

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.05.016

吴嘉浩, 王靖, 段晓亮, 等. 氮素管理对水稻产量和食味品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 126-132.

WU J H, WANG Q, DUAN X L, et al. Effect of nitrogen management on yield and eating quality of rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(5): 126-132.

氮素管理对水稻产量和食味品质的影响

吴嘉浩^{1,2}, 王靖¹, 段晓亮¹, 张东¹, 孙辉¹✉

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食品质营养研究所, 北京 100037;
2. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要: 氮素管理对于保证水稻产量、提高食味品质具有重要的调控作用。近年来, 过量氮肥施用大幅提升了水稻产量但由此造成的环境污染、增加种植成本、危害人类健康引起了广泛关注。同时, 消费者更加关注水稻食味品质, 因此如何在保证水稻产量的前提下提高食味品质成为该领域的研究热点。从水稻产量、淀粉和蛋白质特性以及食味品质的角度, 综述了对水稻进行优化氮素管理的国内外研究现状, 分析了现阶段水稻氮素管理在实际应用中存在的问题, 并对其发展前景进行了展望, 以期今后水稻生产中的氮素管理提供重要参考, 实现高产和更好的食味品质。

关键词: 氮素管理; 水稻; 产量; 食味品质; 氮肥

中图分类号: TS210 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)05-0126-07

网络首发时间: 2024-08-28 10:18:53

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240827.1459.004>

Effect of Nitrogen Management on Yield and Eating Quality of Rice

WU Jia-hao^{1,2}, WANG Qian¹, DUAN Xiao-liang¹, ZHANG Dong¹, SUN Hui¹✉

(1. Institute of Food Quality and Nutrition Research, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Nitrogen management plays a crucial regulatory role in ensuring rice yield and improving eating quality. In recent years, the significant increase in rice yield has largely relied on the excessive application of nitrogen fertilizers. However, the overuse of nitrogen in rice cultivation has raised widespread concerns due to its contribution to environmental pollution, increased production costs, and risks to human health. At the same time, consumer attention has increasingly shifted towards the eating quality of rice. Therefore, the challenge of improving eating quality while maintaining rice yield has become a key focus of research in this field. This paper reviewed the current domestic and international research on optimizing nitrogen

收稿日期: 2024-02-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFE117800-1)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No. 2022YFE117800-1)

作者简介: 吴嘉浩, 男, 2000 年出生, 在读硕士生, 研究方向为稻谷品质形成机理等相关性, E-mail: 649833759@qq.com

通信作者: 孙辉, 女, 1971 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为粮食品质与标准化, E-mail: sh@ags.ac.cn

management for rice, with a particular focus on rice yield, starch and protein characteristics, and eating quality. It also analyzed the practical issues associated with nitrogen management in rice production and discussed the prospects of nitrogen management in rice cultivation. This study provided valuable insights for future nitrogen management in rice production, aiming to achieve both high yield and enhanced eating quality.

Key words: nitrogen management; rice; yield; eating quality; nitrogen fertilizer

水稻 (*Oryza sativa*) 是世界上最重要的主食作物之一, 其栽种适应性强, 产量高且稳定, 经济价值高, 每年播种面积和总产量都位居粮食作物的第一位, 为东南亚人提供了超过 76% 的热量摄入, 是中国粮食安全稳定生产的重要组成部分。中国的水稻产量占全球水稻产量的 30%^[1-2], 是主要的水稻生产国。二十一世纪以来, 全国种植水稻的面积大约占种植粮食总面积的 27%, 同时年粮食总产量中的 43% 为稻谷产量^[3]。

