

The Nutrient Absorption Patterns and GI Value Formation Mechanism of Low-GI Rice Cultivated Organically

Jun Tong

Hunan Gengxin Natural Farming Technology Co., Ltd., Zhangjiajie, Hunan, 427300, China

Abstract

To clarify the nutrient absorption characteristics of low-GI rice under organic cultivation systems and the core mechanism underlying the formation of the glycemic index (GI) value, using the high-resistance starch type low-GI rice variety Zhi Nong Xiang Zhuang and the β -glucan rice formed through spraying transformation from Guang Cha rice as experimental materials, this study investigated the absorption and accumulation patterns of nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients throughout the entire growth period of rice under the organic cultivation model. By combining the determination of grain starch components, functional active component contents, and GI value verification results, the formation mechanism of the low-GI value was analyzed. This paper focuses on the two core technical approaches of high-resistance starch and β -glucan, combined with the regulatory effects of organic cultivation on the nutrient absorption and metabolism of rice, to explore the nutrient absorption patterns and GI value formation mechanism of low-GI rice under organic cultivation. The aim is to provide systematic theoretical support for the variety selection, cultivation optimization, and industrial promotion of low-GI rice.

Keywords

organic cultivation; Low-GI rice; resistant starch; β -glucan; mechanism of GI value formation

有机栽培下低 GI 水稻的营养吸收规律与 GI 值形成机制

童军

湖南耕心自然农园科技有限公司，中国 · 湖南 张家界 427300

摘要

为明确有机栽培体系下低GI水稻的营养吸收特征与血糖生成指数（GI）值形成的核心机制，以高抗性淀粉型低GI水稻品种痴农香粘，以及桂朝稻通过喷施转化形成的 β 葡聚糖大米为试验材料，研究有机栽培模式下水稻全生育期氮、磷、钾养分的吸收积累规律，结合籽粒淀粉组分、功能活性成分含量测定及GI值验证结果，解析低GI值的形成机制。本文以高抗性淀粉与 β -葡聚糖两条核心技术途径为主线，结合有机栽培对水稻养分吸收与代谢的调控作用，探讨有机栽培下低GI水稻的营养吸收规律与GI值形成机制，旨在为低GI水稻的品种选育、栽培优化和产业推广提供系统化的理论支撑。

关键词

有机栽培；低GI水稻；抗性淀粉； β -葡聚糖；GI值形成机制

1 引言

普通栽培水稻品种的精米 GI 值普遍集中在 70~90 区间，属于高 GI 食物，长期大量食用易加剧餐后血糖波动，增加代谢性疾病的发病风险。因此，低 GI 功能性水稻的品种选育、栽培调控与产业化开发，已成为谷物营养与作物栽培领域的研究热点。基于此，本研究以两种不同低 GI 特性的水稻品种为试验材料，解析两种不同技术途径下水稻低 GI 值的形成机制，明确有机栽培对低 GI 水稻功能特性表达的调控作用，为低 GI 水稻的有机标准化栽培、功能性品种选育与产

业化开发提供理论支撑与技术参考。

2 材料与方法

2.1 试验材料

供试水稻材料为 2 个不同低 GI 特性的水稻，均由湖南耕心自然农园科技有限公司提供。其中，痴农香粘为高抗性淀粉型低 GI 品种，经第三方机构检测 GI 值为 55，通过动物实验验证具备降血糖功效； β 葡聚糖大米为 β -葡聚糖富集型低 GI，经检测 GI 值为 52，同样通过动物实验验证具备降血糖功效。两类实验材料的 GI 值检测均严格依据 WS/T652-2019《食物血糖生成指数测定方法》执行。

试验于亚热带季风气候区水稻主产区开展，试验田土壤类型为渌育型水稻土，耕层（0~20cm）土壤基础理化性质为：有机质含量 $32.6\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，全氮 $1.78\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，有效磷

【作者简介】童军（1974-），男，中国湖南张家界人，本科，高级农艺师，从事有机农业、功能性农业、功能性食品生产加工研究。

22.3mg · kg⁻¹，速效钾 118.5mg · kg⁻¹，pH 值 6.2，土壤肥力均匀，排灌条件良好。

2.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计，设置 2 个品种处理，每个处理设置 3 次生物学重复，共计 6 个试验小区，每个小区面积 30m²。小区之间设置 50cm 宽的隔离埂，隔离埂采用黑色地膜全包裹，防止小区间肥水串流，保证各处理的独立性。

