邸子清, 孙大庆, 洪青平, 等. 复合菌发酵剂的筛选及其对东北黄米黏豆包理化性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 14−24. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020054
DI Ziqing, SUN Daqing, HONG Qingping, et al. Screening of Composite Starter and Its Effects on the Physicochemical Properties of Proso Millet Niandoubao in Northeast China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 14−24. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020054

·特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康（客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡）·

复合菌发酵剂的筛选及其对东北黄米黏豆包理化性质的影响

邸子清, 孙大庆*, 洪青平, 杜新蕊, 李洪飞
（黑龙江八一农垦大学食品学院, 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆 163319）

摘　要: 黏豆包是我国东北地区著名的传统特色食品，为解决传统自然发酵工艺与现代化生产标准之间存在的问题，开发黄米黏豆包优良发酵剂是一种有效且关键的方法。通过 10 组复合菌（编号 A~J）发酵性质的筛选和 6 组黏豆包（编号 NDB-B、NDB-C、NDB-D、NDB-J、NDB-RG、NDB-SF）多种理化和感官性质的比较分析，探究了 4 组复合菌对黄米黏豆包理化性质的影响。发酵实验结果表明，10 组发酵剂中 B、C、D、J 组复合菌在模拟酸面团培养基和黄米酸面团中同时体现了良好的协同生长和产酸能力，因此选择这 4 组复合菌进行黄米黏豆包的制作。黏豆包品质评价结果表明，与人工酸化和自然发酵黏豆包相比，4 组复合菌黏豆包的色度、消化、果聚糖、植酸、质构和感官性质均有一定程度的改善，其中 B 组复合菌黏豆包的 b^*值最大（42.92），D 组复合菌黏豆包果聚糖含量最低（5.55 g/100 g），J 组复合菌黏豆包的综合理化品质最佳。总之，研究结果表明 B、C、D、J 组复合菌可以明显改善黏豆包产品的多种理化性质和感官品质，10 组复合菌中 J 组复合菌是黄米黏豆包的最佳候选发酵剂，这些结果为今后东北黄米黏豆包工业化、标准化和现代化生产提供了优良、关键的发酵剂菌种资源。

关键词: 黏豆包, 发酵剂, 协同发酵, 质构, 感官, 乳酸菌, 酵母菌, 醋酸菌
中图分类号: Q939.97　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0014−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020054　　本文网刊:

Screening of Composite Starter and Its Effects on the Physicochemical Properties of Proso Millet Niandoubao in Northeast China

DI Ziqing, SUN Daqing*, HONG Qingping, DU Xinrui, LI Hongfei
（National Coarse Cereals Engineering Research Center, College of Food Science, Heilongjiang Key Laboratory of Agro-products Processing and Quality Safety, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China）

Abstract: Niandoubao is a famous traditional specialty food in Northeast China. Developing excellent starter for Niandoubao was an effective and crucial method to address the issue between traditional natural fermentation processes and modern production standards. By screening the fermentation properties of 10 groups of composite strains (numbered A~J) and comparative analyzing the various physicochemical and sensory properties of 6 groups of Niandoubao (numbered NDB-B, NDB-C, NDB-D, NDB-J, NDB-RG and NDB-SF), the influence of 4 groups of composite strains on the physicochemical properties of proso millet Niandoubao were explored. The fermentation experiment results showed that the

收稿日期: 2025−02−12
基金项目: 黑龙江省优秀青年教师基础研究支持计划项目（YQJH2024169）; 黑龙江八一农垦大学引进人才科研启动计划项目（XDB202009）; 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目（YJSCX2022-Y51）; 黑龙江省博士后面上资助项目（LBH-Z24252）; 黑龙江八一农垦大学引进人才科研启动基金项目（XDB202404）; 黑龙江八一农垦大学“三纵”科研支持计划基础培育项目（ZRCPY202228）。
作者简介: 邸子清（1997−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品微生物, E-mail: 2987345025@qq.com。
*** 通信作者:** 孙大庆（1979−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品微生物与生物技术, E-mail: sundaqing1979@163.com。

composite strains in groups B, C, D, and J in the 10 starter exhibited good synergistic growth and acid production ability in both simulated dough medium and proso millet sourdough. Therefore, these 4 groups of composite strains were selected for the production of proso millet Niandoubao. The quality evaluation results of Niandoubao showed that compared with artificially acidified and naturally fermented Niandoubao, the chroma, digestion, fructan, phytic acid, texture, and sensory properties of 4 groups of composite strains Niandoubao were improved to a certain extent. Among them, Group B composite strains Niandoubao had the highest b^* value (42.92), Group D composite strains Niandoubao had the lowest fructan content (5.55 g/100 g), and group J composite strains Niandoubao had the best comprehensive physicochemical quality. In summary, these results indicated that the composite strains in groups B, C, D, and J significantly improved the various physicochemical properties and sensory qualities of Niandoubao. Among the 10 groups of composite strains, the composite strains in group J were the best candidate starter for proso millet Niandoubao. These results provide excellent and key starter strain resources for the industrialization, standardization, and modernization of proso millet Niandoubao production in the future.

Key words: Niandoubao; starter; synergistic fermentation; texture; sensory; lactic acid bacteria; yeast; acetic acid bacteria

黄米黏豆包是我国东北地区一种具有代表性的传统特色食品。传统黏豆包以糯性黄米为面团主料, 其他谷物为辅料, 红芸豆为馅料, 面团自然发酵, 手工包馅成型, 蒸熟后得到成品。如今黏豆包不仅是一种传统特色小吃, 它还蕴含着东北地区丰富的节日礼仪和民俗文化, 是我国传统发酵面食的优良典范之一[1]。尽管黏豆包历史悠久, 但长期以来黏豆包的制作主要以农村家庭和小作坊式生产为主, 商品化率很低[2−3]。近 20 年, 随着城镇化和消费需求的不断发展, 出现了以黑龙江亚沟镇为代表的一大批黏豆包生产企业, 黏豆包商品开始进入城镇市场和超市, 传统黏豆包初步实现了规模化生产。然而由于黏豆包发酵理论和生产应用研究严重不足, 目前黏豆包生产企业仍然普遍采用传统自然发酵工艺进行生产, 传统工艺虽然可以保留黏豆包原有的感官和风味特征, 但传统工艺生产周期长、效率低, 产品质量不稳定, 食品安全存在较大风险隐患, 因此传统自然发酵工艺缺陷严重影响了黏豆包产品的规模化、标准化和现代化生产[4]。

解决黏豆包传统自然发酵工艺与现代工业化生产要求之间的矛盾, 关键是要实现黏豆包自然发酵过程的精准可控, 但现有研究表明, 自然发酵微生物群落受到复杂的生物和非生物因素影响, 菌群结构和功能的演替无法实现准确的设计和调控[5], 因此目前大多数工业化生产的发酵食品都采用接种食品级微生物菌种(发酵剂)的方式实现产品质量和安全的稳定、可控。同时, 已有研究证明, 复合菌种比单一菌种发酵剂在提高食品口感、风味和安全性等方面具有更强大的优势, 因为复合菌种比单一菌种更适合替代自然发酵菌群丰富的代谢产物和多样的发酵功能[6]。目前黏豆包酸面团中发现和鉴定的细菌和真菌种类繁多[1,3], 但已用于发酵剂开发和应用研究的种类很少, 主要集中于单一菌种的乳酸菌[7−8] 或酵母菌[9−10], 而采用多物种进行黏豆包复合菌发酵剂开发和应用的研究鲜有报道。近年, 课题组在前期研究中发现自然发酵黄米酸面团中优势微生物主要由乳酸菌、醋酸菌和酵母菌组成[11], 基于它们开发类似于自然发酵菌群的复合菌发酵剂对于稳定和控制黏豆包产品理化品质将具有积极的现实意义。

因此, 为了开发东北传统黄米黏豆包优良、专用的发酵剂, 在前期糯性黄米酸面团自然发酵菌群多样性和优势菌种鉴定研究基础上[11], 选取 10 个成熟黄米酸面团中原位优势菌种, 组合成 10 组复合菌发酵剂, 本文对 10 组复合菌发酵剂进行了发酵性质筛选及其对东北黄米黏豆包理化性质影响的研究, 希望为东北黄米黏豆包标准化和现代化生产提供优良、关键的发酵剂菌种资源。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