氮肥是水稻生长发育中不可缺少的肥料, 也是提高全球农业生产率和农民收入的基本要素, 施用氮肥可以提高水稻产量, 改善稻谷品质。现在施用的氮肥主要包括尿素、磷铵、硫酸铵等。同时氮肥还会影响生态系统 (如通过水和空气污染)、气候稳定性和人类健康^[4-5]。化学氮肥的成本相对较低, 它的施用对农业经济有很大好处^[6], 但化学氮肥的生产需要消耗大量能源, 而提供这些能源所需要的化石燃料燃烧时会产生大量的氮氧化物^[7], 因此氮肥生产和施用过程中产生的排放物会对生态系统产生有害影响, 具有很高的社会成本影响^[8-9]。另外过量施氮易导致食品中的硝酸盐含量超标, 且在此过程中会由亚硝酸盐与胺类物质结合形成强致癌物 N-亚硝基化合物。中国水稻产量的提高在很大程度上依赖于过量的氮肥投入^[10]和不同生长阶段的氮素调节。虽然中国只有全球 8% 的可耕地, 但其施氮量却达到了全球合成氮肥使用总量的 25%。在传统的氮素管理中, 中国农民为了确保高产, 普遍施用 150~250 kg/hm² 的氮肥, 甚至超过 300 kg/hm², 这远高于全世界的平均施氮量^[11]。水稻生产过程中施氮过量的现象造成了许多潜在的健康和经济问题^[12]。

一些证据表明, 持续增加的氮肥可能会减缓

谷物产量的上升, 导致产量停滞, 甚至下降^[13-14]。而且诸多研究表明稻米食味变差与施氮量的提高显著正相关^[15]。综上, 传统的氮素管理方法需要改进, 以满足用较少资源增加产量的双重要求^[16], 并满足消费者的多重需求^[17]。因此, 有必要为中国的水稻可持续生产建立合适的氮素管理方法^[18]。

本文从水稻产量、淀粉和蛋白质特性以及食味品质详细阐述了氮素管理对于水稻营养特性的影响的国内外应用研究现状, 总结了现阶段水稻施氮的问题, 并对其在生产中的发展前景进行展望, 为氮素管理在我国的实际应用和生产领域的研究提供参考。

1 氮素管理对水稻产量的影响

在产量方面, 增加氮肥有利于提高水稻产量, 但过多的氮肥施用不仅会降低水稻产量, 还会造成氮肥资源的浪费和环境污染^[19]。以往的研究也报道了水稻产量先增后减的现象, 随着施氮量的增加, 水稻产量也随之减少^[20-21]。CHENG 等的研究中表明当施氮量超过 300 kg/ha 时, 产量不会随着施氮量的增加进一步提高, 施氮量在 100 和 200 kg/ha 与 200~300 kg/ha 之间的产量没有明显差异^[22]。同时, 有研究表明产量会随着施氮次数的增加呈上升趋势^[23]。目前最常见的氮素管理方法有因地制宜的氮素管理、实时氮素管理和延迟施氮。

1.1 因地制宜的氮素管理

因地制宜的氮素管理 (Site-specific n management, SSNM) 是为了提高水稻的氮肥利用效率而开发的^[24]。气候因素 (太阳辐射和温度) 和当地氮供应在很大程度上影响着作物对氮的需求。在该方法中, 氮的施用时间和次数是固定的, 而氮的施用量则因季节和地点而异^[25]。根据 HE

等 2004、2005 年在湖北省的种植研究中发现^[23]，与传统氮素管理方法相比，SSNM 平均减少氮肥 32%，提高产量 5%。当总氮肥用量从 195 kg/hm² 减少到 133 kg/hm² 时，产量有小幅提高，并比传统氮素管理方法节省了 32%。SSNM 的氮响应比传统氮素管理方法高出 28%。由于农艺氮利用效率反映的是施氮与不施氮处理下水稻产量的变化，因此消除了不同研究中环境因素的影响。调整氮素管理是提高氮素利用效率的一个重要而有效的策略。SSNM 在农艺氮利用效率方面比传统氮素管理方法高出一倍，施用氮的部分要素生产率比传统氮素管理方法高出 55%^[26]。

1.2 实时氮素管理模式

实时氮素管理模式 (Real-time nitrogen management, RTNM) 是按照每周 1 次实时测定结果是否低于设定的叶绿素仪或叶色卡阈值来确定是否追施氮肥用量。根据生长期适当调整，RTNM 可以实现田块尺度的氮肥精量管理^[27]。水稻产量会随着叶绿素仪阈值的提高而增加，不同水稻品种通过氮素管理达到最高产量时的叶绿素仪阈值不同，当叶绿素仪阈值过高时会导致产量降低，主要原因是氮肥用量过大会降低有效穗数、千粒重和结实率^[23]。

