贾庆超, 谷焕焕, 张辉艳, 等. 保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌协同发酵制备液态黑蒜技术研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 232−243. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010286

JIA Qingchao, GU Huanhuan, ZHANG Huiyan, et al. Preparation Technology of Liquid Black Garlic by Synergistic Fermentation of *Lactobacillus bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 232−243. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010286

·工艺技术·

保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌协同发酵制备液态黑蒜技术研究

贾庆超[1,2], 谷焕焕[1], 张辉艳[2,*], 班莹莹[2]

（1.郑州科技学院食品科学与工程学院, 河南郑州 450000;
2.郑州瑞普生物工程有限公司, 河南郑州 450001）

摘　要: 目的：本文以新鲜大蒜为原料，研究乳酸菌协同发酵制备液态黑蒜技术及对其香气成分进行分析。方法：将新鲜大蒜经 180 ℃ 高温灭酶，并破碎、加水，加入不同比例复合乳酸菌发酵一定时间，于 80 ℃ 高温热反应制备液态黑蒜，以未加菌种发酵的液态黑蒜（KB1、KB2）为参照，每隔 2 d 测定其褐变程度、还原糖、总酚、总酸、氨基酸态氮含量及 DPPH·、·OH 清除率，研究在不同比例复合乳酸菌发酵作用下，制备液态黑蒜的最佳条件，并对此条件下的液态黑蒜进行香气成分分析。结果：液态黑蒜最佳制备条件为：灭酶时间 9 min，乳酸菌质量比例嗜热链球菌（S）:保加利亚乳杆菌（B）为 3:1，热反应 13 d 达到黑蒜成熟标准，以相同条件下 KB1 为参照，此时还原糖含量为其 1.20 倍，总酚含量为其 1.82 倍，总酸含量为其 1.36 倍，氨基酸态氮为其 1.21 倍，DPPH·清除率和·OH 清除率分别为其 1.37、1.34 倍。相对单一乳酸菌 S 和 B，发酵时间分别缩短 2 d 和 5 d。香气成分分析表明，相对 KB1，菌种协同发酵的液态黑蒜硫醚类物质含量降低 54.17%，醛类、呋喃类挥发性香气成分分别增加 47.98% 和 6.18%，液态黑蒜基本没有蒜臭味，香气可接受度更好，感官评分为 91.38±0.98 分。结论：复合乳酸菌发酵制备液态黑蒜具有协同作用，可缩短黑蒜成熟时间，在黑蒜开发研究中具有良好应用前景。

关键词: 液态黑蒜, 保加利亚乳杆菌, 嗜热链球菌, 协同发酵, 品质指标

中图分类号: TS255.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0232−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010286　　本文网刊:

Preparation Technology of Liquid Black Garlic by Synergistic Fermentation of *Lactobacillus bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus*

JIA Qingchao[1,2], GU Huanhuan[1], ZHANG Huiyan[2,*], BAN Yingying[2]

（1.School of Food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450000, China;
2.Zhengzhou Ruipu Biological Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China）

Abstract: Objective: The preparation of liquid black garlic by lactic acid bacteria cooperative fermentation and the analysis of aroma components were studied. Methods: Fresh garlic was subjected to high-temperature enzyme inactivation at 180 ℃, then crushed and mixed with water. Different proportions of composite lactic acid bacteria were added for fermentation for a certain period of time. Liquid black garlic was prepared by high-temperature reaction at 80 ℃. The degree of browning, reducing sugar, total phenols, total acids, amino acid nitrogen content and DPPH·, ·OH scavenging rate were measured every two days using liquid black garlic (KB1、KB2) without bacterial fermentation as a reference, and the optimum

收稿日期: 2025−02−07

基金项目: 2025 年河南省科技攻关项目（252102110079）; 河南省教育厅高等学校重点研究项目（24B550021）; 2022 年度郑州科技学院研究项目（XJKY08）; 河南省大学生创新训练项目（S202512746032）; 郑州科技学院 2025 年大学创新训练项目（DC202548）; 农业农村部大宗粮食加工实验室开放课题（DZLS201704）。

作者简介: 贾庆超（1981−）, 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 生物发酵制品研究, E-mail: someone0803@163.com。

*** 通信作者:** 张辉艳（1981−）, 女, 本科, 工程师, 研究方向: 天然营养素开发研究, E-mail: 350855183@qq.com。

conditions for preparing liquid black garlic were studied under the fermentation of complex lactic acid bacteria in different proportions, and the aroma components of liquid black garlic under these conditions were analyzed. Results: The best preparation conditions for liquid black garlic were determined as follows: The fermentation time was 9 min, the mass ratio of lactic acid bacteria S (*Streptococcus thermophilus*)∶B (*Lactobacillus bulgaricus*) was 3∶1, and the maturation standard of black garlic was reached at 13 d. Under the same conditions, KB1 was used as the standard. At this time, the reducing sugar content was 1.20 times, the total phenol content was 1.82 times, the total acid content was 1.36 times, and the amino acid nitrogen was 1.21 times. DPPH· clearance and ·OH clearance were 1.37 times and 1.34 times, respectively. Compared with single lactic acid bacteria S and B, the thermal reaction was shortened by 2 d and 5 d, respectively. The analysis of aroma components showed that, compared with KB1, the content of thioether in liquid black garlic co-fermented by strains decreased by 54.17%, while the volatile aroma components of aldehydes and furan compounds increased by 47.98% and 6.18% respectively. The liquid black garlic basically had no garlic odor, and the aroma acceptability was better, with a sensory score of 91.38±0.98 points. Conclusion: The fermentation of liquid black garlic by complex lactic acid bacteria has a synergistic effect and can shorten the thermal reaction of black garlic, which has a good application prospect in the development and research of black garlic.

Key words: liquid black garlic; *Lactobacillus bulgaricus*; *Streptococcus thermophilus*; synergistic fermentation; quality indicators

黑蒜是目前大蒜的主要深加工产品，口感柔软甜酸无刺激，糖类化合物、有机酸、总酚、类黑精、5-羟甲基糠醛（5-HMF）等营养成分含量大幅增加，具有抗凝血、降血脂、抗癌、抗衰老、抗高血压等多种生理活性[1−2]。相对固态黑蒜，液态黑蒜由于具有加热制备时传热效率高、制备时间短、能耗低、成本低且品质指标更加优越等优势，受到更多研究者青睐[3−4]。国外制备液态黑蒜主要是将固态黑蒜破碎，加入水或甲醇等作为浸提液，浸提后发酵而得到液态黑蒜，但存在加工时间长、成本高等缺点[5−6]。本文作者贾庆超等[7−8] 前期研究亦表明，在相同的制备条件下，液态黑蒜的制备周期更短、生产成本更低、品质指标更加优越。因此，研究液态黑蒜具有重要的现实意义。

利用乳酸菌发酵制备黑蒜是目前黑蒜研究的热点。乳酸菌作为常用发酵菌种，对固态黑蒜及固态新鲜大蒜品质有较大影响。SI 等[9] 使用保加利亚乳杆菌对新鲜大蒜发酵后制备固体黑蒜，黑蒜的抗氧化性可提升 41%，妊娠糖尿病患者服用此黑蒜比普通黑蒜餐后 2 h 血糖降低幅度大于 5%，表明保加利亚乳杆菌发酵制备的黑蒜具有良好的预防妊娠期糖尿病作用；LEE 等[10] 研究表明，嗜热链球菌对新鲜固态大蒜发酵一定时间，可提升大蒜中 s-烯丙基半胱氨酸（SAC，8.72%）、s-甲基半胱氨酸（SMC，7.69%）等活性物质的含量。贾庆超等[7] 利用嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌[8] 分别在 42 ℃ 下发酵高温灭酶的液态大蒜而制备液态黑蒜，结果表明两种菌种对液态大蒜的发酵作用可提升所制备液态黑蒜的品质指标，缩短黑蒜成熟时间，液态黑蒜制备时间分别仅为 15 d 和 18 d。同时亦有研究表明，乳酸菌在发酵过程中具有优良的协同作用。侯进慧等[11] 研究发现三种复合乳酸菌与大蒜共存 30 d 后可以使大蒜的蒜臭味消失，产生香味。YAMAMOTO 等[12] 在研究酸奶制备过程中的菌类物质生长时，发现保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌具有互生共存关系，可互相刺激对方菌落的生长。因此，乳酸菌发酵制备液态黑蒜是否具有协同作用值得探讨。

