300代适应进化“练”出耐冻酵母，多组学揭示冷冻面团中的协同适应机制

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/43022.html

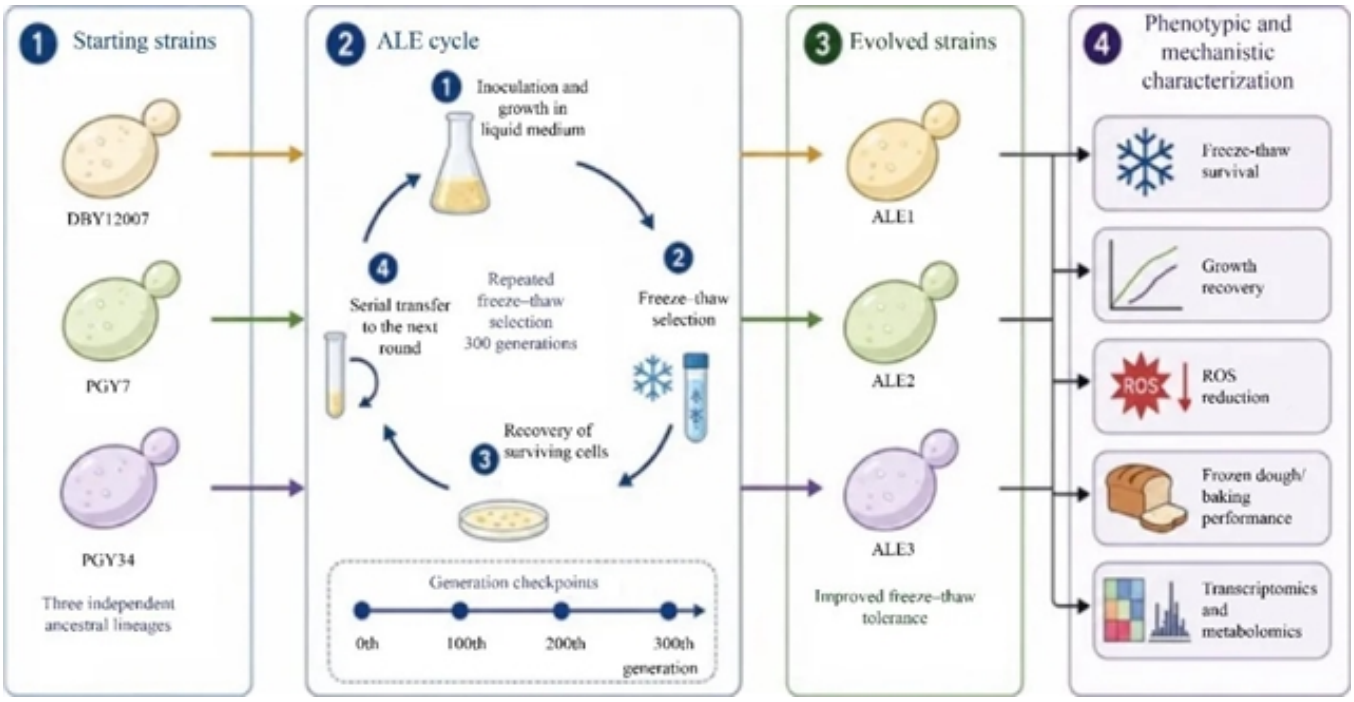
本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

300代适应进化“练”出耐冻酵母，多组学揭示冷冻面团中的协同适应机制。
引言：冷冻面团里的酵母活力，为什么是工业烘焙的关键问题？

冷冻面团技术能够实现集中生产、灵活排期和远距离配送，但冷冻与解冻过程会显著降低酵母活力。酵母不仅要在冰晶、脱水和渗透压变化中存活，还必须在解冻后快速恢复糖代谢并重新产气。若恢复延迟，往往会直接表现为面包体积下降、组织紧实和质构劣化。因此，真正适用于冷冻面团的酵母，需要同时具备冻得住和醒得快两种能力。