1.3 延迟施氮

延迟施氮在施氮量相同的情况下可增加氮的回收效率和氮的总积累。在生长初期施用更多的肥料，氮的回收效率却很低，这可能是在生长初期，水稻根系发育不完善，很难吸收在此阶段施用的较多氮。由于作物竞争小，大量的氮被土壤微生物吸收，导致其固定化，必须重新矿化后才能提供给植物^[28]。

氮肥利用率可以通过调整分蘖肥和穗肥的施氮量来显著提高。不同生长阶段施氮对产量的影响不同。研究表明，在不同生长阶段施用适当的氮肥及其合理分配有助于获得高产。对于水稻的施肥一般分为三个阶段：基肥 (Basic fertilizer of nitrogen)、分蘖肥 (Tillering fertilizer of nitrogen)、穗肥 (Panicle fertilizer nitrogen)，通过减少水稻生长后期的总施氮量 (穗肥) 以及减少施氮比例

和施氮量，可以提高水稻的产量和食味品质。改变传统的氮素管理方式，可以在不牺牲产量的前提下改善水稻的食味品质，甚至可以略微提高产量^[29]。稻米的食味品质与其蛋白质含量有非常密切的关系。之前的一些研究证实，在稻米中，蛋白质的增加会明显降低食味品质。水稻中的蛋白质含量会随着氮肥施用量的增加而增加，同时在生长后期施氮 (穗肥) 更会显著增加水稻的蛋白质含量，导致食味品质下降^[30]。

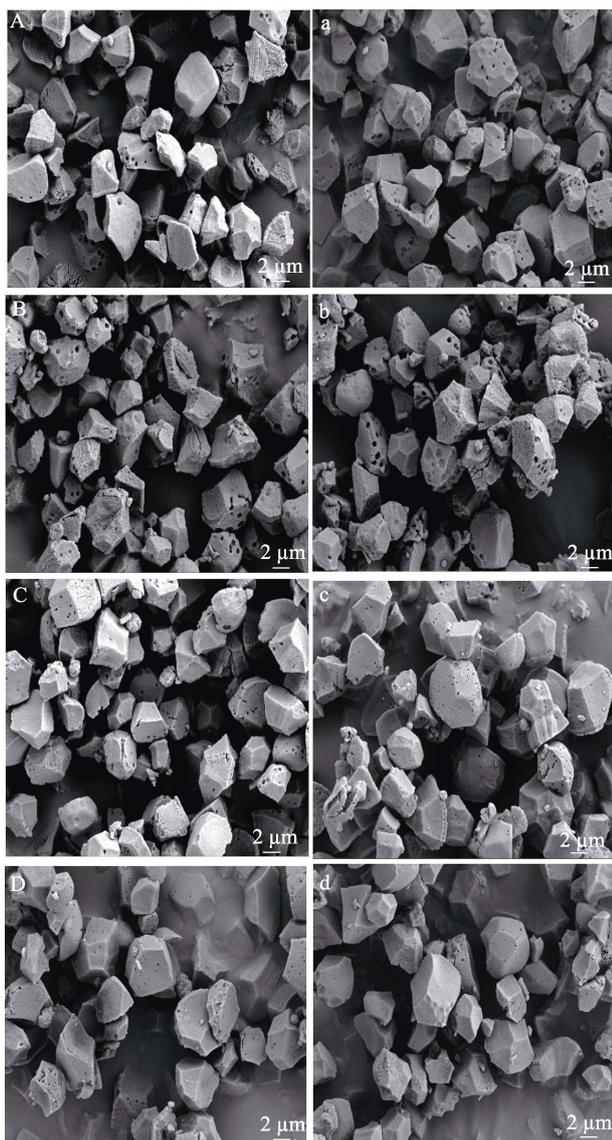
总之，不论使用哪种氮素管理方式对于水稻的产量均有很大的帮助，有时也可以尝试不同的方法共同使用以达到更好的效果，根据不同的环境和条件，使用不同的方法以达到所需要的效果，为氮素管理在我国生产领域的研究和实际应用提供参考。