10 组复合菌发酵剂　共涉及 31 个微生物菌株, 包括 21 株乳酸菌、8 株酵母菌和 2 株醋酸菌, 其详细信息见表 1。所有实验菌株均由本实验室前期从 10 个自然发酵成熟黄米酸面团中分离、纯化、鉴定和保藏(相关内容待发表); 黄米原料　购自河北泥河湾农业发展股份有限公司; MRS、YPD、ABM 培养基　青岛海博生物技术有限公司; 牛胆盐、α-淀粉酶(3600 U/mL)、唾液淀粉酶(75 U/mL)、胃蛋白酶(3000 U/mL)、胰蛋白酶(100 U/mL)　上海源叶生物科技有限公司; 植酸钠　金克隆(北京)生物技术有限公司; 葡萄糖含量试剂盒(GOPOD 酶法)　苏州格锐思生物科技有限公司; 2-2 联吡啶、三氯乙酸、硫酸铁铵、巯基乙酸　山东麦克林科源生化有限公司; 0.22 μm 无菌滤膜　美国密理博(Millipore)公司; 上述试剂均为国产分析纯。

SHP-250F 型生化培养箱　上海森信实验仪器有限公司; MLS-3751L-PC 型高压蒸汽灭菌锅　日本松下健康医疗株式会社; Sorvall Legend Micro 21 型高速离心机　赛默飞世尔科技(中国)有限公司; SPECTROstar 型全波长酶标仪　BMG 科技(中国)有限公司; BSC-1360 Ⅱ A2 型生物安全柜　北京东联哈尔仪器制造有限公司; FE28-Standard 型便捷式 pH 计　梅特勒-托利多国际有限公司; CR-410 型色度仪　柯尼卡美能达(中国)投资有限公司; T35 型海氏蒸汽烤箱　青岛汉尚电器有限公司; TA.TOUCH

表 1 复合菌发酵剂菌株组成

Table 1 Strain member of composite starters

序号	复合菌发酵剂菌株组成	菌群类型	发酵剂编号
1	*Pediococcus pentosaceus* 31M09	I	A
2	*P. pentosaceus* 32M16+*Lactiplantibacillus plantarum* 32M13	I	B
3	*Torulaspora delbrueckii* 33Y02+*P. pentosaceus* 33P03+*Levilactobacillus brevis* 33M01+*Furfurilactobacillus rossiae* 33M13	II	C
4	*Saccharomyces.cerevisiae* 34Y03+*P. pentosaceus* 34M10+*Lac. plantarum* 34M14	II	D
5	*S. cerevisiae* 35Y03+*P. pentosaceus* 35M03+*Lac. plantarum* 35M01+*Fur. rossiae* 35M19	II	E
6	*S. cerevisiae* 36Y01+*P. pentosaceus* 36M11+*Lev. brevis* 36M12+*Lac. plantarum* 36P02	II	F
7	*S. cerevisiae* 37Y03+*P. pentosaceus* 37M09+*Lac. plantarum* 37M17	II	G
8	*S. cerevisiae* 38Y03+*P. pentosaceus* 38M02+*Acetobacter indonesiensis* 38D01	III	H
9	*S. cerevisiae* 39Y02+*P. pentosaceus* 39P03	II	I
10	*S. cerevisiae* 40Y01+*P. pentosaceus* 40P12+*Lev. brevis* 40M18+*Lac. plantarum* 40M03+*A. malorum* 40D02	III	J

注: I型表示只含有乳酸菌; II型表示同时含有乳酸菌和酵母菌; III型表示同时含有乳酸菌、酵母菌和醋酸菌。

型质构仪 上海保圣实业发展有限公司; KDN-18 型全自动凯氏定氮仪 上海纤检有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 单菌株活化培养 从−80 ℃ 冰箱取出保藏菌株, 融化后乳酸菌、酵母菌和醋酸菌以 1%(v/v)菌液分别接种到 MRS、YPD 和 ABM 液体培养基中, 30 ℃ 条件下培养 24 h。相同条件下活化培养两次。

1.2.2 复合菌在模拟面团培养基中生长和产酸能力的测定 模拟面团培养基(Simulated dough medium, SDM)制备: 100 g 黄米粉加入 900 g 蒸馏水中, 充分搅拌后静置 15 min, 8000 r/min 条件下离心 15 min, 上清液使用 0.22 μm 无菌滤膜过滤除菌。复合菌中单菌株均以 1∶1 的比例接种到 SDM 中, 30 ℃ 条件下培养 48 h。培养过程中, 分别在 0、4、8、10、20、24、36、48 h 取样, 用 pH 计测定菌液的 pH, 同时用 0.1 mol/L NaOH 溶液滴定菌液 pH 至 8.3[12], 总滴定酸度(TTA)结果表示为滴定 1 mL SDM 所消耗的 0.1 mol/L NaOH 溶液体积(μL)。培养结束后菌液用无菌生理盐水进行 10 倍梯度稀释, 100 μL 稀释液涂布在 MRS、YPD、ABM 平板上, 30 ℃ 培养 1~2 d 后进行计数。活菌计数结果以 lg CFU/mL(每 mL SDM 中菌落形成单位)表示。

1.2.3 黄米酸面团和黏豆包的制作 将所有菌株活化后的菌液用无菌生理盐水稀释到相同的吸光值(OD_{600}=0.01), 复合菌中单菌株均以 1∶1 的比例接种到和面蒸馏水中, 取 500 g 黄米粉、加入 350 g 蒸馏水, 混合成面团, 面团在 30 ℃ 下发酵 10 h。发酵结束后, 取适量面团, 加入提前制备好的豆沙馅, 手工搓揉成型后醒发 30 min, 在 100 ℃ 蒸制 20 min, 即得黄米黏豆包成品。自然发酵(SF)组酸面团未接种任何菌株, 面团在 30 ℃ 下发酵 40 h。人工酸化(RG)组酸面团没有进行发酵, 但利用乳酸将面团 pH 调至 4.5。SF 和 RG 组黏豆包其他制作方法均与复合菌黏豆包相同。

1.2.4 复合菌在原位黄米酸面团中生长和产酸能力的测定 复合菌中各单菌株均以 1∶1 体积的比例接种到 1.2.3 制作的黄米酸面团中, pH、TTA 和活菌计数操作与 1.2.2 相同。

1.2.5 黄米酸面团流变学性质的测定 取 5 g 1.2.3 制作的黄米酸面团样品, 放置在两块直径为 40 mm 的不锈钢平板之间, 预热 10 min 后开始测定。设置参数: 恒温 25 ℃, 应力 1.0%, 频率 0.1~20 Hz, 夹缝距离为 2 mm, 并在 1 h 内完成测定。记录测量过程中的储能模量和损耗模量, 损耗系数(tanδ)按下列公式计算。

$$\tan\delta = \frac{\text{损耗模量}}{\text{储能模量}} \qquad \text{式(1)}$$

1.2.6 黄米黏豆包色度的测定 1.2.3 制作的黄米黏豆包冷却至室温后开始用 CR-410 型色度仪进行产品颜色的测量[13]。L^*代表亮度(0~100 表示从黑色到白色), a^*代表红绿值(正值表示偏红, 负值表示偏绿), b^*代表黄蓝值(正值表示偏黄, 负值表示偏蓝)。