近日，江南大学未来食品科学中心陈坚院士团队陈安琪副研究员联合浙江一鸣食品股份有限公司，在中国工程院Engineering集群分刊ENGINEERING Foods上发表题为Integrated Multi-Omics Analysis Reveals Coordinated Remodeling Associated with Adaptive Evolution-Enhanced Freeze – Thaw Tolerance in Yeast研究论文。

研究利用适应性实验室进化（adaptive laboratory evolution，ALE），对三株不同遗传背景的酿酒酵母进行连续300代冻融选择，并从细胞表型、冷冻面团应用、生理状态到转录组和代谢组，建立了一条完整的选择—功能验证—机制解析证据链。



图文摘要：三株不同遗传背景的酿酒酵母经300代重复冻融选择后获得耐受性增强的进化群体，并进一步开展冷冻面团功能验证及多组学机制解析。

300代冻融选择：耐冻性显著提升，同时不牺牲正常生长

研究以DBY12007、PGY7和PGY34三株酿酒酵母为起点，分别构建ALE1、ALE2和ALE3三条独立进化线。每一轮均包括生长、冻融胁迫、存活细胞恢复和再次传代，并连续进行300轮选择。

结果显示，三条进化线的冻融存活率均明显提高，其中ALE1在第300代达到约89% – 96%，ALE2达到56% – 69%，ALE3达到26% – 29%。更重要的是，进化群体在非胁迫条件下的倍增时间并未出现系统性增加，说明耐冻性的获得没有以明显牺牲基础生长能力为代价。