大多数条件下，改变传统的氮素管理方式，适当减少总施氮量和后期施氮量，不仅不会造成减产，还能进一步保护环境，提高资源利用率，也可以实现水稻的增产和优质。

2 氮素管理对稻米淀粉结构和理化特性的影响

通过调整氮肥施用量可以有效地调节和优化水稻的淀粉含量和食味品质。氮肥对水稻的淀粉粒形态有明显影响。ZHOU 的研究表明优化氮肥施用可改善淀粉颗粒的形态，如图 1 所示，优化后的氮素管理方法与传统氮素管理方法相比，其大淀粉颗粒的数量逐渐增加，淀粉颗粒表面的凹痕减少^[31]。

如图 1 所示，虽然淀粉颗粒的分布模式不受处理的影响，但不同施氮处理在数量、体积和表面积方面仍存在差异。将传统氮素管理方法与未施氮肥比较，在高氮输入条件下，小颗粒淀粉颗粒的数量、体积和表面积都显著增加^[32]。将优化后的氮素管理方法与传统氮素管理方法进行比较，结果表明虽然氮肥降低了淀粉颗粒的大小，但优化氮肥施用可增加淀粉颗粒的大小。因此，氮肥与淀粉粒的外观有关。通过氮肥的适量施用可促进谷粒充实和淀粉合成，淀粉颗粒也更光滑。但过量施氮会导致更多的中小颗粒形成。



注：A 为未施氮肥、B 为当地施氮、C 为优化施氮 1、D 为优化施氮 2，种植密度均为 13.3 cm×30 cm；a 为未施氮肥、b 为当地施氮、c 为优化施氮 1、d 为优化施氮 2，种植密度均为 10.7 cm×30 cm^[31]。

Note: A is no nitrogen fertilizer, B is local nitrogen application, C is optimized nitrogen application 1 and D is optimized nitrogen application 2, all planted at a density of 13.3 cm×30 cm; a is no nitrogen fertilizer, b is local nitrogen application, c is optimized nitrogen application 1 and d is optimized nitrogen application 2, all planted at a density of 10.7 cm×30 cm^[31].

图 1 优化氮肥施用对淀粉颗粒的形态

Fig.1 Optimized nitrogen fertilizer application on the morphology of starch granules

对于淀粉的糊化特性，在不同的施氮水平下表现出了显著差异。随着氮肥施用量的增加，峰值粘度、衰减值和最终粘度先升高后降低，回生值和糊化温度先降低后升高。不同氮肥处理对峰值时间的影响不显著^[33]。根据分析表明，在低氮投入量范围内，稻米质量有所提高，但在高氮投

入量范围内，稻米质量有所下降。在优化氮肥的处理条件下，衰减值较高，回生值较低，这表明煮熟的稻米在蒸煮过程中没有变硬^[34]。所以，稻米食味品质随着氮肥施用量的增加而降低。然而，通过优化氮肥施用，可以恢复稻米的品质。

对于淀粉的热特性，糊化温度（开始温度（ T_o ）、糊化峰值温度（ T_p ）和结束温度（ T_c ））和糊化焓（ ΔH_{gel} ）在不同处理之间存在显著差异。随着氮含量的增加， T_o 、 T_p 、 T_c 和 ΔH_{gel} 先降低后升高。糊化温度越高，烹饪温度越高，烹饪时间越长。不同氮含量下的糊化温度不同，可能是由于淀粉颗粒大小、直链淀粉含量和直链淀粉精细结构的不同造成的。 ΔH_{gel} 高表明相对晶体浓度高，淀粉颗粒组织程度高。据报道，淀粉颗粒的大尺寸和直链淀粉的长链限制了无定形区的水分合作，抑制了结晶度的凝胶化，提高了糊化温度^[35]。氮肥会提高糊化温度，而淀粉凝胶在高氮肥条件下易发生逆流和粘连，相比之下，优化的氮肥施用方法将在这些方面改善水稻淀粉的质量。