由于制备液态黑蒜需先将大蒜破碎，但破碎后大蒜含有的蒜氨酸酶可将蒜氨酸转化为具有灭菌作用的大蒜素，大蒜素具有很强的抗菌活性，极不利于乳酸菌存在，因此在乳酸菌对大蒜发酵之前，需首先对大蒜进行蒜氨酸酶灭活处理，故本文在前期研究的基础上[7−8]，首先将大蒜经高温灭活蒜氨酸酶并破碎加水，按照一定比例加入嗜热链球菌（S）和保加利亚乳杆菌（B）并发酵一定时间，再于 80 ℃ 下热反应制备液态黑蒜，以未添加菌种发酵的大蒜制备的液态黑蒜为参照（灭酶 9、10 min 分别为 KB1、KB2），研究复合乳酸菌协同发酵制备液态黑蒜方案，并对制备方案下的液态黑蒜进行香气成分分析，为黑蒜产业的发展提供详实的数据参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜大蒜　市售，紫皮多瓣大蒜，河南中牟；保加利亚乳杆菌（*Lactobacillus bulgaricus*，LB42）、嗜热链球菌（*Streptococcus thermophilus*，ST81）　镇江市天益生物科技有限公司；水杨酸、氢氧化钠、无水碳酸钠、苯酚、无水葡萄糖、没食子酸（均为分析纯）　天津风帆试剂有限公司；3，5-二硝基水杨酸、酒石酸钾钠（均为分析纯）　上海展云化工有限公司；甲醛溶液　成都市科隆化学品有限公司；无水乙醇、七水合硫酸亚铁、无水亚硫酸钠（均为分析纯）　天津市富宇精细化工有限公司；30% 过氧化氢（分析纯）　河南省惠泽生物科技有限公司；福林酚（1 mol/L）、1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）　分析纯，福州飞净生物科技有限公司；抗坏血酸（V_C，分析纯）　江苏奥福生物科技有限公司。

101-0ABS 电热鼓风干燥箱　上海科恒实业发展有限公司；KQ5200B 机械型超声波清洗仪器　上

海合金超声设备有限公司; HH-6 数显恒温水浴锅　金坛市华峰仪器有限公司; HHW.21-600 电热恒温水温箱　北京市永光明医疗仪器有限公司; PXSJ-216F 离子计　上海仪电科学仪器股份有限公司; 78-1 磁力加热搅拌器　金坛市双捷实验仪器厂; TDL-50B 台式离心机　上海安亭科学仪器厂; UV-2800 紫外可见分光光度计　尤尼柯(上海)仪器有限公司; 5977GC-MS 气相色谱质谱联用仪　安捷伦科技(中国)有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　菌种活化　取冷冻保藏的乳酸菌菌粉, 按照 5% 接种量(0.25 g)加入 5 mL MRS 培养基中, 37 ℃ 静置培养 24 h 后, 用接种环取乳酸菌培养液在 MRS 平板上进行划线分离, 37 ℃ 静置培养 24 h 后, 从平板上挑取乳酸菌单菌落接种到含 50 mL MRS 的 250 mL 锥形瓶中, 37 ℃ 培养 24 h。采用平板菌落计数法测定菌体密度, 嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌分别为 1.47×10^6、2.60×10^6 CFU/mL。

1.2.2　液态黑蒜工艺流程　根据 KIM 等[13] 的研究, 对新鲜大蒜首先进行高温灭活蒜氨酸酶处理(温度 180 ℃, 时间 9、10 min)。参考贾庆超等[7] 制备液态黑蒜工艺流程, 如下:

新鲜大蒜→去皮→清洗→去根蒂→180 ℃ 灭酶→蒜瓣破碎→装罐→加水→加辅料(复合乳酸菌), 共存 32 h→80 ℃ 恒温热反应→品质指标测定

操作要点: 将新鲜无破损、无变质大蒜经剥皮、洗净、晾干后, 在 180 ℃ 高温下分别进行 9、10 min[7−8] 蒜氨酸酶灭活, 经破碎、装罐、加水至料液比 2∶1 后, 分别向其中 5 份样品中加入 S 与 B 质量比为 1∶1、1∶2、2∶1、1∶3、3∶1 的 5%[7−8](以原料质量为标准, 菌种质量含量)复合乳酸菌菌液进行发酵实验, 同时另做两组未添加菌种发酵的 KB 样品(灭酶 9、10 min 分别为 KB1、KB2)进行对照。将样品放在 80 ℃ 恒温箱中, 每 2 d 取样, 测定褐变程度、还原糖含量等品质指标, 探究保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌复合发酵制备液态黑蒜的条件。

1.2.3　品质指标的测定

1.2.3.1　褐变程度 ΔE　参考 LI 等[14] 的方法, 使用色差计测定色度。褐变程度 ΔE 计算公式为:

$$\Delta E=[(L^*-L_0)^2+(a^*-a_0)^2+(b^*-b_0)^2]^{1/2}$$

式中: L^*、a^*、b^*分别为色差计的测定值; L_0、a_0、b_0 分别为未进行任何处理的大蒜的测定值。

1.2.3.2　还原糖含量的测定　准确称取样品黑蒜 5.000 g 于研钵中, 研磨成浆于 100 mL 容量瓶中, 加入蒸馏水定容至刻度, 充分混匀后静置 30 min, 3800 r/min 离心 10 min, 上清液备用。参考彦繁鹤等[15] 3,5-二硝基水杨酸比色法(DNS)测定黑蒜中还原糖含量。准确吸取 1 mL 样液加入 10 mL 具塞试管中, 加入 1 mL 蒸馏水和 1.5 mL DNS 溶液, 沸水浴 5 min, 取出冷却至室温, 用蒸馏水定容至刻度, 在紫外分光光度计 540 nm 波长处测定吸光度, 根据标准曲线(y=2.92914x+0.01971, R^2=0.9977)计算液态发酵黑蒜中还原糖的含量。

1.2.3.3　总酸含量的测定　参考于蒙娜[4] 直接滴定法测定黑蒜样品中的总酸含量。

准确称取样品黑蒜 5.000 g 于研钵中, 研磨成浆于 100 mL 容量瓶中, 加入蒸馏水定容至刻度, 充分混匀后静置 30 min, 3800 r/min 离心 10 min, 准确吸取上清液 20.00 mL 于烧杯中, 即为 V_2, 加入 60.00 mL 蒸馏水, 混匀, 用 0.05 mol/L 氢氧化钠溶液滴定至 pH 为 8.2, 记录消耗氢氧化钠标准溶液体积, 即为 V_1。同时用蒸馏水替代 20.00 mL 样液, 方法同上, 记录氢氧化钠标准溶液消耗体积 V, 总酸含量的计算公式为:

$$\text{总酸(g/kg)}=\frac{C\times(V_1-V)\times V_0\times K}{M\times V_2}\times1000$$

式中: C—氢氧化钠标准溶液的浓度, mol/L; V_0—样品稀释液总体积, 100 mL; V_1—样品稀释液滴定至终点所消耗的氢氧化钠标准溶液的体积, mL; V_2—滴定时吸取样液体积, mL; V—空白稀释液滴定至终点所消耗的氢氧化钠标准溶液的体积, mL; M—测定用样品溶液相当于样品的质量, g; K—0.06, 即 1 mmol 氢氧化钠相当于乙酸的质量, g。

1.2.3.4　氨基酸态氮含量的测定　参考贾庆超等[7] 酸度计法测定黑蒜中的氨基酸态氮含量。

准确称取样品黑蒜 5.000 g 于研钵中, 研磨成浆于 100 mL 容量瓶中, 加入蒸馏水定容至刻度, 充分混匀后静置 30 min, 3800 r/min 离心 10 min, 取 20 mL 上清液于烧杯中, 即为 V_3, 再加入 60 mL 蒸馏水, 混匀, 用 0.05 mol/L 氢氧化钠标准溶液滴定至 pH 为 8.2, 记录此时样品所消耗氢氧化钠标准溶液的体积。迅速向溶液中加入 10 mL 中性甲醛, 立即混匀, 用 0.05 mol/L 氢氧化钠标准溶液滴定至 pH 为 9.2, 再次记录氢氧化钠标准溶液消耗体积, 即为 V_1。用 20 mL 蒸馏水代替样液, 采用上述方法测定, 加入甲醛溶液后用 0.05 mol/L 氢氧化钠标准溶液滴定至 pH 为 9.2, 即为 V_2。代入公式, 计算出黑蒜中氨基酸态氮含量。计算公式为:

$$\text{氨基酸态氮(g/100 g)}=\frac{(V_1-V_2)\times C\times0.014\times100}{5\times V_3/100}$$

式中: V_1—为测定用的样品稀释液加入甲醛后消耗氢氧化钠标准溶液的体积, mL; V_2—为试剂空白试验加入中性甲醛后消耗氢氧化钠标准溶液的体积, mL; V_3—为样品稀释液取用量, mL; C—为氢氧化钠标准溶液的浓度, mol/L; 0.014—1 mL 浓度为 1.000 mol/L 氢氧化钠标准溶液相当于氮的质量, g。

1.2.3.5　总酚含量　采用福林酚法[7] 测定液态发酵黑蒜中的总酚含量。准确称取液态黑蒜样品 1.000 g

于 50 mL 容量瓶中，加入 25.00 mL 70% 乙醇溶液，常温 200 W 超声浸提 30 min，过滤并将滤液转移至 50 mL 容量瓶中，用 70% 乙醇定容至刻度，准确吸取 2.00 mL 于 10 mL 具塞试管中，用 70% 乙醇定容至刻度，从 10 mL 具塞试管中准确吸取 1.00 mL 样液，置于另一 10 mL 具塞试管中，加入 6.00 mL 蒸馏水充分混匀，再加入 0.50 mL 福林酚试剂，摇匀，1 min 后，向试管中加入 1.50 mL 20% 碳酸钠溶液，充分混匀，定容至刻度，75 ℃ 下水浴 10 min，取出冷却至室温，于 760 nm 波长处测定吸光度，根据没食子酸标准曲线（y=95.66071x+0.01904，R^2=0.9990）计算液态发酵黑蒜中总酚的含量。

