

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025269

引用格式:史巧,刘毕琴,汤回花,等.发酵蔬菜菌种应用及菌群调控研究进展[J].食品与发酵工业,2021,47(5):273-281. SHI Qiao, LIU Biqin, TANG Huihua, et al. Research progress on the application of starter strains and the regulation of microflora in vegetable fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5):273-281.

发酵蔬菜菌种应用及菌群调控研究进展

史巧¹, 刘毕琴¹, 汤回花¹, 王馨蕊¹, 朱力舟¹, 赵楠², 李宏^{1*}

1(云南省农业科学院农产品加工研究所, 云南 昆明, 650223)

2(四川省农业科学院农产品加工研究所, 四川 成都, 610011)

摘要 蔬菜发酵是控制一定生产条件,通过微生物代谢活动对新鲜蔬菜进行冷加工,以保持蔬菜的营养和提高风味品质的一种方式。发酵蔬菜中的菌群决定了产品的风味特征、营养功能和安全性,同时菌群也影响发酵成品的保藏性能。文章综述了近年来发酵蔬菜微生物多样性和基于多组学技术的微生物作用机理研究进展,分析了发酵蔬菜中功能菌种的选育、应用和影响微生物菌群的因素。通过生物、化学、物理多重手段调控发酵蔬菜菌群,可提高发酵蔬菜的品质,为工业化生产品质稳定、优良的发酵蔬菜提供理论指导。

关键词 发酵蔬菜;组学;菌种选育;乳酸菌;菌群调节

发酵蔬菜是新鲜蔬菜经不同程度的微生物发酵,形成具有风味独特、保质期长、营养价值高的制成品,包括四川泡菜、涪陵榨菜、东北酸菜等各地传统腌制蔬菜。近年来我国发酵蔬菜产业发展迅速,呈现出广阔的市场空间,然而相比泡菜产业较为领先的韩国而言,我国的规模化、标准化生产水平仍存在差距,工艺大多传统粗放,产品质量不稳定,对于健康绿色产品开发不足。为了改进发酵蔬菜的生产工艺,提高产品竞争力,对于发酵微生物作用机制和精准调控工艺的研究及功能菌剂的挖掘利用有着重要的现实意义。

微生物的作用贯穿于发酵蔬菜生产的全过程。在自然发酵过程中,蔬菜表面附着的乳酸菌通过生成代谢产物和低氧环境成为优势菌,而蔬菜发酵成功的关键是控制环境条件达到抑制有害微生物的活动,促进乳酸菌以及产风味物质的酵母菌等微生物以适宜的菌落结构生长和演替,发挥其代谢功能以形成发酵蔬菜的特征风味及感官品质。一方面,微生物对于改善发酵蔬菜风味、保留营养成分不可缺少;同时,发酵蔬菜中丰富的活性乳酸菌可以促进肠道健康,其多种保健功能已被广泛接受。另一方面,微生物引起的蔬菜制品过度发酵,严重影响了产品的储存性和感官营养品质,是工业生产面临的一大难题。因此,了解发酵蔬菜中微生物群落组成及特性,针对性地调控菌群,从而控制发酵蔬菜品质具有十分重要的意义。本文从发酵蔬菜微生物群落结构、功能菌种的应用和影

响菌群的因素几方面进行了综述,期望为工业化生产高品质发酵蔬菜提供理论依据。

1 发酵蔬菜菌群研究进展

微生物对蔬菜发酵过程影响重大,将蔬菜基质中的碳水化合物、蛋白质分解成乳酸、乙醇、醋酸、氨基酸等物质,并进一步生成酮类、醛类、醇类、酯类等多种风味物质。其中以乳酸菌为主导的乳酸发酵是最核心的反应,分为同型和异型发酵^[1]。同型发酵的代谢产物为乳酸,而异型发酵除生成乳酸外,还生成乙醇、乙酸和CO₂等物质,对发酵蔬菜独特风味的形成起着关键作用。乳酸菌代谢产生的2,3-丁二醇、乙偶姻及双乙酰等也是重要的生香物质。