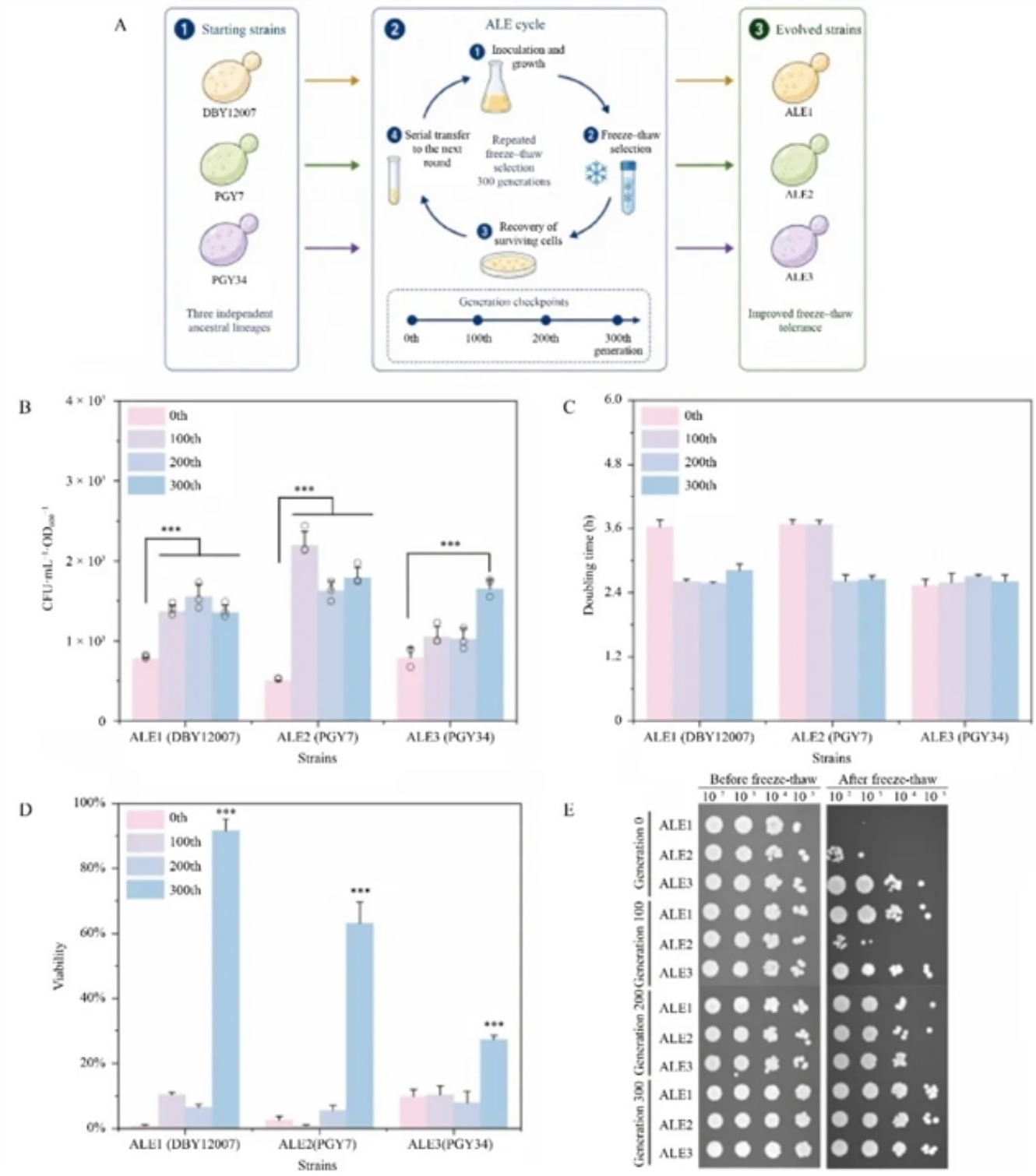


图1. 适应性实验室进化提高酵母冻融存活率，同时维持基础生长能力。三条独立进化线均经历300代重复冻融选择，其中ALE1的终点存活率提升最为显著。

从细胞到面包：耐冻表型真正转化为冷冻面团性能

实验室里的高存活率并不等同于工业价值，因此研究进一步将进化酵母放入冷冻面团体系验证。冷冻前，祖代与进化酵母发酵的面包在整体形态上差异不大；经过冷冻、解冻和再次发酵后，差

异明显放大。

祖代酵母对应的面包出现体积减小、面包心更紧实和结构塌缩，而进化酵母能够保持更好的膨胀和内部组织。质构分析进一步表明，进化酵母发酵的冷冻面包具有更高的比容，并表现出更低的硬度、胶黏性和咀嚼性，以及更好的弹性、内聚性和回复性。这说明ALE获得的不只是平板上的耐冻，而是能够转化为最终食品品质的功能性表型。