1.2.3.6　DPPH·清除率的测定　准确称取 5.000 g 黑蒜样品，置于 250 mL 锥形瓶中，加入 50 mL 50% 的乙醇溶液，常温 200 W 超声浸提 30 min，于 15 mL 离心管 3000 r/min 离心 20 min，取上清液 4000 r/min 再次离心 20 min，上清液为待测溶液。参考郑岚等[16] 的方法，以 5 mg/mL V_C 溶液为阳性对照。取 2.00 mL 样液或 V_C 溶液与 2.00 mL DPPH 溶液混合均匀后避光放置 30 min，用无水乙醇作对照，于 517 nm 波长处测定吸光度 A_1；吸取 2.00 mL 无水乙醇与 2.00 mL DPPH 溶液混合后测定吸光度 A_2；吸取 2.00 mL 样液或 V_C 溶液与 2.00 mL 无水乙醇混合后测定吸光度 A_3，清除率计算公式为：

$$\text{DPPH·清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_3}{A_2}\right)\times 100$$

1.2.3.7　·OH 清除率的测定　待测溶液制备同 1.2.3.6。参考郑岚等[16] 的方法，准确吸取 0.05 mol/L 磷酸缓冲溶液 1.00 mL 于 10 mL 比色管中，加入 0.50 mL 6 mmol/L 的邻二氮菲溶液，充分混匀，再加 0.50 mL 6 mmol/L $FeSO_4$ 溶液，立即混匀，再加入 0.50 mL 样品溶液或 V_C 溶液，充分混匀后，加入 0.50 mL 0.1% H_2O_2 溶液，加蒸馏水定容至刻度，37 ℃ 下恒温水浴 1 h，于 536 nm 波长处测吸光度 A_1。同时用蒸馏水代替上述样液，测定吸光度 A，用蒸馏水代替上述样液和 H_2O_2 溶液，测定吸光度 A_0。计算清除率：

$$\text{·OH清除率}(\%)=\frac{A_1-A}{A_0-A}\times 100$$

1.2.3.8　液态黑蒜制备方案的分析　根据黑蒜发酵成熟标准对各品质指标的要求，分别对液态黑蒜在不同的热反应天数下品质指标变化分析，得到分别满足各品质指标黑蒜制备的最优条件：褐变程度（T1）、还原糖含量（T2）、总酸含量（T3）、氨基酸态氮含量（T1）、总酚含量（T4）、DPPH·清除率（T4）、·OH 清除率（T5），根据各最优条件，综合分析复合菌种协同发酵制备液态黑蒜的最佳方案。

1.2.3.9　香气成分分析　参考于蒙娜[4]、陈清爱等[17] 测定样品风味物质的方法。

前处理：将液体黑蒜破碎为匀浆，取匀浆 8 g 于 20 mL 顶空瓶中，约为瓶身的 1/3 处，加入 10 μL 10 mg/mL 的 2-辛醇（内标），立即用封口器封口，置于 50 ℃ 水浴锅内 10 min，将萃取头垂直插入顶空瓶中，将纤维头推出萃取 30 min，纤维头旋回，拔出萃取头，迅速将其插入进样口，旋出纤维头解吸 10 min。

样品检测方法：将 65 μm 的 PDMS/DVB 萃取头置于温度为 250 ℃ 进样口，老化 30 min。

气相色谱（GC）条件：选用 30 m×0.25 mm×0.5 μm 的 DB-WAX 毛细管色谱柱，柱温箱初始温度为 50 ℃，进样口温度为 250 ℃，采用 99.999% 的高纯 He 为载气，流速为 0.99 mL/min，分流进样，分流比为 10∶1，柱温升温至 50 ℃，保持 4 min，5 ℃/min 升至 65 ℃，保持 2 min，5 ℃/min 升至 75 ℃，保持 3 min，2 ℃/min 升至 90 ℃，保持 5 min，3 ℃/min 升至 180 ℃，保持 2 min，10 ℃/min 升至 230 ℃。

质谱（MS）条件：离子源温度 230 ℃，传输线温度 250 ℃，电离方式为 EI，电离能量为 70 eV，采用全扫描（Q3 Scan）模式采集信号，扫描范围 33~500 m/z，溶剂延迟时间为 2.5 min，选择匹配度≥85，计算挥发性香气成分含量。

挥发性香气成分含量=（各挥发性香气成分峰面积×2-辛醇含量）/2-辛醇峰面积。

1.3　数据处理

采用 Origin2018 绘制黑蒜各品质指标图，每个实验点平行实验三次，spss23.0 软件进行方差分析，显著性水平 P 为 0.05，结果采用平均值±标准偏差（SD）表示。

2　结果与分析

2.1　复合菌比例、热反应时间对褐变程度的影响

褐变程度是衡量黑蒜成熟程度的重要指标之一。随着黑蒜热反应时间的增加，黑蒜中的类黑精也逐渐增加，使颜色由白色逐渐向黑褐色转变[8]。根据于蒙娜[4] 的研究，当褐变程度数值 ΔE 达到 60 时，可认为成熟。

由图 1 可知，随着液态黑蒜热反应时间的增加，黑蒜褐变程度呈逐渐递增随后趋于稳定的趋势，在相同的热反应时间下，不同灭酶时间加入菌种黑蒜的褐变程度均显著大于其相应的 KB1、KB2（P<0.05），KB1、KB2 均在 23 d 发酵成熟。灭酶 9、10 min 时，褐变程度的大小趋势分别为 3∶1>2∶1>1∶2>1∶1>1∶3>KB1 和 3∶1>2∶1>1∶2>1∶1>1∶3>KB2，因此菌种质量比 S∶B=3∶1 是较优菌种比例，二者褐变程度在 13 d 分别为 61.39 和 61.37，达到黑蒜成熟标准，分别为各自 KB1、KB2 褐变程度的 1.19、1.27 倍。以上说明菌种协同发酵可提升黑蒜的成熟速率，考虑到能源节约，灭酶 9 min、菌种比例 S∶B=3∶1 是此时较优条件（设为 T1）。由图 1 还可以看出，在相同的热反应时间下，灭酶 9、10 min 的 KB1、KB2 的褐变程度差异不显著（P>0.05），说明灭酶时间对制备液态

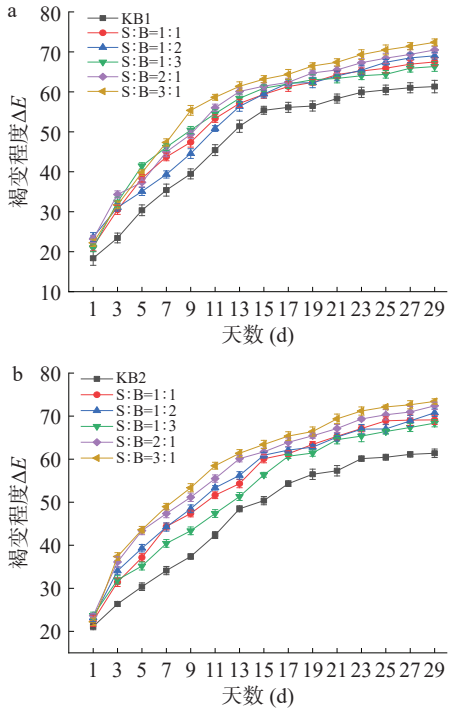


图 1 热反应时间对黑蒜褐变程度的影响

Fig.1 Effect of thermal reaction times on browning degree of black garlic

注: a: 灭酶 9 min; b: 灭酶 10 min; 图 2~图 7 同。

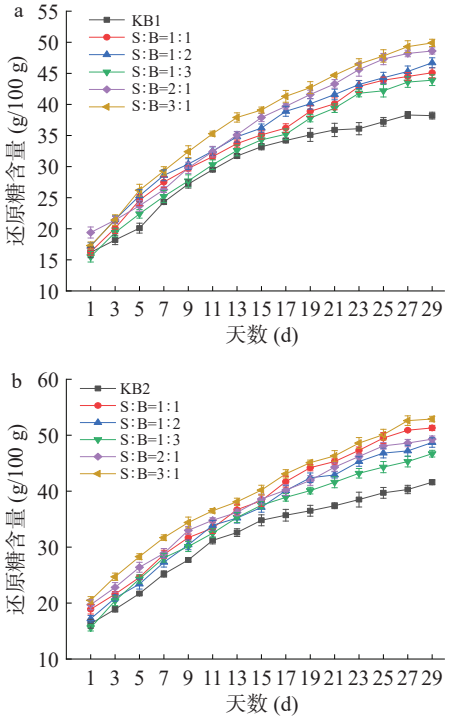


图 2 热反应时间对黑蒜还原糖含量的影响

Fig.2 Effect of thermal reaction times on reducing sugar content of black garlic

黑蒜的褐变程度没有影响。丘苑新等[18] 发酵成熟黑蒜需 30 d, 而赵蒙[19] 的蒜泥样品在热反应 14 d 时其褐变程度尚且低于空白组, 且未达到成熟标准。由此可知, 菌种协同发酵作用提升了液态黑蒜的品质指标, 缩短了液态黑蒜的制备时间。