蔬菜发酵过程除乳酸发酵外,还伴有乙醇发酵及轻微的醋酸发酵。发酵初期,由于酵母菌的无氧呼吸及异型乳酸发酵作用会有少量乙醇生成。蔬菜发酵中常见的有益酵母菌有圆酵母、鲁氏酵母、隐球酵母等,而产酸酵母为有害酵母。在后熟阶段,乙醇与有机酸生成的酯类是发酵蔬菜香气的来源之一,乙醇还能增强发酵蔬菜的贮藏性。乙醇可以作为醋酸发酵的底物,在有氧条件下醋酸菌利用乙醇作为基质生成醋酸。蔬菜发酵中常见的醋酸菌有黑醋菌、膜醋菌和红醋菌等。在发酵过程中存有少量的醋酸有益于产品的风味形成,除了醋酸特有的风味外,醋酸可以与乙醇形成醋酸乙酯,增加产品香气。

第一作者:博士,助理研究员(李宏研究员为通讯作者, E-mail: ynveg@163.com)

基金项目:云南特色发酵蔬菜加工关键共性技术与产业化项目(202002AE320006)

收稿日期:2020-08-27, 改回日期:2020-09-11

传统发酵蔬菜生产中涉及种类众多的微生物,这些微生物形成复杂的菌群结构,产生复杂多样的风味成分,同时可以改良蔬菜的保藏性质和营养功能。传统的可培养方法和分子微生物生态学方法难以对如此复杂的微生物菌群结构和功能进行系统的分析。近年来,蓬勃发展起来的高通量测序以及多组学技术已应用于发酵蔬菜发酵过程中微生物群落及代谢产物的研究,可从本质上揭示自然发酵中微生物菌群如何影响蔬菜发酵过程,并最终决定产品的安全性、风味口感和营养功能。

1.1 发酵蔬菜中微生物变化规律

由于受原料、环境气候、加工工艺等因素影响,不同蔬菜发酵过程中微生物群落变化各具特点,但一般呈现异型乳酸发酵和同型乳酸发酵 2 个主要阶段。异型发酵乳酸菌包括明串珠球菌、乳球菌和部分乳杆菌(如短乳杆菌、发酵乳杆菌和罗伊氏乳杆菌)。同型乳酸发酵阶段,发酵液酸度增大,优势菌明串珠菌死亡,乳杆菌属成为优势菌群,最后由于乳酸的大量积累而抑制乳酸菌自身的生长,发酵便趋于终止。同型发酵的乳酸菌有德氏乳杆菌、植物乳杆菌、戊糖片球菌、乳酸链球菌等^[2]。发酵后期,耐酸性强的酵母菌可利用体系中的小分子成分合成香味物质。随着发酵后储藏时间的延长,蔬菜品质达到最佳后开始逐渐下降,原因有同型发酵过甚引起产品过酸,腐败菌引起的胀袋变质等。

对自然发酵酸菜的微生物多样性进行研究,结果显示,细菌群落多样性大于真菌,包括明串珠球菌属、芽孢杆菌属、假单胞菌属和乳杆菌属等 14 个物种,优势的真菌包括汉逊德巴利酵母,热带假丝酵母和青霉。JUNG 等^[3]运用宏基因组学对泡菜 29 d 发酵过程进行研究,发酵起始阶段,明串珠菌占优势,随后乳杆菌和魏斯氏菌丰度增加,3 种菌成为主要菌群。而 23 天后,明串珠菌的丰度再次升高,乳杆菌和魏斯氏菌的丰度逐渐降低。比对发现,大部分源自泡菜的宏基因组序列与肠膜明串珠菌和清酒乳杆菌基因序列具有高度相似性,这 2 种菌在泡菜发酵过程中可能发挥重要作用。在宏基因组数据库中也发现了大量的噬菌体 DNA 序列,表明泡菜在发酵过程中感染了噬菌体。JEONG 等^[2]使用焦磷酸测序对韩国泡菜中微生物群落分析显示,在发酵 100 d 的萝卜和发酵 120 d 的辣白菜中,明串珠球菌为主要发酵菌,明串珠球菌、乳球菌、乳杆菌和魏斯氏菌等多种乳酸菌有助于发酵初期 pH 降低,随着游离糖消耗以及甘油和乙醇

的产生,细菌丰度下降、酵母菌数量增加。刘长蕾等^[4]对东北酸菜和韩国辣白菜发酵过程中微生物变化规律进行研究,发现明串珠菌是发酵初期的优势菌,在发酵 8 d 时数量达到最高,随后逐渐降低。LI-ANG 等^[5]对工业发酵泡菜中的微生物群落进行研究,指出在发酵过程中,厚壁菌门和变形菌门是优势菌群,在青菜和榨菜泡菜中观察到相同优势种属的细菌,消化乳杆菌、*Lactobacillus paralimentarius*,乳杆菌在发酵的初期丰度较高,后期大致保持不变。