1.2.7 黄米黏豆包淀粉消化性质的测定 参照唐天培[14] 的方法并进行部分修改。取 0.5 g 黄米黏豆包样品于 50 mL 离心管中, 加入 25.0 mL KCl-HCl 缓冲液(pH1.5)、1 mL 胃蛋白酶(3000 U/mL), 在 37 ℃ 下加热 30 min, 调节 pH 为 7 后加入 20 mL 乙酸钠缓冲液(0.2 mol/L pH=5.2)、4 mL α-淀粉酶(3600 U/mL)、1 mL 糖化酶(2500 U/mL)。分别在第 0、20、40、60、90、120、150 和 180 min 取样, 放入沸水浴中加热 5 min。按照葡萄糖试剂盒说明测定各时间点样品中葡萄糖含量。采用《GB5009.9—2016》方法测定总淀粉含量。总淀粉(total starch, TS)、快消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)含量的计算公式如下:

$$TS = (G180 - G0) \times 0.9 \qquad \text{式(2)}$$

$$RDS(\%) = \frac{(G20 - G0) \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad \text{式(3)}$$

$$SDS(\%) = \frac{(G120 - G20) \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad \text{式(4)}$$

$$RS(\%) = 1 - \frac{(RDS + SDS)}{TS}$$　　式（5）

$$淀粉水解率(\%) = \frac{G \times 0.9}{TS} \times 100$$　　式（6）

式中：G0、G20、G120、G180 分别为水解 0、20、120、180 min 时释放的葡萄糖数量；0.9 为转换系数。

以淀粉水解率为纵坐标，时间为横坐标，绘制淀粉水解率曲线，计算曲线下面积（AUC）进而计算得出淀粉水解指数（HI），HI=AUC 样品/AUC 白面包×100。预期血糖指数（Expected glycemic index，eGI）计算公式如下：

$$eGI = 0.862 \times HI + 8.189$$　　式（7）

1.2.8　黄米黏豆包蛋白质消化率的测定　取 0.5 g 黄米黏豆包样品加入 4 mL 模拟口腔液（3.5 mL 电解液、0.5 mL 唾液淀粉酶）、4 mL 蒸馏水、25 μL 0.3 mol/L $CaCl_2$、975 μL 蒸馏水，将 pH 调节至 7，在 37 ℃ 下搅拌 2 min。其次，加入 9.1 mL 模拟胃液（7.5 mL 电解液+1.6 mL 胃蛋白酶）、5 μL 0.3 mol/L $CaCl_2$，使用 1 mol/L HCl 调节 pH 至 3，放入摇床在 37 ℃ 条件下混匀振荡 2 h，立即放入 100 ℃ 沸水浴 10 min。然后，加入 10 mL 模拟肠液（8 mL 电解液、2 mL 胰蛋白酶）、20 μL 0.3 mol/L $CaCl_2$，将 pH 调节至 7，放置 37 ℃ 摇床混匀振荡 2 h 后立即放入 100 ℃ 沸水浴 10 min。最后，加入 30 mL 三氯乙酸（10%），于 6000 r/min，离心 20 min，取出上清液使用 KDN-18 全自动凯氏定氮仪对样品进行蛋白质含量测定[15]。蛋白质消化率（%）计算公式如下：

$$蛋白质消化率(\%) = \frac{上清液蛋白含量(g/100\,g)}{总蛋白含量(g/100\,g)} \times 100$$　　式（8）

1.2.9　黄米黏豆包果聚糖含量的测定　果聚糖标准曲线制作[16]：取 6 支试管，分别加入 2% 果聚糖（菊粉）标准溶液 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 mL，用蒸馏水补至 1 mL，加入 1.2 mL 浓硫酸，混匀，静置于室温，5 min 后迅速冷却，测定波长 460 nm 处的吸光度值，以菊粉含量为横坐标（X），吸光度为纵坐标（Y）作标准曲线（Y=188.57X+0.0365，R^2=0.992）。样品的测定：取 1 g 黏豆包加入 9 mL 蒸馏水中，充分搅拌混匀，在 10000 r/min 离心 10 min，取 0.5 mL 上清液加入等体积蒸馏水至 1 mL，其余方法与标准曲线测定相同，果聚糖含量以 g/100 g（每 100 g 黏豆包中果聚糖含量）表示。

1.2.10　黄米黏豆包植酸含量的测定　植酸标准曲线制作[17]：取 5 支 2 mL 离心管，准确移取 0、0.1、0.2、0.3、0.4 mL 的 1 mg/mL 的植酸标准溶液，并用 2 mol/L 盐酸溶液定容至 2 mL，试剂摇匀后，各吸取 0.5 mL 于 2 mL 离心管中，加入 1 mL 硫酸铁铵溶液（0.02 g 硫酸铁铵溶于 1000 mL、0.2 mol/L 盐酸溶液），混匀后沸水浴 30 min，迅速置于冰水中冷却至室温后，再于 5000 r/min，离心 10 min。将上清液 1 mL 与双吡啶溶液 1.5 mL 振荡混匀后，于 519 nm 波长处测定吸光度值（Y=2.5414x+1.2312，R^2=0.988）。样品的测定：称取 1 g 黄米黏豆包，加入 30 mL、0.2 mol/L 盐酸溶液，室温下磁力搅拌提取 3 h。提取液在 5000 r/min，离心 10 min，取 0.5 mL 上清液加入 1 mL 硫酸铁铵溶液，其余步骤与标准曲线测定相同。

1.2.11　黄米黏豆包质构性质的测定　将黄米黏豆包样品切取边长为 3 cm 的正方体，使用 TA4/1000 探头置于样品上方于 2.0 cm 处，以 0.1 cm/s 的速率下降，压缩 35% 后，探头会自动恢复到原来的位置并重复一次移动以完成测量[18]。

1.2.12　黄米黏豆包感官评价　挑选 10 名经过专业培训的感官评价员（男女比例 1∶1）对本研究制作的黄米黏豆包的颜色、外观、黏性、弹性、气味和味道 6 个感官指标进行打分评价[8]，具体指标见表 2。

表 2　黄米黏豆包感官评价得分标准

Table 2　Sensory evaluation score table for proso millet Niandoubao

感官指标	特性描述	分值
颜色	颜色自然、纯正，无任何杂色	11~15
	颜色基本纯正，较深、较浅或稍有杂色	6~10
	颜色不正，有杂色	0~5
外观	表皮平整光滑，形状规则，无明显塌陷、裂纹、气孔	11~15
	表皮基本平整，形状无明显变化	6~10
	表皮不平整，形状不够规则	0~5
黏性	黏度适中，有轻微黏牙感，咀嚼2~5次可吞咽	11~15
	黏度过大，黏牙感强，咀嚼6次以上可吞咽	6~10
	黏度过小，无黏牙感	0~5
弹性	手指按压有较好回弹性	11~15
	手指按压有较差回弹性	6~10
	手指按压无回弹性	0~5
气味	特有气味自然、纯正、宜人，稍有酸味，无异味	16~20
	特有气味平淡，酸味尚可接受，无异味	10~15
	特有气味不足，酸味过重或有其他异味	0~9
味道	特有味道自然、纯正、宜人，酸度适中，无异味	16~20
	特有味道平淡，酸味尚可接受，无异味	10~15
	特有味道不足，酸味过重或有其他异味	0~9

1.3　数据处理

所有实验指标至少进行 3 次重复，数据以平均值±标准差表示。采用 SPSS 25.0 进行数据统计分析并进行单因素方差分析（ANOVA），P<0.05 表示组间具有显著差异。使用 Origin 2024 或 Graphpad prism 9.0 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　复合菌的生长情况和发酵特性

2.1.1　复合菌的生长和互作关系　复合菌中微生物成员之间在发酵过程中形成合作共生关系是复合菌作为发酵剂的前提，也是复合菌发挥协同发酵作用的

代谢基础[19]。为了考察复合菌生长能力和互作关系，利用 MRS、YPD、ABM 平板分别对 SDM 培养后的乳酸菌、酵母菌和醋酸菌进行了活菌计数(图 1)。结果显示，所有 10 组发酵剂中乳酸菌、酵母菌或醋酸菌在 SDM 中均可以良好的存活和生长，10 组发酵剂活菌总数均高于 10 lg CFU/mL，明显高于黄米酸面团(原位)条件下活菌总数[11]，尽管 MRS 平板计数不能明确区分 2 株以上乳酸菌的具体数量，但这些结果可以证明，10 组发酵剂在 SDM 中具有良好的生长能力，同时 II 型(C、D、E、F、G、I 组)和 III 型(H、J 组)发酵剂中乳酸菌、酵母菌和醋酸菌之间存在良好的共生互作关系。