2.2 复合菌比例、热反应时间对还原糖含量的影响

还原糖含量是黑蒜的重要检测指标之一, 还原糖含量过高, 黑蒜会有甜腻口感, 含量过低会有明显苦涩味, 并且还原糖作为美拉德反应的重要底物, 其含量的高低与褐变反应的快慢紧密相关[7]。GB/T 42205-2022 规定黑蒜还原糖含量(%)≥35 为特级标准, 还原糖含量(%)≥30 为一级标准。

由图 2 可知, 随着热反应时间的增加, 黑蒜还原糖含量呈现逐渐上升的趋势, 在相同的热反应时间下, 不同灭酶时间加入菌种黑蒜的还原糖含量均大于其相应的 KB1、KB2(P<0.05)。灭酶 9、10 min 时, 加入菌种黑蒜的还原糖含量分别在 17、13 d 均达到特级标准, 二者的还原糖含量大小次序分别为 3∶1>2∶1>1∶2>1∶1>1∶3>KB1 和 3∶1>1∶1>2∶1>1∶2>1∶3>KB2, 当菌种质量比 S∶B=3∶1 时, 二者的还原糖含量在 11 d 时分别为 35.3、36.5 g/100 g, 均达到特级标准, 是各自相同时间下 KB1、KB2 还原糖含量的 1.20、1.31 倍, 在相同的热反应时间下, 灭酶 10 min 黑蒜的还原糖含量均大于 9 min, 说明菌种协同发酵可提升液态黑蒜的还原糖含量, 提升黑蒜成熟速率, 灭酶 10 min、菌种比例 S∶B=3∶1 是此时较优条件(设为 T2)。由图 2 还可以看出, 在相同的热反应时间下, 灭酶 10 min 大于灭酶 9 min KB 的还原糖含量(P<0.05), 当热反应至 29 d 时, 二者还原糖含量分别达到 41.6 g/100 g 和 37.8 g/100 g, 由此可认为灭酶时间的差异对黑蒜还原糖含量有一定影响。李超峰等[20] 关于糖化变温对黑蒜品质的影响研究中, 其还原糖含量最高为 32 g/100 g, 徐丽华等[21] 的黑蒜在热反应 25 d 时还原糖含量仅达到 12.19 g/100 g, 明显低于本研究还原糖含量。

2.3 复合菌比例、热反应时间对总酸含量的影响

参考贾庆超等[7] 对黑蒜酸度感官评价的判断, 当总酸含量为 30~40 g/kg 时, 黑蒜酸甜适中, 低于 30 g/kg 或高于 40 g/kg, 黑蒜酸甜比例不协调。

由图 3 可知, 随着热反应时间的增加, 黑蒜总酸含量呈逐渐上升趋势, 在相同的热反应时间下, 不同灭酶时间加入菌种黑蒜的总酸含量均大于其相应的 KB1、KB2(P<0.05)。灭酶 9、10 min 时, 总酸含量大小次序分别为 1∶3>3∶1>1∶2>2∶1>1∶1>KB1 和 3∶1>1∶3>2∶1>1∶2>1∶1>KB2, 当总酸含量达到 35 g/kg 时, 灭酶 9 min、S∶B=1∶3 和灭酶 10 min、S∶B=3∶1 所需天数均为 13 d, 而 KB1、KB2 所需天数分别为 25、21 d, 说明加入菌种协同发酵可增大黑蒜的热反应速率, 缩短黑蒜成熟时间, 提升总酸含量。当热反应时间小于 5 d 时, 灭酶 9、10 min 的黑蒜总酸含量相当, 热反应时间大于 5 d 时, 前者则大于后者, 因此灭酶 9 min、S∶B=1∶3 是此时较优条件(设为 T1)。由图 3 还可以看出, 在相同的热反应时间下, KB2 的总酸含量大于 KB1(P<0.05), 当热反应至 29 d 时, 二者总酸含量分别达到了 40.97 g/kg 和

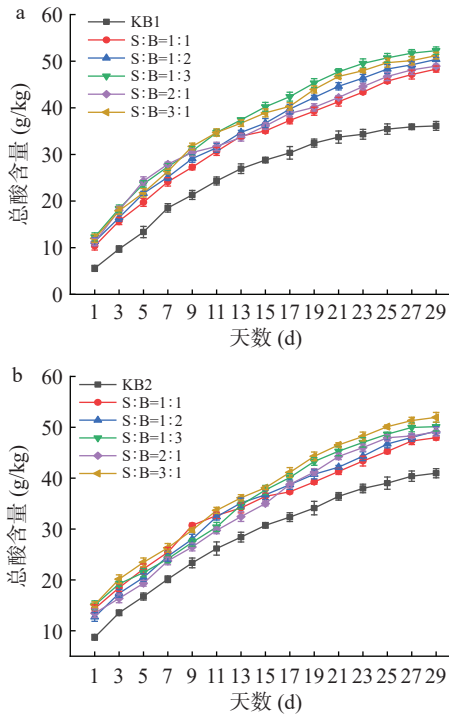


图 3　热反应时间对黑蒜总酸含量的影响

Fig.3　Effect of thermal reaction times on total acid content of black garlic

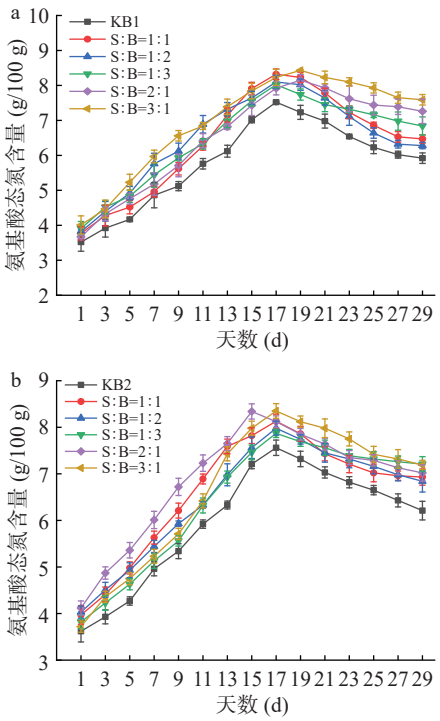


图 4　热反应时间对黑蒜氨基酸态氮含量的影响

Fig.4　Effect of thermal reaction times on amino acid nitrogen content of black garlic

36.12 g/kg，由此可认为灭酶时间对黑蒜总酸含量有一定影响。刘肖[22]在研究超声预处理热反应黑蒜品质变化时，将样品 80 ℃ 热反应 12 d 得到总酸最大值 39.409 mg/g。而王剑等[23]通过低温冷冻预处理制得的感官评分较好的黑蒜，其总酸含量仅为 3.645%，二者所得总酸含量均低于本研究黑蒜总酸含量。

2.4　复合菌比例、热反应时间对氨基酸态氮含量的影响

黑蒜热反应过程中，大蒜中的蛋白质和多肽被逐渐分解，使氨基酸态氮含量逐渐增加，同时，美拉德反应的进行又使其降低，因此氨基酸态氮含量取决于二者的反应速率。参考贾庆超等[7]对黑蒜中氨基酸态氮成熟标准的研究，以氨基酸态氮（g/100 g）≥5 时，为黑蒜成熟标准。

由图 4 可知，随着热反应时间的增加，黑蒜氨基酸态氮含量呈现先上升后下降的趋势，在相同的热反应时间下，不同灭酶时间加入菌种黑蒜的氨基酸态氮含量均大于其相应的 KB1、KB2（P<0.05）。欲达到黑蒜成熟标准，菌种质量比 S:B 分别为 1:1、1:2、1:3、2:1、3:1 时，灭酶 9 min 大蒜需热反应至 9、7、7、7、5 d，氨基酸态氮含量分别为 5.62、5.76、5.44、5.18、5.23 g/100 g，灭酶 10 min 大蒜需热反应 7、7、7、5、7 d，氨基酸态氮含量分别为 5.63、5.44、5.13、5.36、5.23 g/100 g。由此可知，灭酶 9 min、菌种质量比 S:B=3:1 与灭酶 10 min、菌种质量比 S:B=2:1 达到黑蒜成熟时间较短，但二者热反应分别至 19、15 d 时，氨基酸态氮含量均达到最大，说明前者美拉德反应消耗氨基酸态氮速率较快，反应速率较大，更有利于黑蒜的热反应进行，是此时较优条件（设为 T1）。KB1、KB2 均在热反应 9 d 时，氨基酸态氮含量分别为 5.12、5.34 g/100 g，才达成熟标准。以上说明复合菌种协同发酵可促进黑蒜热反应，缩短热反应时间。由图 4 还可以看出，灭酶 9、10 min 的 KB1、KB2 在相同的热反应天数下，氨基酸态氮含量几乎相当，差异不显著（P>0.05），说明灭酶时间对氨基酸态氮含量无影响。张新雁[24]通过对黑蒜加工温度的研究，得到了氨基酸态氮含量 5.69 g/100 g 的黑蒜，李宁阳[25]在黑蒜品质形成规律的研究中通过 80 ℃ 热反应得到了氨基酸态氮最大值为 6.08 g/100 g 的黑蒜，二者所制黑蒜氨基酸态氮含量均低于本研究，由此可认为复合菌种的加入促进黑蒜中蛋白质与多肽的分解，使氨基酸态氮含量增加。