总之，优化后的氮肥方法会改善谷粒品质。在适量施用氮肥时，淀粉粒表面随着淀粉粒径的增大而更光滑；直链淀粉长支链比例降低，短支链比例增加，相对结晶度低，结构有序度降低，淀粉粒外围无定形结构含量增加；峰值粘度、衰减值增加，而回生值和糊化温度降低；糊化温度、糊化焓降低，而硬度和粘度增加。氮肥施用量过高时，稻米品质下降，稻米淀粉的结构和理化性质出现相反的结果。这些结果表明，氮肥对水稻淀粉的结构和理化性质有显著影响，适当施肥可提高稻米的品质。

3 氮素管理对稻米蛋白质的影响

通过调整氮肥施用量可以有效地调节水稻的蛋白质含量和食味品质。已有的一些研究证实，在水稻中，蛋白质的增加会明显降低食味品质^[36-37]。但有的研究认为，水稻中的蛋白质含量会随着氮肥施用量的增加而增加，而且施氮率明显加剧了蛋白质含量的变化，蛋白质含量的变化与氮的空间和时间分布有关。蛋白质含量多会影响大米的

吸水率, 从而影响粘性。在淀粉糊化的过程中, 水和淀粉之间的作用一定程度被蛋白质的二硫键阻断, 所以较高的蛋白质含量总是与硬度、较高的糊化焓、较低的粘附性以及较差的食味和烹饪质量有关。

虽然可以调节施氮总量和施氮次数, 但在水稻不同生长阶段的施氮效果完全不同。施用分蘖肥可以促进水稻分蘖的发生, 而施用穗肥对食味品质有很大影响^[30]。生长后期施用氮肥会显著提高水稻的蛋白质含量, 导致食味品质下降。CHENG 的研究结果发现, 氮肥的前期和后期施用量与蛋白质含量呈正相关。同时, 蛋白质含量在分蘖期施氮时有所下降。因此, 通过调整氮肥可以有效调节和优化水稻的蛋白质含量和食味品质^[19]。

4 氮素管理对稻米食味品质的影响

在食味品质方面, 蛋白质含量的变化对食味品质有很大的影响。维生素、氨基酸和蛋白质等均为稻米中的营养组分。已有研究表明, 蛋白质的含量和质量与稻米的营养品质和营养成分的丰富程度明显相关^[38], 随着维生素和氨基酸等含量的增加, 稻米的营养品质会显著提升^[39]。稻谷籽粒中主要为贮藏蛋白, 同时水稻的贮藏蛋白可以根据溶解度的差异分为谷蛋白、醇溶蛋白、球蛋白和清蛋白, 其中谷蛋白约占稻米总蛋白质含量的 80%, 含量较低的是清蛋白和球蛋白。必需氨基酸含量是衡量蛋白质质量的指标。谷蛋白中的甘氨酸、精氨酸和赖氨酸营养价值高, 易被人体吸收和利用, 而醇溶蛋白中的赖氨酸含量较低, 不易被吸收消化, 所以醇溶蛋白的营养价值低于谷蛋白^[40]。

一般来说食味值较高的稻米, 蛋白质含量较低^[41-43], 蛋白质含量大于 7% 时食味品质变差, 在 6%~7% 稻米食味品质较好^[44]。人工感官评价是稻米最常用最直接的评价方式。通常来说, 醇溶蛋白会妨碍淀粉糊化时网状结构的发展, 消化性较差; 谷蛋白营养价值较高, 消化性较好。另有研究发现^[45], 总蛋白含量低于 10%, 蛋白质组分与糊化特性参数无显著相关性, 其含量对蒸煮食味品质影响较小; 总蛋白含量高于 10%, 醇溶蛋

白含量与峰值粘度、衰减值呈负相关, 这表明在蛋白质含量较高时, 随着醇溶蛋白含量的增加, 稻米的蒸煮食味品质降低。另有研究发现^[46]在减少蛋白质含量的同时, 醇溶蛋白含量较低的稻米食味品质能够得到改善。