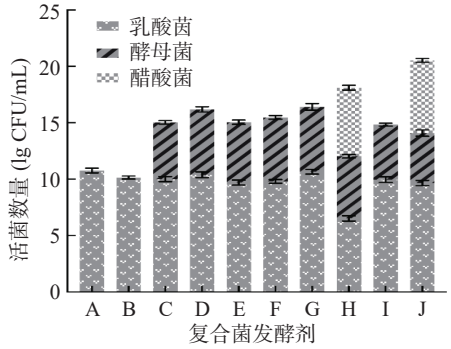


图 1 复合菌发酵剂在模拟面团培养基中活菌数量

Fig.1 Number of viable strain of composite starters in simulated dough medium

根据发酵剂中乳酸菌、酵母菌和醋酸菌组成不同，10 组发酵剂可以分为 3 类菌型(表 1)。由图 1 可知，I 型发酵剂中 A 组活菌数量最高(10.77 lg CFU/mL)，II 型发酵剂中 D 组活菌总数最高(16.19 lg CFU/mL)，III 型发酵剂中 J 组活菌总数最高(20.54 lg CFU/mL)，因此根据生长活性(活菌总数)大小，10 组发酵剂中 A、D 和 J 组生长能力表现最好，同时后 2 组发酵剂中乳酸菌、酵母菌和醋酸菌之间体现最佳的协同发酵关系。

2.1.2 复合菌的产酸能力 为了考察复合菌的发酵产酸能力，在 SDM 培养过程中 10 组发酵剂 pH 和 TTA 的监测结果如图 2 所示。pH 代表样品中强酸的浓度，而 TTA 代表样品中总酸的浓度，因此 pH 和 TTA 的变化趋势并非总是一致的。由图 2A 可知，在培养 20 h 之前，随着培养时间的增加所有样品 pH 迅速降低；在培养 24 h 之后，大多数样品 pH 趋于稳定；发酵结束时，10 组样品 pH 平均值为 3.83，其中 A、B 组样品终点 pH 明显低于其他组样品，且 B 组样品 pH 下降速度快于 A 组样品。这些结果表明，10 组发酵剂中 B 组产酸能力最佳。由图 2B 可知，在全程发酵过程中，随着培养时间的增加所有样品 TTA 始终在增加，在培养 8 h 之前，所有样品 TTA 缓慢增加；在 8 h 之后，少数样品 TTA 快速升高，其中 B 组样品 TTA 增加速度最快；培养结束时，10 组样品 TTA 平均值为 65.4 μL/mL，其中 A、B、

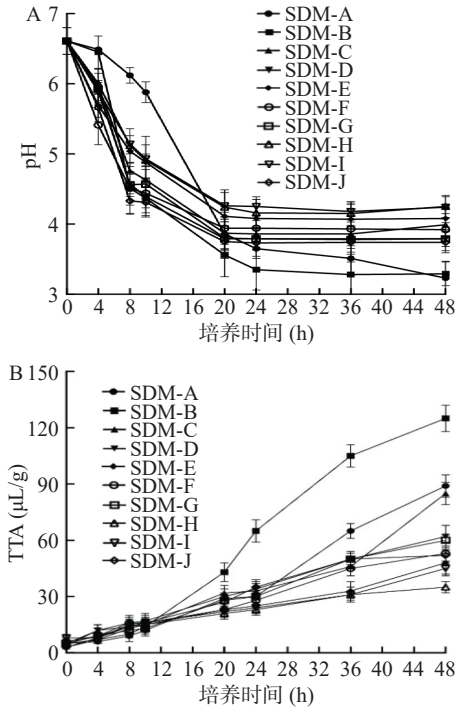


图 2 复合菌发酵剂在模拟面团培养基中的产酸能力

Fig.2 Acid production ability of composite starters in simulated dough medium

C 组样品终点 TTA 明显高于其他组样品。这些结果表明，10 组发酵剂中 B 组产总酸能力最强。

综合考虑 10 组发酵剂菌群类型、生长能力和产酸能力，在三类菌型中分别挑选 B 组(I 型，生长第二，产酸第一)、D 组(II 型，生长第一，产酸第二)和 J 组(III 型，生长第一，产酸第一)进行后续原位培养和黏豆包理化性质研究。此外，考虑到只有 C 组发酵剂中含有独特的戴尔有孢圆酵母(*T. delbrueckii*)[20]，而其他组发酵剂中酵母菌均为酿酒酵母，因此 C 组发酵剂也被挑选出来进行后续研究。

2.2 复合菌原位生长和产酸能力验证

为了验证 4 组复合菌在原位生长条件下的发酵性质和互作关系，对 4 组复合菌在黄米酸面团中生长、产酸能力进行了研究，结果如图 3 所示。由图 3A 可知，经过 40 h 培养的自然发酵组(SF)菌群同时含有 7.82 lg CFU/g 乳酸菌和 4.37 lg CFU/g 酵母菌，因此属于 II 型菌群。经过 10 h 培养的 4 组发酵剂中乳酸菌数量为 8.89~9.32 lg CFU/g，酵母菌数量为 3.34~4.74 lg CFU/g，醋酸菌数量为 5.11 lg CFU/g。与 SF 相比，4 组复合菌发酵酸面团中乳酸菌数量都明显高于 SF 组，C、D 组复合菌(II 型菌群)发酵酸面团中酵母菌数量均略高于 SF 组，这些结果表明，4 组复合菌在黄米酸面团中生长速度和生物量明显高于自然发酵，证明在生长能力上这 4 组复合菌是良好的发酵剂。此外，尽管乳酸菌、酵母菌、醋酸菌数量和活菌总数均略低于 SDM，但 4 组复合菌发酵酸面团中乳酸菌、酵母菌、醋酸菌数量比例与 SDM 中生长情况(图 1)基本一致，这进一步证明 4 组复合菌在

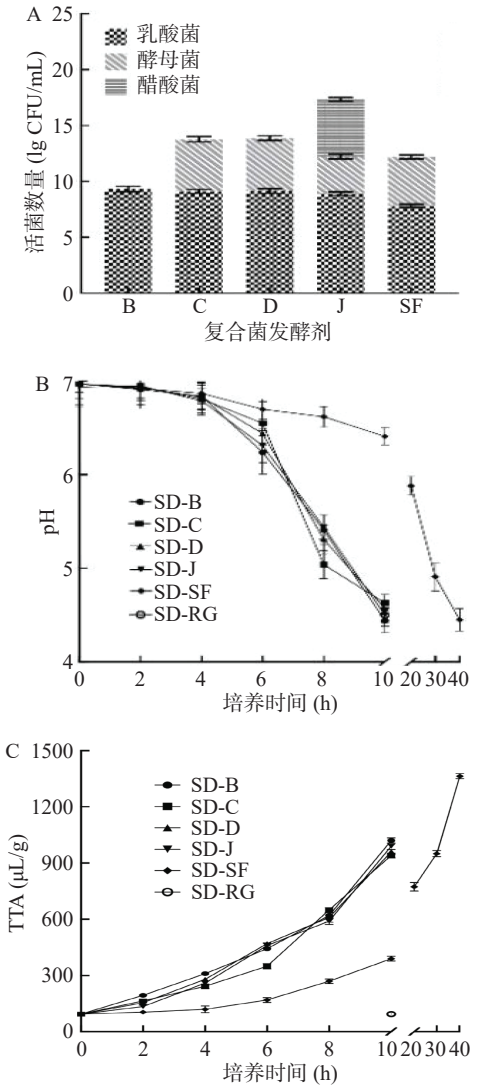


图 3　复合菌在黄米酸面团中生长和产酸能力

Fig.3　Growth and acid production ability of composite starters in proso millet sourdough