2.5　复合菌比例、热反应时间对总酚含量的影响

总酚是黑蒜中重要的营养成分之一，具有较强的抗氧化活性，其含量是鲜蒜的 5 倍以上[26]。参考贾庆超等[7]对黑蒜中总酚成熟标准的研究，当总酚（mg/g）含量≥8 时，达到黑蒜成熟标准。

由图 5 可知，随着热反应时间的增加，黑蒜总酚含量呈逐渐递增随后趋于稳定的趋势，在相同的热反应时间下，不同灭酶时间加入菌种黑蒜的总酚含量均大于其相应的 KB1、KB2（P<0.05）。

灭酶 9、10 min 的黑蒜的总酚含量的大小次序分别为 2:1>3:1>1:2>1:3>1:1>KB1 和 3:1>2:1>1:2>1:3>1:1>KB2。欲达到黑蒜成熟标准，菌种质量比 S:B 分别为 1:1、1:2、1:3、2:1、3:1 时，灭酶 9 min 大蒜需热反应至 15、13、13、11、11 d，总酚含

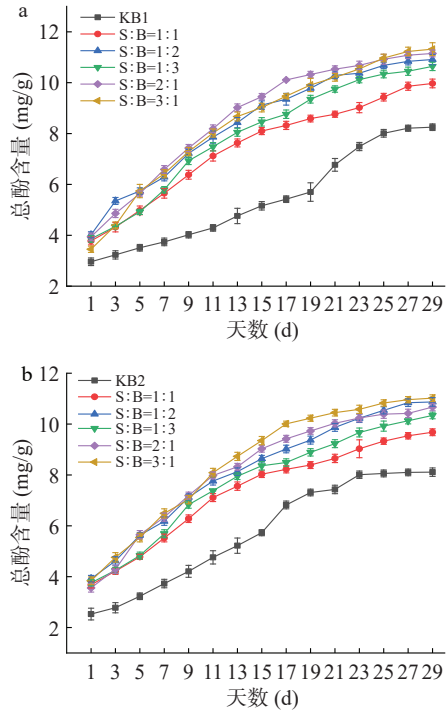


图 5　热反应时间对黑蒜总酚含量的影响

Fig.5　Effect of thermal reaction times on total phenol content of black garlic

量分别为 8.10、8.43、8.05、8.19、8.02 mg/g，灭酶 10 min 大蒜需热反应至 15、13、15、13、11 d，总酚含量分别为 8.03、8.13、8.36、8.32、8.09 mg/g。由此可知，灭酶 9 min、菌种质量比 S:B=2:1 与灭酶 10 min、菌种质量比 S:B=3:1 达到黑蒜成熟时间较短，二者在不同的热反应时间下，总酚含量相差较小，从生产的能源角度考虑，前者为二者较优条件(设为 T3)。KB1、KB2 分别在热反应 25、23 d 时，总酚含量分别为 8.01、8.03 mg/g，才达到黑蒜成熟标准。以上说明复合菌种协同发酵有利于黑蒜总酚含量的增大，缩短黑蒜成熟的热反应时间。由图 5 还可以看出，灭酶 10 min 的 KB2 比灭酶 9 min 的 KB1 提前 2 d 达到成熟标准，说明灭酶时间对总酚含量有一定的影响。汤薇等[27] 在风味黑大蒜快速发酵工艺研究中得到了总酚含量为 2.207 mg/g 的黑蒜；赵雪晴等[28] 在不同预处理对黑蒜品质的影响研究中，通过高温水煮和低温冷冻两种预处理，得到了总酚含量分别为 8.6 mg/g 和 8.2 mg/g 的黑蒜。二者所制黑蒜的总酚含量均低于本研究。

2.6　抗氧化活性

黑蒜具有较强的清除自由基的能力，抗氧化活性较强，是黑蒜的重要指标之一，因此测定黑蒜的抗氧化性活性具有重要的意义[7,9,29]。

2.6.1　复合菌比例、热反应时间对 DPPH·清除率的影响　由图 6 可知，随着热反应时间的增加，黑蒜 DPPH·清除率呈逐渐递增随后趋于稳定趋势，在相同的热反应时间下，灭酶 9、10 min 加入菌种黑蒜 DPPH·清除率均大于其相应的 KB1、KB2(P<0.05)。灭酶 9 min 时，菌种 S:B 质量比分别为 1:1、1:2、1:3、3:1 黑蒜的 DPPH·清除率在 21 d 时趋于稳定，热反应至 29 d 时，最大清除率分别为 90.12%、91.06%、93.85%、94.57%，分别为同时间 KB1 的 1.19、1.20、1.24、1.25 倍。菌种质量比 S:B 为 2:1 黑蒜的 DPPH·清除率 19 d 趋于稳定，29 d 时最大清除率为 96.02%，是同时间 KB1 的 1.27 倍。灭酶 10 min 时，菌种 S:B 质量比分别为 1:1、1:2、2:1、3:1 黑蒜的 DPPH·清除率在 25 d 时趋于稳定，热反应至 29 d 时，最大清除率分别为 92.94%、90.49%、95.02%、93.46%，分别为同时间 KB2 的 1.19、1.16、1.22、1.20 倍。菌种质量比 S:B 为 1:3 的黑蒜 DPPH·清除率 21 d 趋于稳定，在 29 d 时最大清除率为 96.12%，是同时间 KB2 的 1.23 倍。由此可知，菌种协同发酵可提升液态黑蒜的 DPPH·清除率，灭酶 9 min、菌种质量比 S:B=2:1 的 DPPH·清除率趋于稳定所需时间短，且灭酶时间短，所需能耗较低，是此时较优条件(设为 T3)。由图 6 还可以看出，KB1、KB2 的 DPPH·清除率在热反应过程中差异较小，不显著(P>0.05)，可认为灭酶时间对 DPPH·清除率有较小影响。在添加相同的黑蒜提取液体积及 DPPH·浓度下，王玉荣等[30] 在黑蒜的简易制备及其抗氧化活性的研究中，经 30 d 热反应得到了 DPPH·清除率为 85.3% 的黑蒜样品；贾庆超等[31] 采用低温冷冻 8 h 制备的液态黑蒜，DPPH·清除率达到 86.4%，采用单一菌种嗜热链球菌[7] 和保加利亚乳杆菌[8] 发酵制备的液态黑蒜，DPPH·清除率分别为 86.95% 和 87.21%，而本文复合菌种发酵制备液态黑蒜 DPPH·

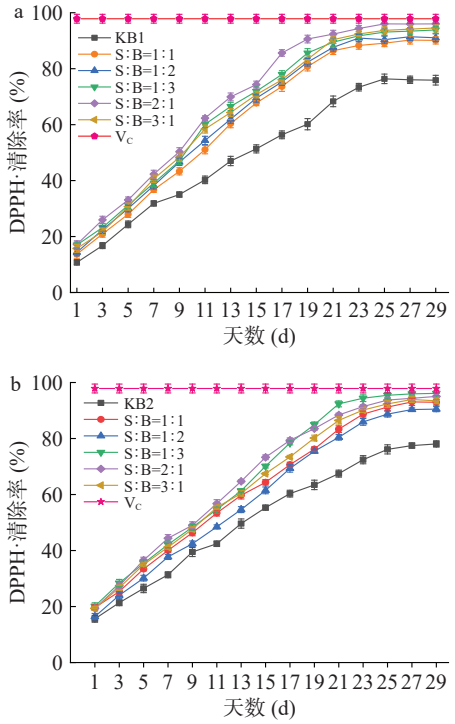


图 6　热反应时间对黑蒜 DPPH·清除率的影响

Fig.6　Effect of thermal reaction times on DPPH· scavenging rate of black garlic

清除率为 96.02%，明显高于以上研究。

2.6.2　复合菌比例、热反应时间对·OH 清除率的影响　由图 7 可知，随着热反应时间的增加，黑蒜·OH 清除率呈逐渐递增随后趋于稳定趋势，在相同的热反应时间下，灭酶 9、10 min 加入菌种黑蒜的·OH 清除率均大于其相应的 KB1、KB2（P<0.05）。