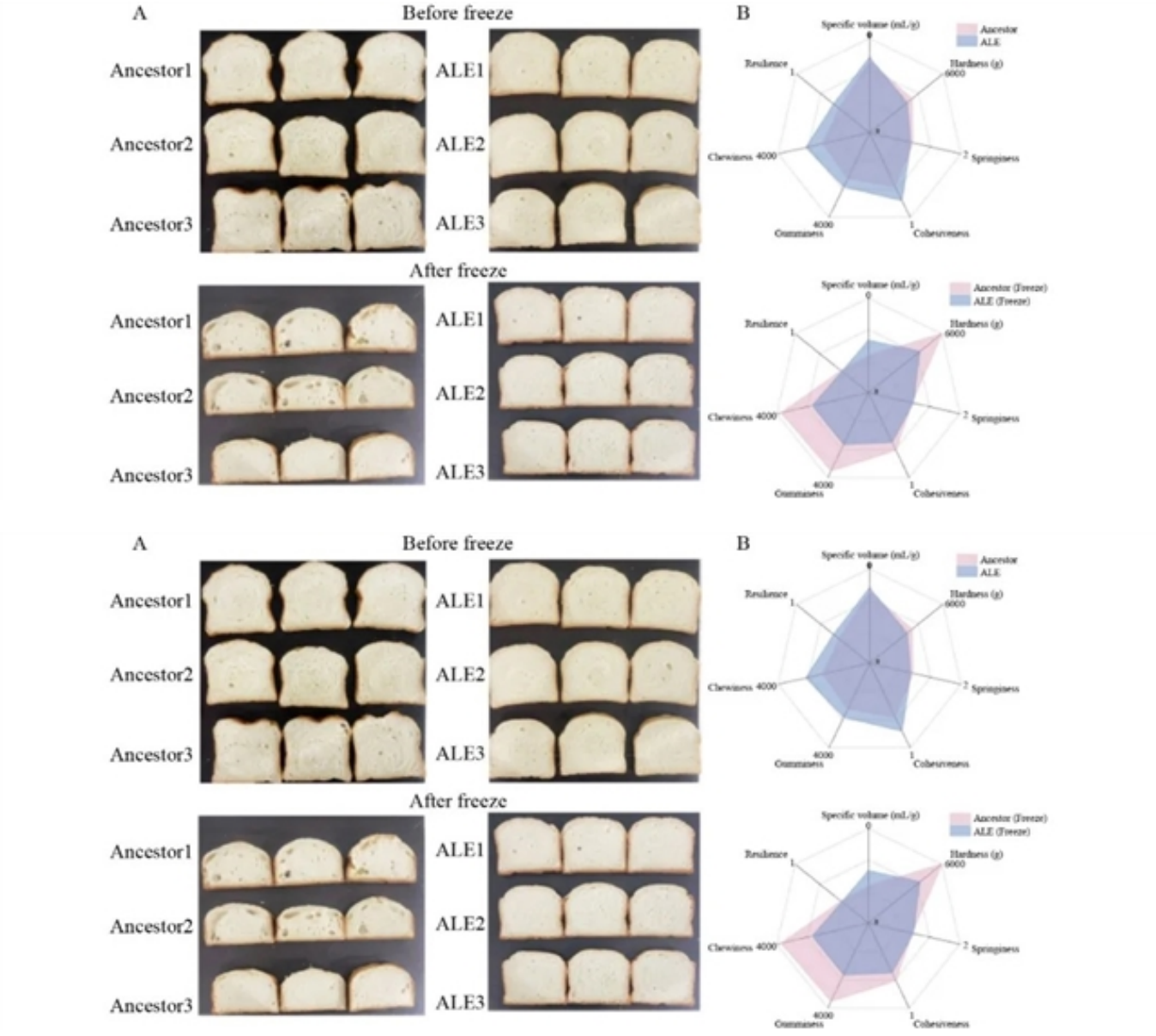


图2. 进化酵母改善冷冻面团的面包结构与质构保持。冷冻处理后，进化线对应面包保持了更好的膨胀、内部组织和综合质构表现。

解冻后醒得更快：恢复能力与氧化状态同步改善

为什么进化酵母在冷冻面团中表现更好？研究发现，在未经冷冻时，Ancestor1与ALE1的生长曲线基本重合；冻融之后，ALE1明显更早恢复生长，并更快恢复葡萄糖消耗和乙醇生成等发酵相关活动。这意味着ALE1不仅存活比例更高，存活细胞也能更快重新进入代谢状态。