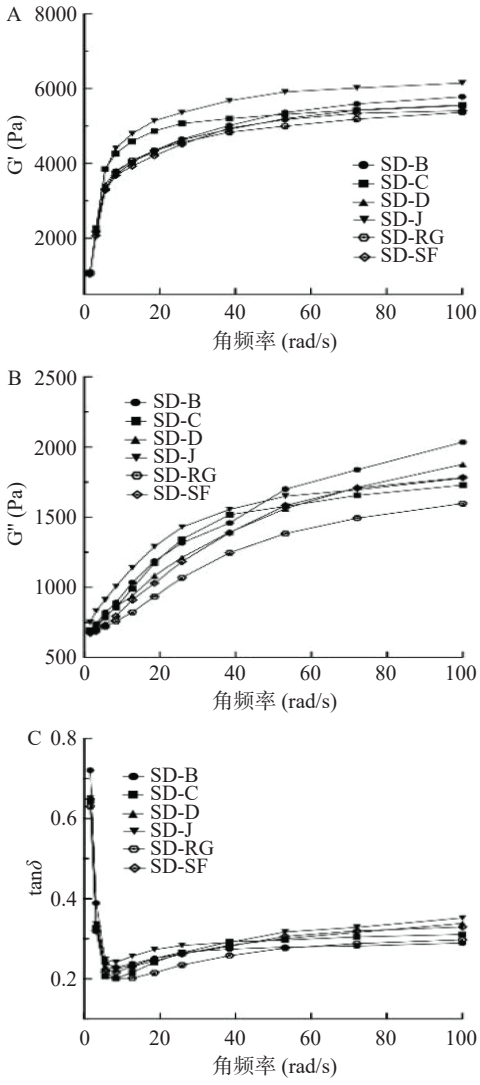


图 4　黄米酸面团的流变学性质

Fig.4　Rheological properties of proso millet sourdough

原位与 SDM 条件下体现了一致的共生互作关系。由图 3B 可知, 随着发酵时间的增加, 4 组复合菌发酵酸面团 pH 在 4 h 后迅速降低, 发酵结束时(10 h) pH 范围 4.44~4.63, pH 平均值为 4.54, 明显低于自然发酵酸面团 pH(6.41)。由图 3C 可知, 随着发酵时间的增加, 4 组复合菌发酵酸面团 TTA 快速增加, 发酵结束时(10 h)TTA 达到 990~1020 μL/g(平均值 977.5 μL/g), 明显高于自然发酵酸面团 TTA (390 μL/g)。为了保持自然发酵与 4 组复合菌发酵酸面团在制作黏豆包时初始酸度的一致性, 自然发酵酸面团的发酵时间延长到 40 h, 此时酸面团的 pH 为 4.45, TTA 为 1350 μL/g, 表明此时黄米酸面团酸度已经成熟[11]。总之 pH 和 TTA 结果进一步证明 4 组复合菌在原位条件下体现了优良的发酵产酸能力。

2.3　复合菌对黄米酸面团流变学性质的影响

酸面团动态流变学性质可以用储能模量(G')、损耗模量(G")、损耗系数(tanδ)来表征[21]。图 4 为 6 组酸面团的流变学特性。由图 4C 可知, 所有样品 tanδ 都小于 1, 表明所有酸面团样品表现为明显的固体特性。由图 4A 可知, 随频率的增加, 所有样品 G'呈现增大的趋势, 但增加的幅度逐渐减小; 角频率大于 50 时, 样品 G'趋于稳定; 角频率为 100 时, 酸面团 SD-J 的 G'最大(6148.76 Pa), 酸面团 SD-D 的 G'最小(5547.95 Pa), 这些结果表明 4 组复合菌酸面团的弹性不同, 且都大于人工酸化面团和自然发酵酸面团, J 组复合菌酸面团的弹性最大。由图 4B 可知, 随角频率的增加, 所有样品 G"同样逐渐增大, 但与 G'不完全相同, 多数样品 G"的增幅没有逐渐减小(例如 SD-B); 角频率为 100 时, 酸面团 SD-B 的 G"最大(2034.95 Pa), 人工酸化面团 SD-RG 的 G"最小(1597.40 Pa), 这些结果表明 4 组复合菌酸面团的黏性是不同的, 且都大于人工酸化面团, B 组复合菌制作的酸面团黏性最大。

2.4　复合菌对黄米黏豆包色度的影响

传统黄米黏豆包成品具有明亮、金黄的宜人色泽, 不仅给消费者带来诱人的食欲, 而且具有美好的节日寓意[3], 因此色度是黏豆包外观品质的重要评价指标。4 组复合菌制作黏豆包的色度检测结果如表 3

所示。由表 3 可知，4 组复合菌黏豆包的 L^*、a^*、b^*值均存在显著性差异（P<0.05），其中黏豆包 NDB-J 的 L^*值最大（71.62±0.03），黏豆包 NDB-C 的 a^*值最大（3.21±0.12），黏豆包 NDB-B 的 b^*值最大（42.93±0.16），表明 4 组复合菌发酵可以赋予黏豆包色度显著性的变化和差异。此外，与自然发酵黏豆包 NDB-SF 和人工酸化黏豆包 NDB-RG 相比，4 组复合菌黏豆包的 L^*和 b^*值显著高于 NDB-SF 且低于 NDB-RG（P<0.05），4 组复合菌黏豆包的 a^*值显著低于 NDB-SF（P<0.05），而与 NDB-RG 相差不大，NDB-D 与 NDB-RG 的 a^*值最接近（P>0.05），这些结果表明 4 组复合菌黏豆包的亮度、黄蓝色和红绿色均显著优于自然发酵黏豆包，亮度和黄蓝色均显著劣于人工酸化黏豆包，红绿色与人工酸化黏豆包相比互有优劣。总之，与自然发酵组相比，4 组复合菌都能够显著改善黏豆包的亮度和黄色，其中黏豆包 NDB-J 的亮度最佳，黏豆包 NDB-B 的黄色值最大。

表 3 黄米黏豆包的色度性质

Table 3 Chromaticity properties of proso millet Niandoubao

样品	L^*	a^*	b^*
NDB-B	69.47±0.01^{d}	2.12±0.01^{e}	42.93±0.16^{b}
NDB-C	68.76±0.04^{e}	3.21±0.12^{b}	42.52±0.08^{c}
NDB-D	69.79±0.14^{c}	2.99±0.01^{c}	37.43±0.16^{e}
NDB-J	71.62±0.03^{b}	2.40±0.02^{d}	41.45±0.08^{d}
NDB-SF	62.16±0.02^{f}	7.84±0.02^{a}	33.14±0.01^{f}
NDB-RG	74.08±0.07^{a}	3.09±0.07^{c}	48.20±0.02^{a}

注：每列数据上标不同字母表示数据之间具有显著性差异（P<0.05）；表4同。

2.5 复合菌对黄米黏豆包消化性质的影响

发酵可以全面改善发酵食品的理化性质，其中微生物对食品中淀粉和蛋白质的利用和改变最为显著[22−23]。为了探究 4 组复合菌对黄米黏豆包淀粉和蛋白质消化性质的影响，在体外模拟消化条件下测定了 6 组黄米黏豆包的淀粉消化动力学曲线、淀粉组成、预期血糖指数和蛋白质消化率（图 5）。由图 5A 可知，在消化 20 min 之前所有黏豆包淀粉消化率迅速增加，在消化 40 min 以后淀粉消化率趋于稳定，在消化结束时（180 min），4 组复合菌黏豆包的淀粉消化率均低于自然发酵组和人工酸化组，其中 J 组黏豆包淀粉消化率最低（63.96%）。由图 5B 可知，与自然发酵和人工酸化黏豆包相比，4 组复合菌黏豆包中快消化淀粉含量均有所降低，抗性淀粉均明显升高，而慢消化淀粉含量无明显变化，其中 J 组黏豆包快消化淀粉最低（21.97%）且抗性淀粉最高（41.16%）。由图 5C 可知，6 组黄米黏豆包 eGI 值高低排序为：NDB-J<NDB-C<NDB-D<NDB-B<NDB-SF<NDB-RG。总体来说，C、D、J 组黏豆包 eGI 值显著低于人工酸化黏豆包（P<0.05），其中 J 组黏豆包的 eGI 值最低（68.5），这与 J 组黏豆包的淀粉消化率（图 5A）和快消化淀粉组成（图 5B）结果一致。上述结果证明，