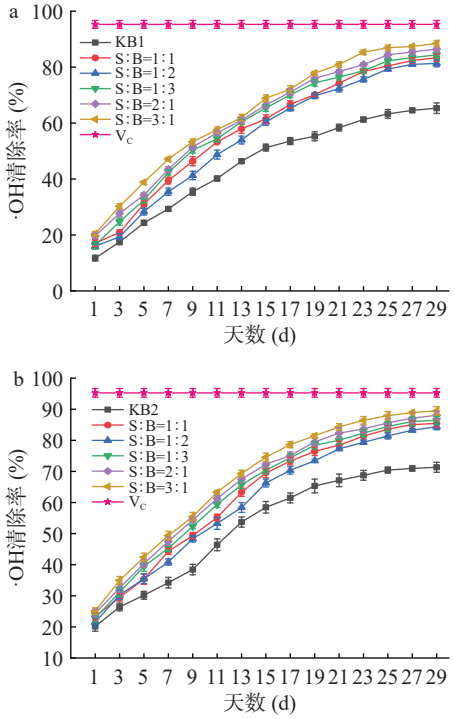


图 7　热反应时间对黑蒜·OH 清除率的影响

Fig.7　Effect of thermal reaction times on ·OH scavenging rate of black garlic

灭酶 9 min 时，菌种 S：B 质量比分别为 1∶1、1∶2、2∶1、1∶3 黑蒜的·OH 清除率在 25 d 时趋于稳定，热反应至 29 d 时，最大清除率分别为 83.38%、81.32%、86.42%、84.37%，分别为同时间 KB1 的 1.28、1.24、1.32、1.29 倍。菌种质量比 S∶B 为 3∶1 黑蒜的·OH 清除率 23 d 趋于稳定，·OH 清除率为 86.92%，均高于其他液态黑蒜，在 29 d 时最大清除率为 88.42%，是同时间 KB1 的 1.35 倍。灭酶 10 min 时，菌种质量比 S∶B 分别为 1∶1、1∶3、2∶1、3∶1 黑蒜的·OH 清除率在 17 d 开始增长缓慢，21 d 时趋于稳定，热反应至 29 d 时，最大清除率分别为 85.45%、86.42%、88.03%、89.47%，分别为同时间 KB2 的 1.20、1.21、1.23、1.25 倍，S∶B 为 1∶2 黑蒜的·OH 清除率 21 d 增长缓慢且趋于稳定，热反应至 25 d 时，·OH 清除率为 81.42%，在 29 d 时最大清除率为 84.37%，是同时间 KB2 的 1.18 倍，且在相同的热反应时间下，S∶B 为 3∶1 时，·OH 清除率高于其他菌种质量比的黑蒜。由此可知，菌种发酵可提升液态黑蒜的·OH 清除率，灭酶 10 min、S∶B=3∶1 黑蒜的·OH 清除率较高，是此时较优条件（设为 T2）。由图 7 还可以看出，在相同的热反应时间下，KB2 的·OH 清除率均高于 KB1（P<0.05），说明灭酶时间对制备液态黑蒜的·OH 清除率有一定的影响。在添加相同的黑蒜提取液体积下，王玉荣[30] 等在黑蒜的简易制备及其抗氧化活性的测定研究中经 30 d 热反应得到了·OH 清除率为 77.5% 的黑蒜样品。贾庆超等[31] 采用低温冷冻 8 h 制备的液态黑蒜，·OH 清除率达到 73.1%，采用单一菌种嗜热链球菌[7] 和保加利亚乳杆菌[8] 制备的液态黑蒜，·OH 清除率分别为 85.2% 和 81.69%，而本文复合菌种发酵制备液态黑蒜·OH 清除率为 89.47%，明显高于以上研究。

2.7　最佳制备条件分析

对以上较优条件 T1~T4 进行对比分析，综合考虑液态黑蒜的品质指标及灭酶能耗等问题，液态黑蒜的最佳制备方案为 T1，即灭酶 9 min、菌种比例 S∶B 为 3∶1，此时黑蒜热反应成熟的时间为 13 d。以相同条件下 KB1 为参照，此时还原糖含量为其 1.20 倍，总酚含量为其 1.82 倍，总酸含量为其 1.36 倍，氨基酸态氮为其 1.21 倍，DPPH·清除率和·OH 清除率分别为其 1.37、1.34 倍。结合本文作者前期使用单一发酵菌种嗜热链球菌[7] 和保加利亚乳杆菌[8] 的研究结果，三者共同点为灭酶温度为 180 ℃，菌种与灭酶液态大蒜共存发酵时间均为32 h，指标综合对比如下表 1 所示。

由表 1 可知，菌种 S∶B 为 3∶1 时，复合菌种发酵制备液态黑蒜的成熟时间比单一菌种 S 缩短 2 d，比单一菌种 B 缩短 5 d，虽然各种品质指标相对单一菌种 S 和 B 均有所降低，但也均满足黑蒜的成熟指标，说明复合乳酸菌发酵制备液态黑蒜具有一定的协同作用，可缩短黑蒜的制备时间，降低制备黑蒜的能耗，节约生产成本。

2.8　最佳制备条件下的液态黑蒜香气成分组成

分别对最佳制备方案的液态黑蒜和 KB1 进行香气成分分析，如图 8 所示。

表 1　三种制备条件下液态黑蒜指标对比

Table 1　Comparison of liquid black garlic indicators under three preparation conditions

对比指标	灭酶时间（min）	菌种添加量（%）	黑蒜成熟时间（d）	褐变程度	还原糖含量（g/100 g）	总酸含量（g/kg）	氨基酸态氮含量（g/100 g）	总酚含量（mg/g）	DPPH·清除率（%）	·OH清除率（%）
菌种S	9	5	15	60.92±1.47^{a}	45.72±0.85^{a}	37.26±0.76^{b}	7.51±0.19^{a}	9.77±0.32^{a}	66.58±1.75^{a}	65.14±1.14^{a}
菌种B	10	6	18	62.49±1.13^{b}	44.61±0.58^{a}	48.48±0.66^{a}	7.79±0.25^{a}	8.78±0.19^{b}	66.92±1.27^{a}	65.97±0.98^{a}
S:B为3:1	9	5	13	60.10±1.12^{c}	37.90±0.52^{b}	36.71±0.70^{b}	7.39±0.22^{a}	8.67±0.17^{b}	64.33±1.44^{a}	61.97±1.10^{b}

注：组内方差分析，字母不同，差异显著（P<0.05）。

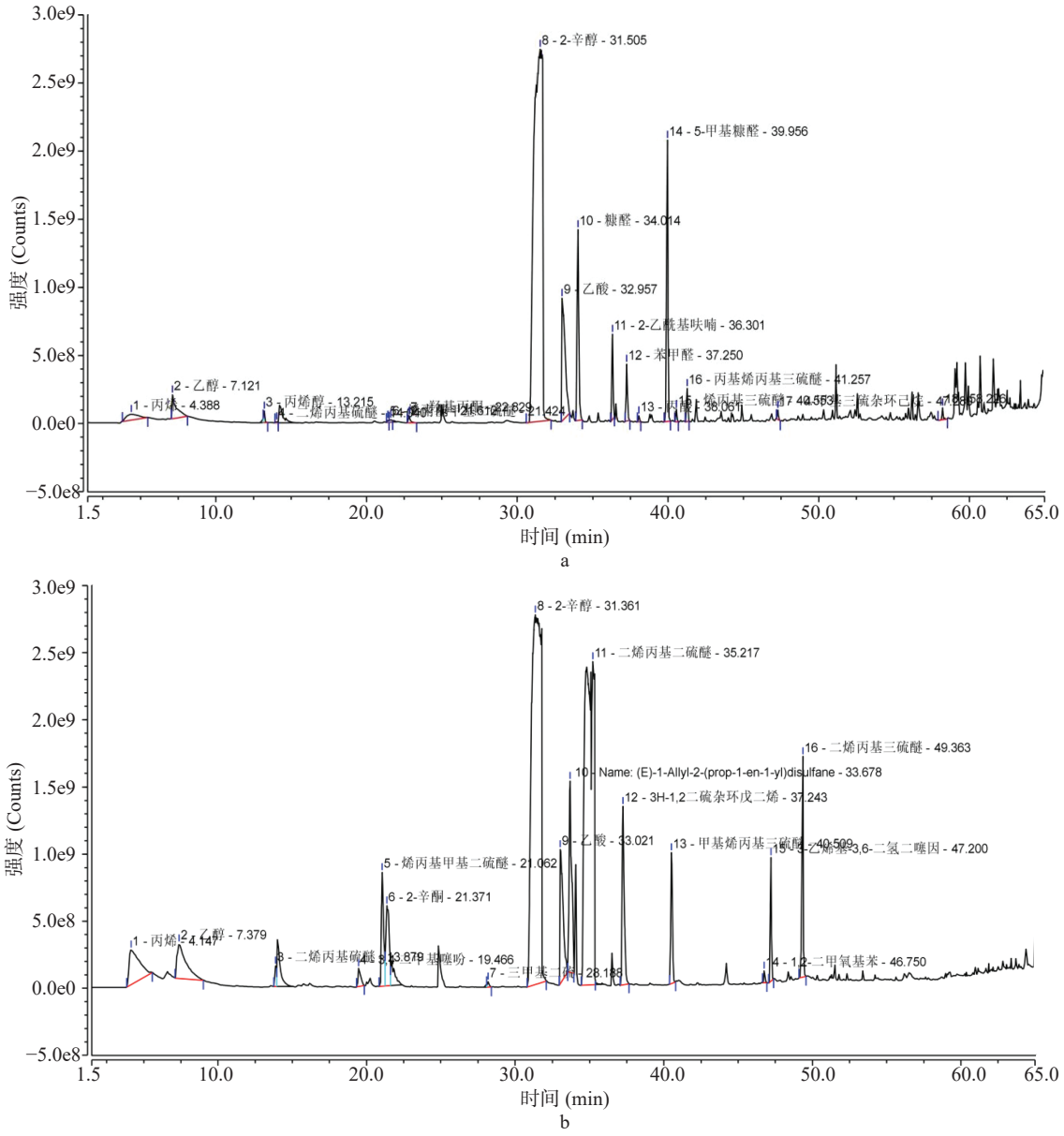


图 8 液态黑蒜香气成分总离子流图

Fig.8 Total ion chromatogram of aroma components in liquid black garlic

注: a、菌种比例 S∶B=3∶1; b、KB。

由表 2 可知, 灭酶 9 min, 菌种比例为 S∶B=3∶1 的样品中检测到的挥发性香气成分主要有硫醚类(6.21%)4 种、醛类(47.98%)3 种、酸类(25.31%)2 种、酮类(1.14%)2 种、呋喃类(6.18%)1 种等。由表 2 可知, KB 样品中检测到的挥发性香气成分主要有硫醚类(60.38%)5 种、酸类(6.78%)1 种等。