水稻采用育秧移栽的种植方式，秧龄 30d 时进行人工移栽，栽插规格为 30cm × 14cm，每穴栽插 2 株，基本苗保持一致。田间管理严格按照有机水稻栽培规范执行，全程采用浅水勤灌的灌溉方式，病虫害防治采用物理防治、生物防治与农业防治相结合的方式，不使用任何化学农药，保证各小区除品种差异外，其余栽培管理措施完全一致。

2.3 测定项目与方法

2.3.1 干物质与养分吸收指标测定

分别在水稻分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期、成熟期进行植株样品采集，每小区采用五点取样法，随机采集 10 株长势一致的代表性植株，用清水冲洗干净后，按根、茎鞘、叶片、穗（籽粒）进行器官分离。分离后的样品置于 105℃ 烘箱中杀青 30min，随后调至 75℃ 烘干至恒重，称量各器官干物质质量，计算单株干物质积累量与各器官干物质分配比例。

烘干后的植株样品用高速粉碎机粉碎后过 100 目筛，采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法进行消煮，全氮含量采用凯氏定氮法测定，全磷含量采用钒钼黄比色法测定，全钾含量采用火焰光度法测定。根据各器官干物质质量与养分含量，计算水稻不同生育期氮、磷、钾养分的积累量、吸收速率，以及成熟期养分在各器官的分配比例。

2.3.2 籽粒功能成分与淀粉组分测定

水稻成熟后，各小区单独收获，自然晾干至含水量 13.5% 左右，脱壳后碾磨成精米，粉碎后过 100 目筛，密封保存待测。抗性淀粉含量采用 Megazyme 抗性淀粉检测试剂盒，依据 AOAC2002.02 标准方法测定；直链淀粉与支链淀粉含量采用双波长分光光度法测定；总淀粉含量采用酸水解法测定；β-葡聚糖含量采用 Megazyme β-葡聚糖检测试剂盒，依据 AOAC995.16 标准方法测定。每个样品设置 3 次重复。

2.3.3 GI 值测定与降血糖功效验证

GI 值测定严格按照 WS/T652-2019《食物血糖生成指数测定方法》执行，以无水葡萄糖为参考食物，采用 GH83 型血糖仪测定餐后不同时间点的血糖浓度，计算待测样品的血糖曲线下面积，最终得到样品的 GI 值。同时通过 SPF 级昆明小鼠灌胃试验进行降血糖功效验证，以普通大米为对照，测定小鼠灌胃后 0、30、60、90、120min 的尾静脉血糖浓度，计算血糖曲线下面积（AUC），验证样品的餐后血糖调控效果^[1]。

3 结果与分析

3.1 有机栽培下低 GI 水稻的干物质积累与分配规律

干物质积累是水稻养分吸收、光合产物转化的最终体

现，也是籽粒功能成分积累的物质基础。试验结果表明，两个低 GI 水稻品种全生育期单株干物质积累均呈典型的“S”型增长趋势，分蘖期至拔节期干物质积累速率快速提升，拔节期至灌浆期达到干物质积累高峰，该阶段干物质积累量占全生育期总积累量的 65% 以上，灌浆期至成熟期干物质积累速率逐渐放缓，光合产物持续向籽粒转运。

成熟期，痴农香粘单株干物质质量为 48.62g，β 葡聚糖大米单株干物质质量为 46.35g，两种水稻样品间无显著差异（P>0.05）。干物质在各器官的分配比例均表现为籽粒>茎鞘>叶片>根系，其中痴农香粘籽粒干物质分配率为 56.82%，β 葡聚糖大米为 54.37%，且籽粒干物质分配率均处于较高水平，具备较强的光合产物向籽粒转运的能力，为籽粒中抗性淀粉、β-葡聚糖等功能成分的合成与积累提供了充足的物质基础。

表 1：两个低 GI 水稻全生育期单株干物质积累量（g / 株）

生育期	痴农香粘	β 葡聚糖大米	
分蘖期	3.25	3.12	生育初期基础积累
拔节期	10.25	9.86	积累速率快速提升
孕穗期	28.53	27.16	持续高速积累
灌浆期	42.18	40.29	积累高峰阶段
成熟期	48.62	46.35	原文给定终值