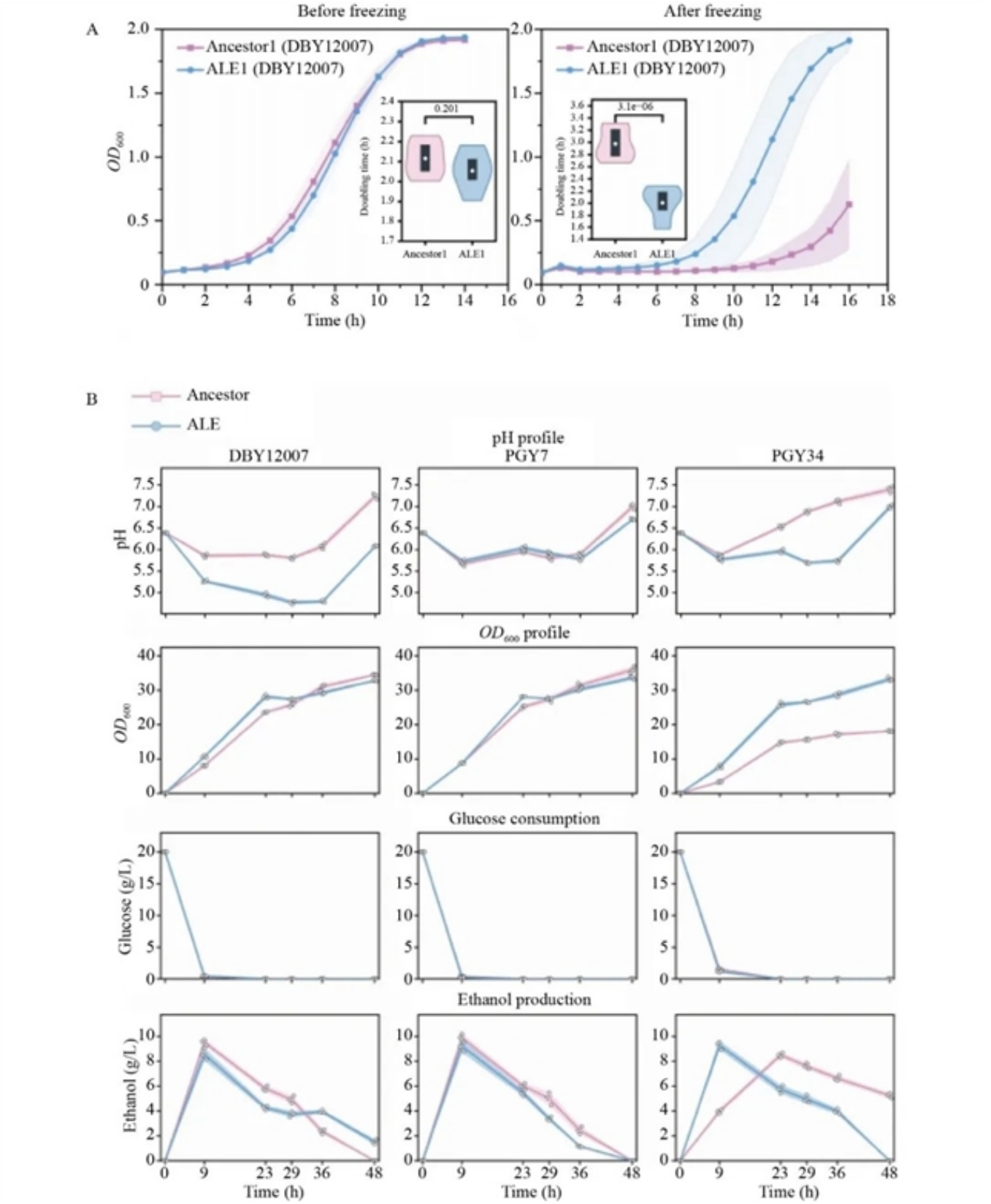


图3. ALE1在冻融后表现出更快的生长恢复和更强的发酵相关生理活性。

与此同时，三条进化线在冻融后的细胞内活性氧信号均低于对应祖代。ABTS 和 FRAP 结果进一步表明，进化并非简单地把抗氧化能力整体提高，而是重新调整了 ROS 生成、清除和