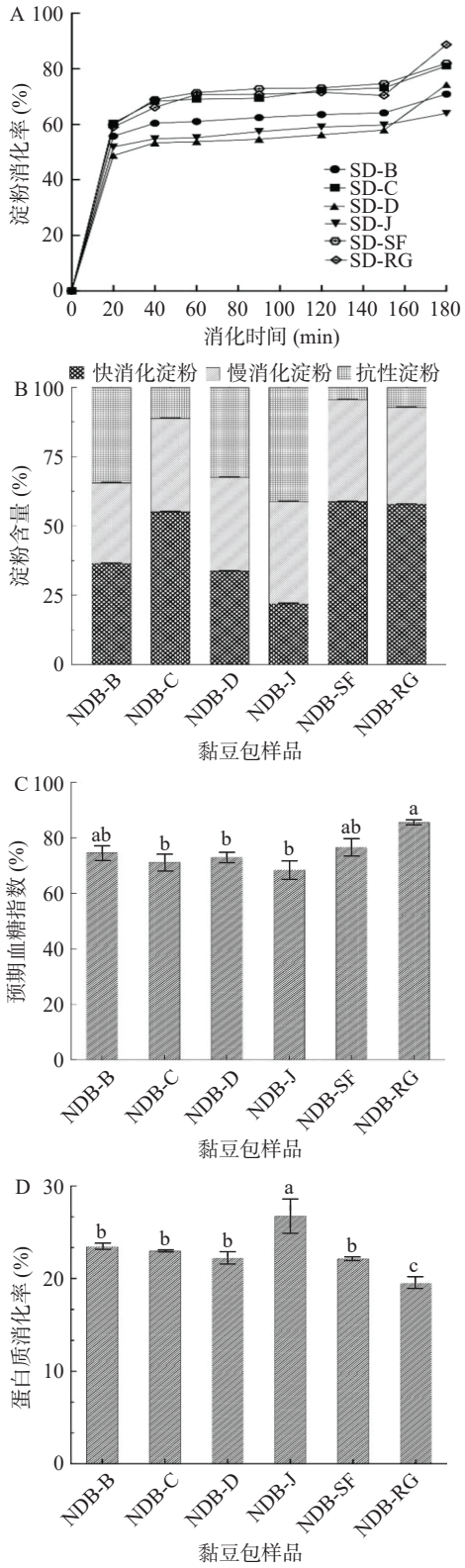


图 5 黄米黏豆包的消化性质

Fig.5 Digestive properties of proso millet Niandoubao

注：A：淀粉消化动力学曲线；B：淀粉组成；C：预期血糖指数；D：蛋白质消化率；不同字母表示数据之间具有显著性差异（P<0.05）；图 6~图 7 同。

与人工酸化黏豆包相比，4 组复合菌发酵剂可以明显改善黏豆包的淀粉消化性质，B、D、J 组复合菌可以显著降低淀粉消化率、减少快消化淀粉和增加抗性淀粉含量，C、D、J 组复合菌可以显著降低黏豆包的

eGI 值，其中 J 组复合菌改善黏豆包淀粉消化性质的能力最佳。由图 5D 可知，4 组复合菌黏豆包蛋白质消化率普遍高于自然发酵黏豆包，且显著高于人工酸化黏豆包（P<0.05），J 组黏豆包蛋白质消化率最高，且显著高于其他复合菌黏豆包（P<0.05）。这些结果表明，与人工酸化黏豆包相比，4 组复合菌可以有效提高黏豆包的蛋白质消化率，J 组复合菌分解黏豆包中蛋白质能力最强。

2.6　复合菌对黄米黏豆包中果聚糖和植酸含量的影响

食物中果聚糖通常被肠道菌群降解为低聚果糖，现有研究表明低聚果糖对健康人群具有多种有益功效，例如调节血糖、降低血脂、调节肠道菌群，调节便秘等[24−26]，但高果聚糖饮食会加重肠易激综合征患者的症状[27−29]，因此食品中果聚糖含量高低对不同人群饮食健康可能具有不同的生理作用和现实意义。6 组黏豆包中果聚糖含量见图 6A。由图可知，人工酸化黏豆包中果聚糖含量最高（9.21 g/100 g），自然发酵黏豆包中果聚糖含量最低（5 g/100 g），与人工酸化黏豆包相比，4 组复合菌黏豆包中果聚糖含量均显著降低（P<0.05），其中 D 组复合菌黏豆包的果聚糖含量最低（5.55 g/100 g），且与自然发酵黏豆包的果聚糖含量无显著差异（P>0.05）。结果表明，4 组复合菌发酵可以不同程度降低黏豆包中果聚糖含量，果聚糖含量较高的 B、C、J 组黏豆包适合消化正常的人群消费，并对摄食人群可能带来多种健康好处，相反，果聚糖含量较低的 D 组黏豆包更适合特殊的人群（如肠易激综合征患者）食用，可以减轻或缓解特殊人群的症状，从而预防相关疾病的发生和发展。因此 B、C、J 组复合菌发酵剂适合用于开发普通消费者食用的黏豆包，而 D 组复合菌可以针对肠易激综合征患者开发具有特殊医疗作用的低果聚糖黏豆包。

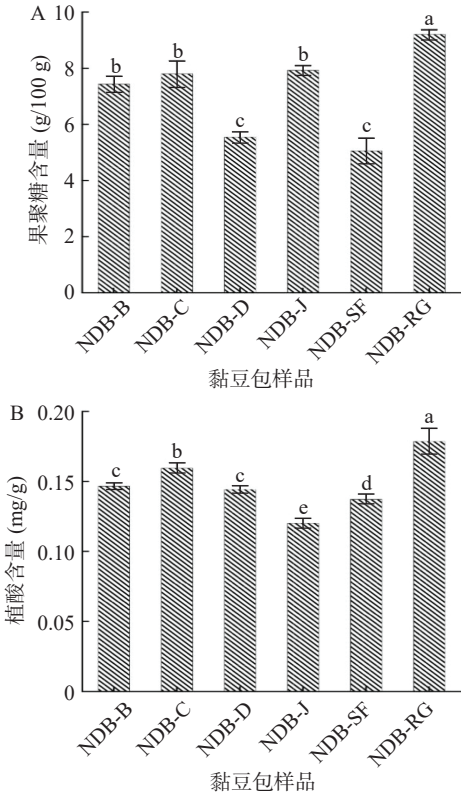


图 6　黄米黏豆包中果聚糖和植酸含量

Fig.6　Content of fructan and phytic acid in the proso millet Niandoubao

植酸广泛存在于谷物食品中，是谷物中磷的主要贮存形式，由于植酸在生物体内可以螯合蛋白质和矿物质元素，形成难以降解的复合物，降低谷物食品中蛋白质和矿物质元素的生物利用度，因此植酸被认为是食品中的抗营养因子[30]。图 6B 显示了 6 组黏豆包中植酸的含量。由图可知，5 组发酵黏豆包中植酸含量均显著低于人工酸化黏豆包，J 组黏豆包中植酸含量最低（0.12 mg/g），这表明微生物发酵可以显著降低黄米黏豆包中植酸含量，从而显著提高黄米粘豆包中蛋白质和矿物质元素的可及性和生物利用度，其中 J 组复合菌降低植酸的效果最佳。

2.7　复合菌对黄米黏豆包质构性质的影响

6 组黏豆包的质构特性见表 4。整体而言，6 组黏豆包的硬度、黏性、咀嚼性和胶着性存在显著性差异（P<0.05），弹性和内聚性差异不显著（P>0.05），表明发酵可以显著改变黄米黏豆包的硬度、黏性、咀嚼性和胶着性特征，而对黏豆包的弹性和内聚性改变较小。通常而言，自然发酵制作的黏豆包具有良好的质构性质（质构分析时作为阳性对照），而未发酵的人工酸化黏豆包质构性质较差（质构分析时作为阴性对照）。具体而言，J 组黏豆包与自然发酵黏豆包的硬度、黏性、咀嚼性和胶着性没有显著差异（P>0.05），而其他 3 组黏豆包与自然发酵黏豆包的硬度、咀嚼性和胶着性存在显著差异（P<0.05），与此同时 J 组黏豆包与人工酸化黏豆包的硬度、咀嚼性和胶着性存在显著差异（P<0.05），B、C 组黏豆包与人工酸化黏豆包的硬度、咀嚼性和胶着性没有显著差异（P>

表 4　黄米黏豆包的质构性质

Table 4　Texture characteristics of proso millet Niandoubao

样品组别	硬度	黏性	弹性	咀嚼性	胶着性	内聚性
NDB-B	249.38±19.62^{b}	24.08±2.55^{a}	0.89±0.03	200.99±28.33^{b}	224.78±25.89^{b}	0.90±0.04
NDB-C	220.32±38.50^{bc}	21.60±1.63^{abc}	0.87±0.05	169.86±44.34^{b}	194.01±40.62^{b}	0.88±0.04
NDB-D	204.63±20.60^{c}	23.55±1.68^{ab}	0.88±0.02	159.10±24.70^{b}	181.41±23.79^{b}	0.89±0.03
NDB-J	342.55±3.57^{a}	20.06±2.33^{bc}	0.92±0.01	286.65±11.20^{a}	312.41±10.13^{a}	0.91±0.02
NDB-SF	338.78±15.69^{a}	22.74±0.78^{ab}	0.90±0.03	265.73±36.73^{a}	295.70±31.20^{a}	0.87±0.05
NDB-RG	252.26±8.34^{b}	18.62±1.90^{c}	0.90±0.03	200.93±23.64^{b}	223.03±20.82^{b}	0.88±0.06