研究表明, 硫醚类化合物香气阈值低, 能被感知的最小浓度较小, 特征性强, 具有强烈的生蒜味和辛辣味[32−33]。郭思文等[33] 研究发现硫醚类化合物是大蒜挥发性风味物质的主要成分, 占蒜泥挥发性风味物质的 80% 左右, 对蒜泥风味的贡献至关重要; 醛类化合物主要提供脂肪香、柑橘香和杏仁油的香气, 对蒜类的挥发性气味有一定的贡献, 而酸类化合物的挥发性比较小, 呈香性相对较差, 对香气的贡献较低; 酮类化合物因其含量较低, 对香味贡献较小; 呋喃类化合物的感官特征主要伴以似焦糖气味, 水果气味, 坚果气味, 焦糊气味的印象, 它的气味特征较明显, 香气感觉阈值极低, 很容易被人觉察, 对大蒜香气有一定贡献。由此可知, 灭酶 9 min 的 KB 样品硫醚类含量比菌种比例为 S∶B=3∶1 的高 54.17%, 香气成分以生蒜味和辛辣味为主; 菌种比例为 S∶B=3∶1 的黑蒜样品因含有较多的醛类(47.98%)与少量呋喃类化合物(6.18%), 相比于 KB 样品, 呈现出较好的香气, 液态黑蒜基本没有蒜臭味, 可接受度很好, 参考罗仓学等[3] 对液态黑蒜感官评价标准, 从口感(30%)、气味(30%)、可接受度(20%)、色泽(10%)、蒜肉质地(10%)综合评价, 感官评分为 91.38±0.98 分。综上所述, 菌种比例 S∶B=3∶1 的复合菌种协同发酵促使黑蒜样品中硫醚类物质含量降低, 醛类、酮类等挥发性物质增多, 对黑蒜香气做出较大贡献, 生蒜味、辛

表 2　菌种比例为 S∶B=3∶1 及 KB 的液态黑蒜香气成分组成

Table 2　Composition of aroma components of liquid black garlic with a strain ratio of S∶B=3∶1 and KB

峰号	名称	英文	分子式	菌种比例S∶B=3∶1		KB	
				保留时间(min)	相对含量(%)	保留时间(min)	相对含量(%)
1	丙烯	Propylene	C_3H_6	4.39	4.45±0.11[a]	4.15	5.77±0.12[b]
2	乙醇	Ethanol	C_2H_6O	7.12	6.71±0.15[a]	7.38	5.15±0.10[b]
3	二烯丙基硫醚	Diallyl sulfide	$C_6H_{10}S$	14.04	2.62±0.07[a]	13.88	0.54±0.03[b]
4	烯丙基甲基二硫醚	Allyl methyl disulfide	$C_4H_8S_2$	21.42	0.21±0.01[a]	21.06	4.07±0.06[b]
5	2-辛酮	2-Octanone	$C_8H_{16}O$	21.61	0.38±0.02[a]	21.37	4.21±0.08
6	乙酸	Acetic acid	$C_2H_4O_2$	32.96	24.87±1.18[a]	33.02	6.78±0.27[b]
7	丙烯醇	Propenol	C_3H_6O	13.21	0.73±0.05	/	/
8	羟基丙酮	Hydroxyacetone	$C_3H_6O_2$	22.83	0.76±0.03	/	/
9	糠醛	Furfural	$C_5H_4O_2$	34.01	19.43±0.85	/	/
10	2-乙酰基呋喃	2-Acetylfuran	$C_6H_6O_2$	36.30	6.18±0.36	/	/
11	苯甲醛	Benzaldehyde	C_7H_6O	37.25	4.28±0.68	/	/
12	丙酸	Propionic acid	$C_3H_6O_2$	38.06	0.44±0.06	/	/
13	5-甲基糠醛	5-Methylfurfural	$C_6H_6O_2$	39.96	24.27±0.21	/	/
14	烯丙基三硫醚	Allyl trisulfide	$C_6H_{10}S_3$	40.55	0.79±0.06	/	/
15	丙基烯丙基三硫醚	Propyl allyl trisulfide	$C_6H_{12}S_3$	41.26	2.59±0.22	/	/
16	4-甲基三硫杂环己烷	4-Methyl trisulfide cyclohexane	$C_4H_5S_3$	47.28	0.58±0.06	/	/
17	3,4-二甲基噻吩	3,4-Dimethylthiophene	C_6H_8S	/	/	19.47	0.82±0.03
18	三甲基二硫	Trimethyldisulfide	$C_3H_8S_2$	/	/	28.19	0.15±0.02
19	(E)-1-Allyl-2-(prop-1-en-1-yl)disulfane	(E)-1-Allyl-2-(prop-1-en-1-yl)	$C_6H_{10}S_2$	/	/	33.68	8.08±0.65
20	二烯丙基二硫醚	Diallyl Disulfide	$C_6H_{10}S_2$	/	/	35.21	47.94±1.85
21	3H-1,2二硫杂环戊二烯	3H-1,2-Dithiocyclopentadiene	$C_3H_2S_3$	/	/	37.24	6.13±0.67
22	甲基烯丙基三硫醚	Methyl allyl trisulfide	$C_4H_8S_3$	/	/	40.51	3.25±0.11
23	1,2-二甲氧基苯	1,2-Dimethoxybenzene	$C_8H_{10}O_2$	/	/	46.75	0.23±0.03
24	3-乙烯基-3,6-二氢二噻因	3-Vinyl-3,6-dihydrodithioin	$C_6H_8OS_2$	/	/	47.20	2.28±0.07
25	二烯丙基三硫醚	Diallyl trisulfide	$C_6H_{10}S_3$	/	/	49.36	4.58±0.18
26	2-辛醇	2-Octanol	$C_8H_{18}O$	/	/	/	/

注：组内方差分析，字母不同，差异显著（P<0.05）；/表示未检出。

辣味、刺激性降低，香气成分增加。

3　结论

本文研究了复合乳酸菌协同发酵制备液态黑蒜的最佳制备条件及香气成分分析，结果表明：在不同灭酶时间下，加入菌种的液态黑蒜品质指标均优于 KB；液态黑蒜的制备条件为：灭酶温度 180 ℃，灭酶时间 9 min，菌种比例 S∶B 为 3∶1，液态黑蒜达到成熟标准各指标所需时间均被缩短，褐变程度、还原糖含量、总酸含量、氨基酸态氮含量、总酚含量所需时间分别为 13、11、13、5、11 d，分别为相同条件下 KB 样品的 1.19、1.20、1.36、1.25、1.87 倍，二者差异显著（P<0.05），29 d 时，最大 DPPH·清除率和·OH 清除率分别是 94.57%、88.42%，分别是 KB 的 1.25、1.35 倍，二者差异显著（P<0.05）。黑蒜成熟时间为 13 d，相对单一菌种 S 和 B 分别缩短 2 d 和 5 d，说明复合菌种的发酵制备液态黑蒜具有协同作用，不仅可以提升黑蒜的品质指标，还可以缩短液态黑蒜的成熟时间，节约生产成本。对最佳制备条件下液态黑蒜的香气成分分析结果表明，乳酸菌协同发酵制备的液态黑蒜可降低其刺激性，增多醛类和呋喃类风味物质与营养价值成分，改善风味，更易令人接受。

由于乳酸菌种类繁多，且不同乳酸菌种之间协同作用不同，对液态黑蒜的发酵作用亦不同，所以课题组下一步将研究其他不同菌种协同作用下制备液态黑蒜技术，并与本文研究结果相比较，为乳酸菌协同发酵制备液态黑蒜的工业化提供详实的数据参考。

© 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] 刘明. 大蒜的功效及深加工研究进展[J]. 农业科技通讯，2021(10)：179−181. [LIU M. Research progress on efficacy and deep processing of garlic[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2021(10): 179−181.]