还原力维持之间的平衡。扫描电镜观察也显示，进化酵母在冻融后更能保持规则、完整的细胞包膜形态。

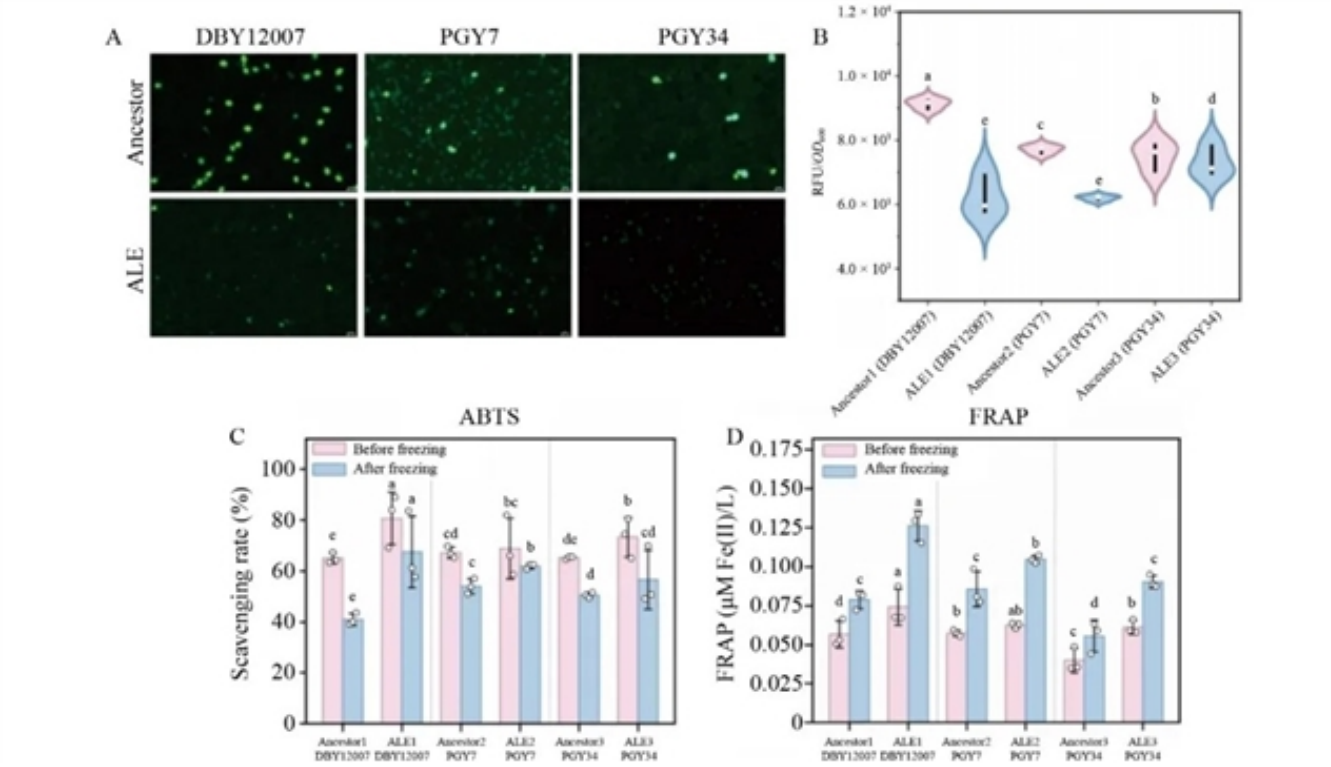


图4. 适应性进化降低冻融后的细胞内氧化负担，并伴随抗氧化相关能力的重新平衡。

多组学给出核心答案：四个功能模块协同重塑

针对表型最突出的ALE1，研究进一步开展转录组、代谢组及跨组学整合分析。结果表明，冻融耐受性并非由单一经典应激通路驱动，而是多个功能模块的协调变化。

跨组学分析将其归纳为四个主要方向：第一，增强碳源摄取与冻后恢复代谢，使细胞更快重启糖利用；第二，重分配氮和氨基酸代谢，为应激后的恢复提供新的资源配置；第三，重塑含硫氨基酸和谷胱甘肽相关氧化还原网络，实现动态的红氧平衡；第四，通过膜相关代谢和转运系统调整，提高细胞包膜在冻融过程中的稳定性。四个模块共同对应了更高的存活率、更低的氧化负担、更快的恢复速度和更好的冷冻面团性能。