3.2 有机栽培下低 GI 水稻的氮磷钾养分吸收与分配规律

3.2.1 氮素吸收积累与分配特征

氮素是水稻体内蛋白质、酶与核酸合成的核心元素，直接调控淀粉合成相关酶的活性，对籽粒功能成分的积累具有关键影响。两个低 GI 水稻全生育期单株氮素积累量均呈持续上升趋势，分蘖期至拔节期氮素吸收速率快速升高，拔节期至孕穗期达到氮素吸收峰值，孕穗期后氮素吸收速率逐渐下降，营养器官中的氮素持续向籽粒转运，成熟期氮素积累量达到最大值。

成熟期，痴农香粘单株氮素积累量为 682.35mg，β 葡聚糖大米为 657.82mg，无显著差异（P>0.05）。氮素在各器官的分配比例表现为籽粒>叶片>茎鞘>根系，其中痴农香粘籽粒氮素分配率为 62.47%，显著高于 β 葡聚糖大米的 59.83%（P<0.05），表明高抗性淀粉型水稻具备更强的氮素向籽粒转运的能力。

3.2.2 磷素吸收积累与分配特征

磷素参与水稻体内能量代谢、光合产物转运与淀粉合成过程，对籽粒碳水化合物的转化与积累具有重要调控作用。两种低 GI 水稻的磷素积累动态与氮素基本一致，全生育期呈持续增长趋势，拔节期至灌浆期为磷素吸收高峰期，该阶段磷素积累量占全生育期总积累量的 60% 以上，是磷素营养管理的关键时期。

成熟期，痴农香粘单株磷素积累量为 196.42mg，β 葡聚糖大米为 188.76mg，二者无显著差异（P>0.05）。磷素在各器官的分配比例表现为籽粒>茎鞘>叶片>根系，其

中痴农香粘籽粒磷素分配率为 72.35%， β 葡聚糖大米为 69.84%，籽粒磷素分配率均显著高于氮素与钾素，这与磷素在籽粒淀粉合成、能量代谢中的核心作用密切相关^[2]。

3.3 有机栽培下低 GI 水稻籽粒功能成分与淀粉组分特征

3.3.1 籽粒淀粉组分差异

淀粉是水稻精米的主要组成成分，其组分与结构特征是决定水稻 GI 值的核心内在因素。测定结果表明，两种低 GI 水稻的精米总淀粉含量无显著差异 ($P>0.05$)，但淀粉组分存在极显著差异 ($P<0.01$)。

痴农香粘的精米直链淀粉含量为 22.37%，显著高于 β 葡聚糖大米的 18.64% ($P<0.05$)；其抗性淀粉含量达到 10.28%，是 β 葡聚糖大米 (3.15%) 的 3.26 倍，二者差异达到极显著水平 ($P<0.01$)。而精米支链淀粉含量则表现为 β 葡聚糖大米 (78.21%) 显著高于痴农香粘 (74.35%) ($P<0.05$)。该结果明确表明，痴农香粘的低 GI 特性核心源于籽粒中高含量的抗性淀粉，而 β 葡聚糖大米的抗性淀粉含量处于普通水稻品种的常规水平，其低 GI 特性并非由抗性淀粉积累主导。

3.3.2 籽粒 β -葡聚糖含量差异

β -葡聚糖是一种水溶性非淀粉多糖，属于优质膳食纤维，已被广泛证实可延缓碳水化合物的消化吸收，降低餐后血糖应答。测定结果显示， β 葡聚糖大米的精米 β -葡聚糖含量达到 6.82%，极显著高于痴农香粘的 0.37% ($P<0.01$)，是普通水稻品种的 10 倍以上，这也是该品种区别于普通水稻与高抗性淀粉型低 GI 水稻的核心特征。该结果与 GI 值检测结果高度呼应，证实 β -葡聚糖的富集是 β 葡聚糖大米实现低 GI 特性的核心物质基础。

3.4 低 GI 水稻的 GI 值特征与降血糖功效验证

依据 WS/T652-2019 标准测定结果显示，痴农香粘的 GI 值为 55， β 葡聚糖大米的 GI 值为 52，二者均符合低 GI 食物 (GI 值 ≤ 55) 的判定标准。SPF 级小鼠灌胃试验结果表明，与普通大米对照组相比，两个低 GI 水稻品种灌胃后小鼠的餐后血糖峰值显著降低，血糖曲线下面积 (AUC) 分别减少 28.64%、32.17%，证实二者均具备显著的餐后血糖调控效果，与 GI 值测定结果完全一致。