[2] 叶淼，刘春凤，李梓语，等. 黑蒜的营养功能及其加工工艺研究进展[J]. 食品与发酵工业，2022，48(1)：292−300,307. [YE Miao, LIU Chunfeng, LI Ziyu, et al. Research progress on nutritional function and processing technology of black garlic[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 292−300,307.]

[3] 罗仓学, 苏东霞, 陈树雨. 液态黑蒜发酵工艺优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 292−297. [LUO Cangxue, SU Dongxia, CHEN Shuyu. Optimization of liquid-fermentation technology for black garlic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(18): 292−297.]
[4] 于蒙娜. 黑蒜液态发酵工艺研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. [YU Mengna. Black garlic liquid fermentation process[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.]
[5] KARNJANAPRATUM S, SUPAPVANICH S, KAEWTHONG P, et al. Impact of steaming pretreatment process on characteristics and antioxidant activities of black garlic (*Allium sativum* L.)[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(5): 1869−1876.
[6] QI Dan, NIE Xiaolu, ZHANG Jianjun. The effect of probiotics supplementation on blood pressure: A systemic review and meta-analysis[J]. Lipids in Health and Disease, 2020, 19(1): 79.
[7] 贾庆超, 何军波, 李望铭, 等. 嗜热链球菌对液态发酵黑蒜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 168−181. [JIA Qingchao, HE Junbo, LI Wangming, et al. Effects of *Streptococcus thermophilus* on the fermentation quality of liquid black garlic[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 168−181.]
[8] 贾庆超, 刁伟, 李柯莹, 等. 保加利亚乳杆菌预处理制备液态黑蒜技术研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(11): 127−135. [JIA Qingchao, DIAO Wei, LI Keying, et al. Study on preparation technology of liquid black garlic by pretreatment with *Lactobacillus bulgaricus*[J]. China Condiment, 2024, 49(11): 127−135.]
[9] SI Lihui, LIN Ruixin, JIA Yan, et al. *Lactobacillus bulgaricus* improves antioxidant capacity of black garlic in the prevention of gestational diabetes mellitus: A randomized control trial[J]. Bioscience Reports, 2019, 39(8).
[10] LEE H S, LIM W C, LEE S J, et al. Antiobesity effect of garlic extract fermented by *Lactobacillus plantarum* BL2 in diet-induced obese mice[J]. Journal of Medicinal Food, 2016, 19(9): 823−829.
[11] 侯进慧, 李勇, 唐梦笛, 等. 乳酸菌复合发酵大蒜风味、活性成分和微生物种群变分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 92−95. [HOU J H, LI Y, TANG M D, et al. Analysis of the changes of flavor, active components and microbial population in fermentation of garlic by lactic acid bacteria[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(21): 92−95.]
[12] YAMAMOTO E, WATANABE R, TOOYAMA E, et al. Effect of fumaric acid on the growth of *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* during yogurt fermentation[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(9): 9617−9626.
[13] KIM Y S, BEAK H H, CHUNG M I, et al. Garlic fermentation by lactic acid bacteria[J]. Food Science and Biotechnology, 2009, 18(5): 1279−1283.
[14] LI Ningyang, LU Xiaoming, PEI Houbao, et al. Effect of freezing pretreatment on the processing time and quality of black garlic[J]. Journal of Food Process Engineering, 2015, 38(4): 329−335.
[15] 彦繁鹤, 周金梅, 吴如春. DNS 法测定甘蔗渣中还原糖含量[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(2): 126−128. [YAN Fanhe, ZHOU Jinmei, WU Ruchun. Colorimetric determination of reducing sugar by methanoic acid pretreatment bagasse with 3, 5-dinitrosalicylic acid[J]. Food Research and Development, 2015, 36(2): 126−128.]
[16] 郑岚, 梁洁, 赵永雷, 等. 独瓣、多瓣黑蒜发酵前后成分及抗氧化活性的分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(16): 95−102. [ZHENG Lan, LIANG Jie, ZHAO Yonglei, et al. Compositions and antioxidant activities of single-clove and multiple-clove black garlic before and after fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(16): 95−102.]
[17] 陈清爱, 林湘旋, 陈驰, 等. 复合乳酸菌发酵红茶汤香气成分及活性因子变化规律[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(6): 835−842. [CHEN Q A, LIN X X, CHEN C, et al. Variation of aromatic components and active components in black tea infusion fermented with compound *Lactobacillus*[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2022, 51(6): 835−842.]
[18] 丘苑新, 杨静娴, 何娣, 等. 黑蒜快速发酵工艺研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(3): 114−117. [QIU Yuanxin, YANG Jingxian, HE Di, et al. Study on the rapid fermentation technology of black garlic[J]. China Condiment, 2021, 46(3): 114−117.]
[19] 赵蒙. 茶多酚对黑蒜品质及 5-HMF 生成的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [ZHAO Meng. Effects of tea polyphenols on quality of black garlic and production of 5-HMF[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.]
[20] 李超峰, 沈银涵, 吴雯雯, 等. 糖化变温的不同处理对黑蒜品质的影响[J]. 生物资源, 2020, 42(2): 254−261. [LI Chaofeng, SHEN Yinhan, WU Wenwen, et al. Effect of temperature change in saccharifying on the quality of black garlic[J]. Biotic Resources, 2020, 42(2): 254−261.]
[21] 徐丽华, 温佳艺, 刘顺枝, 等. 黑蒜加工过程中主要营养物质及抗氧化活性变化的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(13): 4321−4327. [XU Lihua, WEN Jiayi, LIU Shunzhi, et al. Study on the changes of main nutrients and antioxidant activities of black garlic during processing[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(13): 4321−4327.]
[22] 刘肖. 巫山紫红天蒜制备黑蒜的工艺优化及品质特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020. [LIU Xiao. Study on process optimization and quality characteristics of black garlic prepared by Wushan purple-red garlic[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.]
[23] 王剑, 黄爽爽, 冷云伟, 等. 发酵大蒜关键风味物质及形成机理的研究[J]. 中国检验检测, 2022, 30(1): 21−29. [WANG Jian, HUANG Shuangshuang, LENG Yunwei, et al. Study on key flavour substances and formation mechanism of fermented garlic[J]. China Inspection Body & Laboratory, 2022, 30(1): 21−29.]
[24] 张新雁. 加工温度对黑蒜品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016. [ZHANG Xinyan. Effects of temperature on the quality of black garlic[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.]
[25] 李宁阳. 黑蒜品质形成规律及抗氧化功能研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014. [LI Ningyang. Quality formation and antioxidant activity of black garlic[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014.]
[26] 李静, 葛世浩, 多佳, 等. 短时黑蒜体外抗氧化活性及其多酚提取优化[J]. 食品工业, 2022, 43(11): 117−123. [LI Jing, GE Shihao, DUO Jia, et al. Antioxidant activity of short-processing black garlic *in vitro* and optimization of polyphenol extraction[J].

The Food Industry, 2022, 43(11): 117−123.］
［27］ 汤薇, 时培宁, 王颖, 等. 风味黑大蒜快速发酵工艺研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(10): 101−104. ［TANG Wei, SHI Peining, WANG Ying, et al. Study on rapid fermentation technology of flavored black garlic[J]. China Condiment, 2019, 44(10): 101−104.］
［28］ 赵雪晴, 李嗣生, 侯文博, 等. 不同预处理对黑蒜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(23): 1−4. ［ZHAO Xueqing, LI Sisheng, HOU Wenbo, et al. Effects of different pretreatments on the quality of black garlic[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(23): 1−4.］
［29］ VATHSALA V, SAURABH V, KUMAR C G, et al. Black garlic particles as a natural pigment and emulsifier in a Pickering emulsion based low fat innovative mayonnaise: Improved rheology and bioactivity[J]. Food Research International, 2023, 173: 113484.
［30］ 王玉荣, 曲田丽, 高敏, 等. 黑蒜的简易制备及其抗氧化活性的测定[J]. 食品科技, 2014, 39(1): 268−271,276. ［WANG Yurong, QU Tianli, GAO Min, et al. The simple preparation and determination of antioxidant activity of black garlic[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(1): 268−271,276.］
［31］ 贾庆超, 张梦月, 于婉婉, 等. 低温预处理对液态发酵黑蒜品质的影响[J]. 中国调味品, 2023, 48(7): 73−80. ［JIA Qingchao, ZHANG Mengyue, YU Wanwan, et al. Effects of low-temperature pretreatment on the quality of liquid-state fermented black garlic[J]. China Condiment, 2023, 48(7): 73−80.］
［32］ 王瑜, 那效娟, 景浩. 大蒜含硫化合物及风味研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(10): 3092−3097. ［WANG Yu, XING Xiaojuan, JING Hao. Advances in sulfur compounds and garlic flavor research[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(10): 3092−3097.］
［33］ 郭思文, 王丹, 赵晓燕, 等. 不同颜色蒜泥的风味及挥发性物质分析[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 256−262. ［GUO Siwen, WANG Dan, ZHAO Xiaoyan, et al. Analysis of the flavor and volatile components of crushed garlic cloves with different colors[J]. Food Science, 2019, 40(22): 256−262.］