 土壤,2023,55(2):280-287.

[8] 吴玉红,李艳华,王 吕,等. 陕南稻区紫云英稻草联合还田配施减量氮肥协同提升水稻产量与稻米品质[J]. 中国水稻科学,2023,37(6):628-641.

[9] 杨建昌,袁莉民,唐 成,等. 结实期干湿交替灌溉对稻米品质

及籽粒中一些酶活性的影响[J]. 作物学报,2005,31(8):1052-1057.

[10] 杜 敏,郭 智,顾克军,等. 收获期对不同生育类型优良食味粳稻稻米品质的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(6):1303-1311.

[11] 娄运生,于玉洁,刘 燕,等. 施硅对夜间增温下南方水稻生长、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报,2023,34(4):985-992.

[12] NAIK S K, DAS D K. Relative performance of chelated zinc and zinc sulphate for lowland rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2008,81(3):219-227.

[13] 张玉龙,刘鸣达,王耀晶,等. 施用钢渣对土壤和水稻植株中硅、铁、锰的影响[J]. 土壤通报,2003,34(4):308-311.

[14] 赵春芳,岳红亮,黄双杰,等. 南粳系列水稻品种的食味品质与稻米理化特性[J]. 中国农业科学,2019,52(5):909-920.

[15] 唐 健,唐 闯,郭保卫,等. 氮肥施用量对机插优质晚稻产量和稻米品质的影响[J]. 作物学报,2020,46(1):117-130.

[16] 孙 亮,徐 益,蔡 沁,等. 中微量元素对水稻产量和品质的影响研究进展[J]. 中国农业科技导报,2024,26(8):9-19.

[17] 许佳莹,朱练峰,禹盛苗,等. 硅肥对水稻产量及生理特性影响的研究进展[J]. 中国稻米,2012,18(6):18-22.

[18] 潘韬文,陈 俣,蔡昆争. 硅肥和氮肥配施对优质稻植株养分含量、产量和品质的影响[J]. 生态与农村环境学报,2021,37(1):120-126.

[19] MALAV J K, RAMANI V P, SAJID M, et al. Influence of nitrogen and silicon fertilizer on yield and nitrogen and silicon uptake by rice (*Oryza saliva* L.) under lowland conditions [J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2017, 21(8): 45-49.

[20] 苏素苗,康天恺,邹家龙,等. 不同水稻品种和施锌方式对水稻产量及籽粒锌有效性的影响[J]. 中国农业科学,2024,57(15):3023-3034.

[21] 马朝红,汪应城,陈家贵,等. 硅、锌肥配合施用对水稻生长和产量的影响[J]. 湖北农业科学,2014,53(24):5956-5958.

[22] 魏晓东,宋雪梅,赵 凌,等. 硅锌肥及其施用方式对南粳 46 产量和稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学,2023,37(3):295-306.

[23] 杨瑞翔,黄文卿,邱昌颖,等. 福建省水稻镁肥效应及推荐用量[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(8):1515-1528.

[24] 商全玉,张文忠,韩亚东,等. 硅肥对北方粳稻产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学,2009,23(6):661-664.

[25] 胡 坤,喻 华,冯文强,等. 中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响[J]. 生态学报,2011,31(8):2341-2348.

[26] 郭九信,隋 标,商庆银,等. 氮锌互作对水稻产量及籽粒氮、锌含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(6):1336-1342.

[27] 渠 悦,马 涛,胡月明,等. 从化区农田耕层土壤有效硅空间分布及影响因素[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(6):989-998.

[28] 王子腾,耿元波,梁 涛. 中国农田土壤的有效锌含量及影响因素分析[J]. 中国土壤与肥料,2019(6):55-63.

[29] 李小为,任学坤,殷微微,等. 白浆土型水稻土施硅肥对水稻产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2008(6):67-69.

[30] 张国良,戴其根,王建武,等. 施硅量对粳稻品种武育粳 3 号产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学,2007,21(3):299-303.

[31] 杜同庆,徐 鹏,刘秀秀,等. 淮北地区不同时期喷施硅肥对水稻生育及产量和品质影响研究[J]. 北方水稻,2018,48(4):24-26,30.

[32] SHIVAY Y S, PRASAD R, RAHAL A. Genotypic variation for productivity,zinc utilization efficiencies,and kernel quality in aromatic rices under low available zinc conditions[J]. Journal of Plant Nutrition,2010,33(12):1835-1848.

[33] KHEYRI N, NOROUZI H A, MOBASSER H R, et al. Effects of silicon and zinc nanoparticles on growth, yield, and biochemical characteristics of rice[J]. Agronomy Journal,2019,111(6):3084-3090.

[34] WANG R, MI K L, YUAN X J, et al. Zinc oxide nanoparticles foliar application effectively enhanced zinc and aroma content in rice (*Oryza sativa* L.) grains[J]. Rice,2023,16(1):36.

[35] 杨文祥,李刚华,王强盛,等. 镁对稻米食味品质的影响[J]. 江苏农业学报,2007,23(3):166-171.

[36] 赵海成,李红宇,陈立强,等. 硅氮配施对寒地水稻产量品质及抗倒性的影响[J]. 上海农业学报,2018,34(4):36-42.

[37] 李 军,肖丹丹,邓先亮,等. 镁锌肥追施时期对优良食味粳稻产量及品质的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(8):1448-1463.

[38] 王 力,孙 影,张洪程,等. 不同时期施用锌硅肥对优良食味粳稻产量和品质的影响[J]. 作物学报,2017,43(6):885-898.

(责任编辑:陈海霞)