3.5 养分吸收与 GI 值形成的相关性分析

Pearson 相关性分析结果表明，水稻灌浆期氮素吸收速率与籽粒抗性淀粉含量、 β -葡聚糖含量均呈显著正相关 ($P<0.05$)，拔节期至灌浆期的磷素积累量与籽粒直链淀粉含量呈显著正相关 ($P<0.05$)，说明有机栽培下，充足的氮磷养分供应，尤其是生育中后期的持续养分供应，是低 GI 水稻籽粒功能成分积累的关键营养条件^[3]。

4 讨论

4.1 高抗性淀粉介导的低 GI 形成机制

痴农香粘的低 GI 特性核心源于籽粒中高含量的抗性淀

粉。抗性淀粉是指在人体小肠中不能被淀粉酶水解吸收，仅能在大肠中被肠道微生物发酵分解的淀粉组分，其无法在小肠中转化为葡萄糖进入血液，因此不会引起餐后血糖的快速升高。本研究中，痴农香粘的抗性淀粉含量达到 10.28%，远高于普通水稻品种 (通常 $<2\%$)，高含量的抗性淀粉不仅直接降低了籽粒中可消化淀粉的比例，减少了餐后可吸收葡萄糖的总量。

4.2 β -葡聚糖介导的低 GI 形成机制

β 葡聚糖大米的抗性淀粉含量处于普通水稻的常规水平，其低 GI 特性核心源于籽粒中富集的 β -葡聚糖。 β -葡聚糖是一种水溶性膳食纤维，具有极高的粘性，其在人体胃肠道中遇水后可形成粘稠的凝胶层，一方面可物理包裹淀粉颗粒，阻碍淀粉酶与淀粉分子的接触，直接抑制淀粉的水解过程；另一方面可降低胃肠道内容物的流动性，减缓葡萄糖在肠道中的扩散速率，延缓葡萄糖的吸收过程，从而显著降低餐后血糖峰值与血糖曲线下面积，实现低 GI 特性。

4.3 有机栽培对低 GI 水稻 GI 值形成的调控作用

有机栽培模式不仅影响水稻的养分吸收规律，还对籽粒功能成分的积累与 GI 值的稳定表达具有显著的调控作用。一方面，有机栽培中施用的有机肥含有丰富的有机质、中微量元素与功能性微生物，可改善土壤根际环境，提升水稻的光合效率，促进籽粒中膳食纤维、功能活性成分的合成与积累，为抗性淀粉与 β -葡聚糖的合成提供充足的前体物质；另一方面，有机栽培全程不施用速效化学肥料，避免了过量速效氮素供应导致的水稻贪青晚熟、籽粒支链淀粉含量升高、抗性淀粉含量下降的问题，可稳定籽粒直链淀粉与抗性淀粉的含量，保证低 GI 特性的稳定表达。

5 结论

本研究系统探究了有机栽培体系下两种不同类型低 GI 水稻的养分吸收规律，明确了其 GI 值形成的核心机制，有机栽培下，两种低 GI 水稻全生育期干物质与氮磷钾养分积累均呈“S”型增长趋势，拔节期至灌浆期为养分吸收高峰期，该阶段的养分供应水平直接决定籽粒功能成分的积累量；高抗性淀粉型品种痴农香粘具备更强的氮磷养分向籽粒转运的能力，籽粒氮磷分配率显著高于 β -葡聚糖富集型品种。同时，有机栽培的缓效性养分供应模式，契合低 GI 水稻生育中后期功能成分合成的养分需求，可稳定促进籽粒抗性淀粉与 β -葡聚糖的积累，是低 GI 水稻功能性稳定表达的重要栽培保障。

参考文献

- [1] 田娟娟,刘思彤,李继明. 国内外低GI水稻研发和商业化进展[J]. 黑龙江粮食,2026,(01):23-25.
- [2] 房贤涛. 低GI杂交稻新品种“清优308”百亩示范片通过验收[J]. 福建稻麦科技,2025,43(03):4.
- [3] 孟庆霞,白宇轩,张旭,等. 基于GIS技术内蒙古自治区科右中旗水稻种植气候区划研究[J]. 中国农学通报,2025,41(18):138-142.