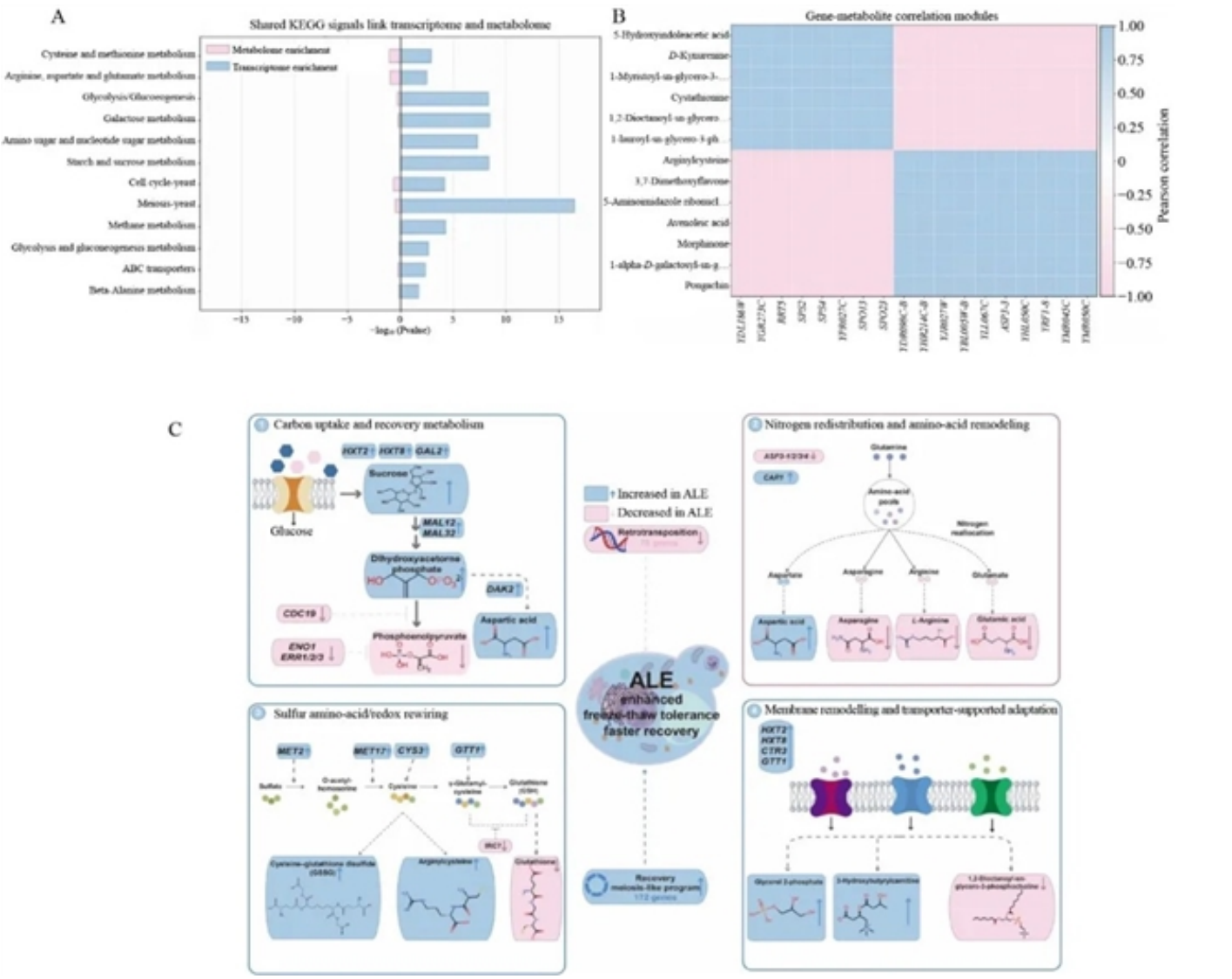


图5. 转录组与代谢组整合分析识别出与耐冻性增强相关的四类协同模块——碳摄取与恢复代谢、氮重分配与氨基酸重塑、含硫氨基酸/氧化还原重平衡，以及膜重建与转运适应。

研究意义：从耐受菌株到食品工业微生物种子工程

这项研究的价值不仅在于获得了更耐冻的酵母，更在于建立了一种面向食品工业复杂性状的微生物种子改良路径：无需预设单一目标基因，而是通过长期环境选择，让细胞在多个生理层面形成协调适应，再通过食品体系和多组学进行逐级验证。

当然，目前组学结果主要揭示的是关联而非直接因果。未来仍需要结合全基因组测序、单克隆分离和定向遗传验证，进一步锁定真正驱动耐冻表型的关键遗传变化。但这项工作已经证明，适应性进化可以把复杂的工业耐受性筛出来，并将其转化为可测量的食品加工性能，为冷冻食品及其他高胁迫发酵场景中的工业微生物选育提供了新的思路。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：https://journal.hep.com.cn/ef/EN/10.2738/ENGF.2026.0021

作者：陈坚 等 来源：《工程 · 食品》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发