0.05)，这些结果一致表明在 4 组复合菌制作的黏豆包中，J 组黏豆包质构特征与自然发酵黏豆包最相似，C 组黏豆包与人工酸化黏豆包质构特征最接近，因此 4 组复合菌黏豆包中 J 组黏豆包质构性质最佳，C 组黏豆包质构特征最差。

2.8 复合菌对黄米黏豆包感官性质的影响

感官评价可以直接反映消费者对产品单一和整体感官品质的喜好程度，因此是评价食品消费者接受度的关键指标[31]。6 组黄米黏豆包的感官评价结果如图 7 所示。具体而言(图 7A)，4 组复合菌黏豆包的颜色得分明显高于自然发酵黏豆包，但低于人工酸化黏豆包，这与 6 组黏豆包的色度结果(表 3)完全一致；6 组黏豆包的外观得分差异很小；4 组复合菌黏豆包的黏性得分明显高于自然发酵和人工酸化黏豆包，其中 J 组黏豆包黏性得分最高，这与黏豆包流变性质的损耗模量 G"结果(图 4B)部分一致；4 组复合菌黏豆包的弹性得分明显高于自然发酵和人工酸化黏豆包，其中 J 组黏豆包弹性得分最大，这与黏豆包流变性质的储能模量 G'结果(图 4A)完全一致；4 组复合菌黏豆包的气味得分也明显高于自然发酵和人工酸化黏豆包；4 组复合菌黏豆包的味道得分明显高于人工酸化黏豆包，但只有 J 组黏豆包的味道得分高于自然发酵黏豆包。整体而言(图 7B)，4 组复合菌黏豆包的感官评价均显著高于对照组(P<0.05)，其中 J 组黏豆包感官评价最高(79.4)。综合可知，4 组复合菌发酵显著提高了黄米黏豆包的味道、气味、弹性、黏

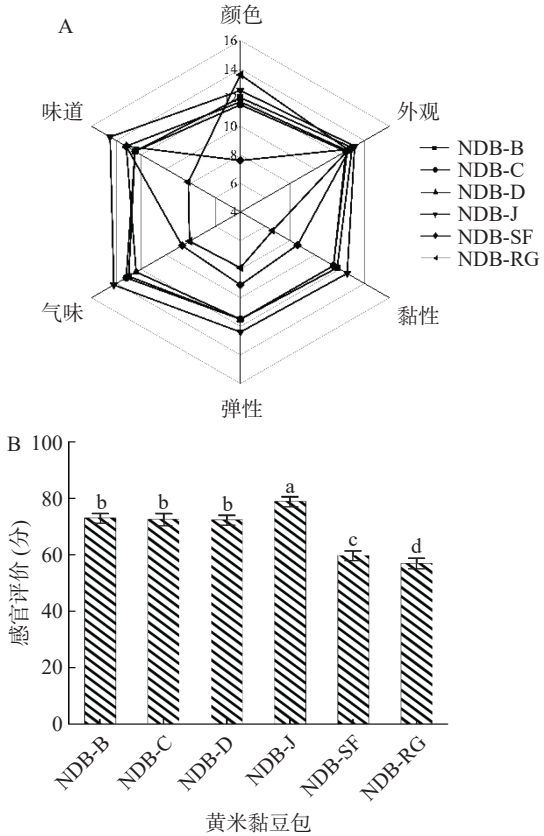


图 7 黄米黏豆包的感官品质

Fig.7 Sensory evaluation of proso millet Niandoubao

性和感官评价(P<0.05)，证明 4 组复合菌可以明显改善黄米黏豆包的感官风味品质，其中 J 组黏豆包具有最佳的感官风味品质和消费者接受度。

2.9 复合菌对黄米黏豆包品质的综合评价

为了综合评价 4 组复合菌发酵剂对黄米黏豆包理化品质的影响，对 6 组黄米黏豆包 17 个理化指标进行了主成分分析。由图 8 可知，前两个主成分合计方差贡献率为 71.6%，表明前两个因子可以解释产品大多数理化性质信息。整体而言，6 组样品没有明显聚类，表明 6 组黏豆包理化性质存在明显的差异。与人工酸化黏豆包 NDB-RG 相比，4 组复合菌黏豆包均向第一主成分正方向移动，主要表现为感官总分、蛋白消化率、抗性和慢消化淀粉、果聚糖和弹性等质构特性的增加，以及植酸、快消化淀粉和 eGI 值的减小，这些指标的变化均体现为黏豆包理化品质地改善和提高，其中黏豆包 NDB-J 在第一主成分正方向最远端，这些结果证明与人工酸化黏豆包 NDB-RG 相比，4 组复合菌黏豆包理化性质均得到有效改善和提升，但 4 组复合菌对黏豆包理化性质具体影响是不同的，其中 J 组复合菌制作的黏豆包 NDB-J 理化品质最佳。此外，与自然发酵黏豆包 NDB-SF 相比，4 组复合菌黏豆包均向第二主成分负方向移动，感官总分、抗性淀粉、L^*和 b^*值的增加，以及 a^*值、快消化和慢消化淀粉、果聚糖、硬度等质构性质的减少，多数指标变化对黏豆包理化品质具有改善作用，少数指标(例如 b^*增加、果聚糖含量减少)变化对黏豆包理化品质不利，这些结果进一步证明 4 组复合菌对黏豆包理化性质具有积极地改善作用，但 4 组复合菌的具体影响是特异性的。在 4 组复合菌黏豆包中 NDB-J 的大多数理化、功能和感官指标优于其他 3 组黏豆包，只有颜色 b^*指标稍差，因此黏豆包 NDB-J 的综合理化品质最佳，也就是说 J 组是黄米黏豆包的最佳复合菌发酵剂。

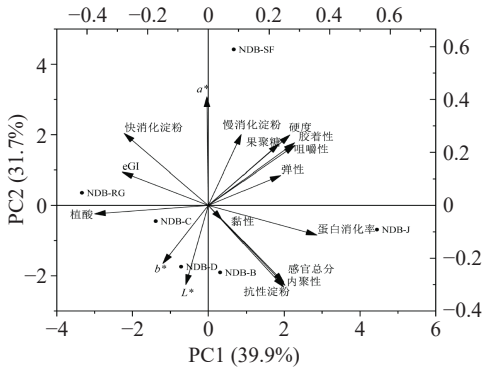


图 8 黄米黏豆包理化性质主成分分析

Fig.8 Principal component analysis of physiochemical properties of proso millet Niandoubao

3 结论

本文通过 10 组复合菌发酵剂的筛选和 6 组黏豆包多种理化性质的比较，探究了 4 组复合菌发酵

剂对黄米黏豆包理化性质的影响。筛选实验结果表明，10 组复合菌含有三类不同的菌群类型，B、D、J 组复合菌在模拟酸面团培养基中表现出最佳的发酵性质和共生互作关系，由于含有独特的酵母菌（*T. delbrueckii*），C 组复合菌同时入选。经原位条件下发酵，4 组复合菌在黄米酸面团中协同生长和产酸能力得到了验证。然后以未发酵的人工酸化黏豆包为阴性对照，自然发酵黏豆包为阳性对照，对 4 组复合菌酸面团的流变学与黏豆包的色度、消化、果聚糖、植酸、质构和感官性质进行比较和综合评价，结果表明 4 组复合菌对黄米黏豆包理化性质均有积极的改善作用，但 4 组复合菌的具体改善效果是特异性的，B 组复合菌黏豆包的 b^* 值最大，D 组复合菌黏豆包果聚糖含量最低，J 组复合菌黏豆包的综合理化品质最佳。总之，本研究筛选了 10 组黄米酸面团原位优势菌群的协同发酵性质，获得 4 组黄米黏豆包优良发酵剂候选复合菌，揭示了 4 组复合菌对黄米黏豆包多种理化和感官性质的影响，J 组复合菌是黄米黏豆包的最佳候选发酵剂，这些结果为东北黄米黏豆包产品品质稳定、改造和控制提供了新的研究思路和参考方法，为今后东北黄米黏豆包工业化、标准化和现代化生产提供了优良、关键的发酵剂菌种资源。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ 张新杰. 东北地区传统粘豆包发酵面团的微生物多样性及其与理化性质的关系[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2017. ［ZHANG Xinjie. The research of microbial diversity on northeast traditional sticky bean bun sourdough and its relationship with the physical and chemical properties[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.］