有研究发现, 稻米的蒸煮食味品质会随着谷蛋白含量/醇溶蛋白含量的上升而明显降低, 而每个籽粒中的蛋白质总含量不会发生明显变化。虽然谷蛋白的营养价值较高, 但其对食味品质的负面作用也不能被忽视^[47-49]。

5 展望

现代水稻生产的一大挑战是如何以较低的环境成本实现高产和优质的双重目标。过量的氮肥施用不仅会导致食味品质的下降, 还会对环境与健康安全造成严重的影响。优化氮素管理是一种重要的调控策略, 可以根据不同地点、不同环境进行调整, 具有降低成本、过程简单可控、提高产量、提高营养价值的优势。

本文综述了当前对水稻进行优化氮素管理的研究现状。现阶段, 由于对水稻产量的需求已经基本得到满足, 消费者更加关注水稻的质量, 特别是食味品质, 所以对于安全性具有更为严苛的要求。在今后的实验研究中需着重从以下方面开展持续性科研攻关: (1) 环境与气候方面。不同地区的土壤环境存在差异, 对于氮肥的利用率也有所不同, 因此要进一步进行实验验证该地区的最适氮肥施用方法。同时, 每年的气候条件也会有所差异, 要根据不同的条件进行灵活的调整。(2) 食味品质方面。进一步深入理解淀粉与蛋白质之间的相互影响关系, 现阶段多数研究集中在淀粉与蛋白质分别对于食味品质的影响, 对于其相互作用产生的影响较少, 这将是未来亟需关注的重点研究领域。

综上, 优化氮素管理具有广阔的应用前景, 未来持续深入开展高效、安全的氮肥对于水稻营养特性的研究、评价、内在机制的阐述研究十分重要, 将为优化氮素管理提供技术支撑, 为解决我国和世界其他类似地区的生产和污染问题具有重要意义。

参考文献:

- [1] MELISSA A F, SUSAN R M, ROBERT D H. Not just a grain of rice: the quest for quality[J]. Trends in Plant Science, 2009, 14(3): 133-139.
- [2] FAO F. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division (FAOSTAT)[J]. 2017.
- [3] 杨雪. 水肥处理对优质食味水稻产量和品质的影响[D]. 天津: 天津农学院, 2011.
YANG X. Different fertilizer and water treatments on rice yield and quality palatability[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2011.
- [4] GOUREVITCH J D, KEELER B L, RICKETTS T H. Determining socially optimal rates of nitrogen fertilizer application[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 254: 292-299.
- [5] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. Proceedings of The National Academy of Sciences, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [6] YIN Y, YING H, XUE Y, et al. Calculating socially optimal nitrogen (N) fertilization rates for sustainable N management in China[J]. Science of The Total Environment, 2019, 688: 1162-1171.
- [7] XIA Y, YAN X. Comparison of statistical models for predicting cost effective nitrogen rate at rice-wheat cropping systems[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2011, 57(2): 320-330.
- [8] JACOBSEN B H, GREN M, HOLLAND M, et al. Costs and benefits of Nitrogen in the Environment[M]. European Nitrogen. Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press, 2011: 513-540.
- [9] GU B, GE Y, REN Y, et al. Atmospheric reactive nitrogen in China: sources, recent trends, and damage costs[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(17): 9420-9427.
- [10] CUI Z, ZHANG H, CHEN X, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature, 2018, 555(7696): 363-366.
- [11] ZHANG X, DAVIDSON E A, MAUZERALL D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. Nature, 2015, 528(7580): 51-59.
- [12] WANG Y, LU Y. Evaluating the potential health and economic effects of nitrogen fertilizer application in grain production systems of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121635.
- [13] BALINDONG J L, WARD R M, LIU L, et al. Rice grain protein composition influences instrumental measures of rice cooking and eating quality[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 35-42.
- [14] WANG Q, HUANG J, HE F, et al. Head rice yield of "super" hybrid rice Liangyoupeiiju grown under different nitrogen rates[J]. Field Crops Research, 2012, 134: 71-79.
- [15] TANG J, TANG C, GUO B, et al. Effect of nitrogen application on yield and rice quality of mechanical transplanting high quality late rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(1): 117-130.
- [16] SUN C, CHEN L, ZHAI L, et al. National assessment of nitrogen fertilizers fate and related environmental impacts of multiple pathways in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123519.
- [17] CALINGACION M, LABORTE A, NELSON A, et al. Diversity of global rice markets and the science required for consumer-targeted rice breeding[J]. Plos One, 2014, 9(1): e85106.
- [18] LI M, FU Q, SINGH V P, et al. Sustainable management of land, water, and fertilizer for rice production considering footprint family assessment in a random environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120785.
- [19] CHENG B, JIANG Y, CAO C. Balance rice yield and eating quality by changing the traditional nitrogen management for sustainable production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312: 127793.
- [20] WEI H Y, WANG Y J, MENG T Y, et al. Response of yield, quality and nitrogen use efficiency to nitrogen fertilizer from mechanical transplanting super japonica rice[J]. The Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 488-496.
- [21] LI X, WANG Y, CHENG C, et al. Effects of nitrogen application on yield and quality of high-quality conventional late *Japonica* rice in South China[J]. China Rice, 2019, 25(1): 29-33.
- [22] CHENG C, ZENG Y J, WANG Q, et al. Effects of nitrogen application regime on japonica rice yield and quality of the late rice in the double rice system in Southern China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(5): 1386-1395.
- [23] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 123-132.
HE F, HUANG J L, CUI K H, et al. Effect of real-time and site-specific nitrogen management on rice yield and quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(1): 123-132.
- [24] DOBERMANN A, WITT C, DAWE D, et al. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia[J]. Field Crops Research, 2002, 74(1): 37-66.
- [25] CASSMAN K, DOBERMANN A, CRUZ P S, et al. Soil organic matter and the indigenous nitrogen supply of intensive irrigated rice systems in the tropics[J]. Plant and Soil, 1996, 182: 267-278.
- [26] PENG S, BURESH R J, HUANG J, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by sitespecific N management: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30: 649-656.
- [27] PENG S, GARCIA F, LAZA R, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice[J]. Field Crops Research, 1996, 47(2-3): 243-252.
- [28] PAN S G, HUANG S Q, JING Z, et al. Effects of N management on yield and N uptake of rice in central China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(12): 1993-2000.
- [29] 成臣, 曾勇军, 王祺, 等. 施氮量对晚粳稻甬优 1538 产量、品质及氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 222-228.
CHENG C, ZENG Y J, WANG Q, et al. Effects of nitrogen application rates on japonica rice yield, quality, and nitrogen uptake and utilization during the late-rice cropping seasons in

- Southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 222-228.
- [30] WOPEREIS-PURA M, WATANABE H, MOREIRA J, et al. Effect of late nitrogen application on rice yield, grain quality and profitability in the Senegal River valley[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 17(3): 191-198.
- [31] ZHOU T Y, LI Z K, LI E P, et al. Optimization of nitrogen fertilization improves rice quality by affecting the structure and physicochemical properties of starch at high yield levels[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(6): 1576-1592.
- [32] ZHU D, ZHANG H, GUO B, et al. Effects of nitrogen level on structure and physicochemical properties of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 525-532.
- [33] ZHOU T, ZHOU Q, LI E, et al. Effects of nitrogen fertilizer on structure and physicochemical properties of 'super' rice starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 239: 116237.
- [34] SIMI C K, ABRAHAM T E. Physicochemical rheological and thermal properties of *Njavara* rice (*Oryza sativa*) starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(24): 12105-12113.
- [35] SINGH S, SINGH N, ISONO N, et al. Relationship of granule size distribution and amylopectin structure with pasting, thermal, and retrogradation properties in wheat starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(2): 1180-1188.
- [36] XU Y J, YING Y N, OUYANG S H, et al. Factors affecting sensory quality of cooked japonica rice[J]. Rice Science, 2018, 25(6): 330-339.
- [37] 石吕, 张新月, 孙惠艳, 等. 不同类型水稻品种稻米蛋白质含量与蒸煮食味品质的关系及后期氮肥的效应[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(6): 541-552.
- SHI L, ZHANG X Y, SUN H Y, et al. Relationship of grain protein content with cooking and eating quality as affected by nitrogen fertilizer at late growth stage for different types of rice varieties[J]. Rice Science, 2019, 33(6): 541-552.
- [38] 廖江林, 肖国樱, 李阳生, 等. 我国功能营养稻研究进展及发展对策[J]. 农业现代化研究, 2003, 24(3): 170-173.
- LIAO J L, XIAO G Y, LI Y S, et al. Developing progress and strategy of functional nutritional rice in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2003, 24(3): 170-173.
- [39] 江良荣, 李义珍, 王侯聪, 等. 稻米营养品质的研究现状及分子改良途径[J]. 分子植物育种, 2004, 2(1): 113-121.
- JIANG L R, LI Y Z, WANG H C, et al. Research progresses on nutrient quality of rice grain and molecular breeding approach[J]. Molecular Plant Breeding, 2004, 2(1): 113-121.
- [40] 何莹. 水稻谷蛋白的质谱和 Western Blot 鉴定与贮藏蛋白分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- HE Y. Molecular identification of glutelin subunits by LC-MS/MS and western blot and analysis of seed storage protein composition in rice (*Oryza sativa* L.)[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [41] 张欣, 施利利, 刘晓宇, 等. 不同施肥处理对水稻产量、食味品质及蛋白质组分的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 104-108.
- ZHANG X, SHI L L, LIU X Y, et al. Effect of different fertilizer treatments on rice yield, grain quality and protein fraction content[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(4): 104-108.
- [42] 杨静, 罗秋香, 钱春荣, 等. 氮素对稻米蛋白质组分含量及蒸煮食味品质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(2): 145-150.
- YANG J, LUO Q X, QIAN C R, et al. Effect of nitrogen on the protein fractions content and cooking and eating quality of rice grain[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006, 37(2): 145-150.
- [43] 王丹英, 章秀福, 朱智伟, 等. 食用稻米品质性状间的相关性分析[J]. 作物学报, 2005, 31(8): 1086-1091.
- WANG D Y, ZHANG X F, ZHU Z W, et al. Correlation analysis of rice grain quality characteristics[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(8): 1086-1091.
- [44] WAKAMATSU K I, SASAKI O, UEZONO I, et al. Effect of the amount of nitrogen application on occurrence of white-back kernels during ripening of rice [*Oryza sativa*] under high-temperature conditions[J]. Japanese Journal of Crop Science (Japan), 2008, 77(4): 424-433.
- [45] 张启莉. 籼稻米蛋白质影响米饭蒸煮食味品质的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- ZHANG Q L. Rice proteins affect cooking and eating quality of cooked indica rice[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [46] 张欣, 施利利, 丁得亮, 等. 稻米蛋白质相关性状与 RVA 特征谱及食味品质的关系[J]. 食品科技, 2014, 39(10): 188-191.
- ZHANG X, SHI L L, DING D L, et al. The relationship between rice protein related character and the RVA characteristic profile and palatability character[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(10): 188-191.
- [47] 石吕. 水稻精米蛋白质含量与稻米品质变化的关系[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- SHI L. Relationship between milled rice protein content and rice quality changes[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [48] 韩展誉, 管弦悦, 赵倩, 等. 灌浆温度和氮肥及其互作效应对稻米贮藏蛋白组分的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(7): 1087-1098.
- HAN Z Y, GUAN X Y, ZHAO Q, et al. Individual and combined effects of air temperature at filling stage and nitrogen application on storage protein accumulation and its different components in rice grain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(7): 1087-1098.
- [49] 陆丹丹, 叶苗, 张祖建. 稻米蛋白质及其组分研究概况及其对稻米品质的影响[J]. 作物杂志, 2022, 38(2): 28-34.
- LU D D, YE M, ZHANG Z J. Research progress on rice protein and its components and their effects on rice quality[J]. Crops, 2022, 38(2): 28-34. ㊟