［2］ 王丽丽，宝音德力格尔. 黏豆包产业化生产[J]. 农业工程，2015，5(3)：53−54. ［WANG Lili, BAO Yindeligeer. Industrialized production of Niandoubao[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(3): 53−54.］

［3］ 姚笛，孙大庆，李洪飞. 东北粘豆包酸面团菌群多样性与自制酸面团中菌群变化规律的研究[J]. 现代食品科技，2015，31(5)：90−95. ［YAO Di, SUN Daqing, LI Hongfei. Microfloral diversity and dynamics in the sourdough of northeast sticky bean buns and homemade sourdough[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(5): 90−95.］

［4］ 郭闯. 糯米黏豆包纯菌发酵工艺优化与冻藏特性分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨商业大学，2021. ［GUO Chuang. Optimization of fermentation process and frozen storage characteristics of glutinous rice Niandoubao with pure bacteria[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2021.］

［5］ CHEN Liangqiang, WANG Guozheng, TENG Mengjing, et al. Non-gene-editing microbiome engineering of spontaneous food fermentation microbiota-Limitation control, design control, and integration[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(3): 1902−1932.

［6］ CALABRESE F M, AMEUR H, NIKOLOUDAKI O, et al. Metabolic framework of spontaneous and synthetic sourdough metacommunities to reveal microbial players responsible for resilience and performance[J]. Microbiome, 2022, 10(1): 148.

［7］ 李琦，程建军，李文鹏. 发酵糯玉米粘豆包的优选乳杆菌鉴定筛选[J]. 东北农业大学学报，2008，39(5)：106−109. ［LI Qi, CHENG Jianjun, LI Wenpeng. Identification and selection of the dominant *Lactobacillus* from Niandoubao made by the waxy maize[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(5): 106−109.］

［8］ 马佳歌，徐丽，倪春蕾，等. 乳酸菌对糯玉米黏豆包品质的影响[J]. 中国食品学报，2019，19(12)：155−163. ［MA Jiage, XU Li, NI Chunlei, et al. Effect of lactic acid bacteria on the quality of Niandoubao from waxy corn[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(12): 155−163.］

［9］ 孔垂琴，范洪臣，石彦国，等. 糯玉米自然发酵液中酵母菌的分离鉴定及其特性研究[J]. 粮食与油脂，2022，35(1)：45−49,57. ［KONG Chuiqin, FAN Hongchen, SHI Yanguo, et al. Isolation and identificatiao of yeasts from natural fermentation broth of waxy corn and its characteristics analysis[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(1): 45−49,57.］

［10］ 王冰，范洪臣，孔垂琴，等. 传统自然发酵黏豆包关键酵母的筛选鉴定[J]. 食品安全质量检测学报，2023，14(1)：58−65. ［WANG Bing, FAN Hongchen, KONG Chuiqin, et al. Screening and identification of key yeast in traditional naturally fermented Niandoubao[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(1): 58−65.］

［11］ SUN Daqing, LI Hongfei, QI He, et al. Microbiota diversity, composition and drivers in waxy proso millet sourdoughs of Niandoubao, a traditional fermented cereal food in Northeast China[J]. LWT, 2023, 180: 114699.

［12］ COMASIO A, VAN KERREBROECK S, DE VUYST L. Lemon juice and apple juice used as source of citrate and malate, respectively, enhance the formation of buttery aroma compounds and/or organic acids during Type 2 and Type 3 sourdough productions performed with *Companilactobacillus crustorum* LMG 23699[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 339: 109020.

［13］ 饶颖，冯小平，郑静，等. 南瓜全麦馒头配方优化与营养特性分析[J]. 食品工业科技，2024，45(11)：167−174. ［RAO Ying, FENG Xiaoping, ZHENG Jing, et al. Formula optimization and nutritional characteristics analysis of pumpkin whole wheat steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 167−174.］

［14］ 唐天培. 含酸面团煎饼的品质特性研究[D]. 无锡：江南大学，2022. ［TANG Tianpei. Study on quality characteristics of pancakes with sourdough[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.］

［15］ 王萌，陈孟泽，柳嘉，等. 木糖对淀粉体外消化性的影响及作用机理[J]. 食品工业科技，2024，45(12)：351−357. ［WANG Meng, CHEN Mengze, LIU Jia, et al. Effect of xylose on *in vitro* digestion of starch and its action mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 351−357.］

［16］ 侯大海，刘云国，黄雪松，等. 3 种比色法测定果聚糖方法的比较[J]. 现代食品，2016，22(13)：82−85. ［HOU Dahai, LIU Yunguo, HUANG Xuesong, et al. Comparison of three colorimetric methods for checking fructan[J]. Modern Food, 2016, 22(13): 82−85.］

［17］ STERN A L, BERSTEIN J, JONES S S, et al. The impacts of germinating organic wheat: Effects on phytic acid, resistant starch, and functional properties of flour, and sensory attributes of sourdough bread[J]. International Journal of Food Science & Technolo-

gy, 2021, 56(8): 3858−3865.
[18] PAREDES J, CORTIZO-LACALLE D, IMAZ A M, et al. Application of texture analysis methods for the characterization of cultured meat[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 3898.
[19] XIN Yongping, QIAO Mingqiang. Towards microbial consortia in fermented foods for metabolic engineering and synthetic biology[J]. Food Research International, 2025, 201: 115677.
[20] SANMARTÍN G, SÁNCHEZ-ADRIÁ I E, PRIETO J A, et al. Bioprospecting of sourdough microbial species from artisan bakeries in the city of *Valencia*[J]. Food Microbiology, 2024, 120: 104474.
[21] OZULKU G. Monitoring the dough properties, quality characteristics and volatile compounds of whole wheat bread made by different sourdough types during frozen storage[J]. Foods, 2024, 13(9): 1388.
[22] COSTANTINI A, VERNI M, MASTROLONARDO F, et al. Sourdough "biga" fermentation improves the digestibility of pizza pinsa *Romana*: An investigation through a simulated static *in vitro* model[J]. Nutrients, 2023, 15(13): 2958.
[23] ZENG Fangye, YANG Yueyue, LIU Qing, et al. Effect of fermentation methods on properties of dough and whole wheat bread[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(10): 4876−4886.
[24] VEERAPANDIAN B, KRISHNAN S, SIVARAMAN S, et al. *Bacillus* spp. as microbial factories for levan and fructooligosaccharide production - Recent trends[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300: 140252.
[25] XUE Hongkun, LIANG Beimeng, WANG Yu, et al. The regulatory effect of polysaccharides on the gut microbiota and their effect on human health: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 132170.
[26] CHEN Yihan, WEN Yuxi, ZHU Yingying, et al. Synthesis of bioactive oligosaccharides and their potential health benefits[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(28): 10319−10331.
[27] GĄSIOROWSKA A, ROMANOWSKI M, WALECKA-KAPICA E, et al. Effects of microencapsulated sodium butyrate, probiotics and short chain fructooligosaccharides in patients with irritable bowel syndrome: A study protocol of a randomized double-blind placebo-controlled trial[J]. Journal of Clinical Medicine, 2022, 11(21): 6587.
[28] FOULKES R, SHAH P, TWOMEY A, et al. A service evaluation of FODMAP restriction, FODMAP reintroduction and long-term follow-up in the dietary management of irritable bowel syndrome[J]. Journal of Human Nutrition and Dietetics, 2025, 38(1): e13393.
[29] SIA T, TANAKA R O, MOUSAD A, et al. Fructose malabsorption and fructan malabsorption are associated in patients with irritable bowel syndrome[J]. BMC Gastroenterology, 2024, 24(1): 143.
[30] MAROLT G, GRIČAR E, PIHLAR B, et al. Complex formation of phytic acid with selected monovalent and divalent metals[J]. Frontiers in Chemistry, 2020, 8: 582746.
[31] LI He, LI Lifeng, ZHANG Zhijun, et al. Sensory evaluation, chemical structures, and threshold concentrations of bitter-tasting compounds in common foodstuffs derived from plants and Maillard reaction: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(14): 2277−2317.