1.2 发酵蔬菜微生物代谢作用

有学者对泡菜发酵或长期储藏过程中,微生物演替与代谢物变化的相关性进行研究^[2,6-7]。JUNG 等^[8]利用基于 16S rRNA 的焦磷酸测序分析了泡菜中微生物群落结构,结果表明,泡菜中的微生物主要由 6 种乳酸菌组成,分别为肠膜明串珠球菌、清酒乳杆菌、*Weissella koreensis*、*Leuconostoc gelidum*、*Leuconostoc carnosum*、*Leuconostoc gasicomitatum*。肠膜明串珠球菌在发酵初期基因表达量最高,耐酸性较强的清酒乳杆菌和 *W. koreensis* 在发酵中后期含量较高,*Leu. gelidum* 在发酵中期呈上升趋势,并一直持续到发酵结束,*L. carnosum* 和 *L. gasicomitatum* 在发酵初期相对较高,随着发酵的进行逐渐减少。在 29 d 的发酵过程中,通过 mRNA 比较分析发现,肠膜明串珠球菌在发酵前期最为活跃,后期清酒乳杆菌和 *W. koreensis* 的基因表达量较高。而清酒乳杆菌的基因表达在发酵 25 d 后迅速下降,这可能是噬菌体感染乳酸杆菌所致。许多与碳水化合物运输、水解和乳酸发酵相关的基因表达量较高,属于典型的异型乳酸菌发酵。甘露醇脱氢酶编码基因(*mdh*)在所有明串珠菌属中均有发现,尤其是在肠膜明串珠球菌中。JUNG 等^[3]采用宏基因组注释技术,揭示了一系列碳水化合物异型乳酸发酵的相关基因,这与检测到的发酵产物甘露醇、乳酸、乙酸乙酯和乙醇等相一致。自然发酵酸菜的大部分挥发性风味化合物形成于发酵的中间阶段,其中种类最多的是形成酸菜香味的酯类和醛类。ZHAO 等^[9]从传统四川泡菜卤水中分离乳酸菌并考察其对特征味觉的贡献,发现随着植物乳杆菌、布氏乳杆菌、耐乙醇片球菌的生长,泡菜特征代谢产物谷氨酸、蔗糖、甘氨酸、乳酸及 γ -氨基丁酸的含量显著提高。¹HNMR 分析表明,韩国泡萝卜发酵过程中游离糖(果糖和葡萄糖)的浓度首先迅速增加,发酵 30 d 后,随着游离糖的消耗,酵母菌快速生产并产生甘油和乙醇。此外,还产生了有机酸、甘露醇和 γ -氨基丁

酸,并鉴定了明串珠菌和清酒乳杆菌分别产甘露醇和 γ -氨基丁酸^[2]。

泡菜中微生物代谢网络复杂,这些转录组、代谢组数据分析结果有助于我们挖掘出新的功能基因,更清晰地了解发酵蔬菜中各菌株对风味的贡献,有助于筛选发酵剂和优化发酵条件。

2 发酵蔬菜功能菌种的选育及应用

传统自然发酵主要依赖蔬菜表面的乳酸菌发酵产酸,以提高蔬菜的保藏性和风味,但因受到霉菌、酵母菌和大肠杆菌等杂菌的影响,导致其发酵周期偏长,容易腐败和亚硝酸盐超标,并且产品质量不稳定,难以实现工业化、规模化生产。选育和应用性能优良的关键发酵菌种是现代蔬菜发酵工艺的必由选择。在发酵蔬菜中接种特定乳酸菌,其自身的相对丰度提高,同时其他种属的微生物也会受到抑制或促进的作用,从而影响群落动态变化。接种乳酸菌可加快发酵进程,降低失败风险,并提高产品质量稳定性和安全性^[10]。目前,乳酸菌发酵剂已大量用于各国发酵蔬菜的生产,随着研究的深入,对于优良菌种的功能特性也提出了更高要求。用于蔬菜发酵的菌种一般需要耐高盐低温胁迫且产酸速率高,能够快速适应环境,形成生长优势,从而提高发酵速率。在此基础上,目前蔬菜发酵菌种的筛选主要集中在对产品风味、质量安全和益生功能的提升及对产品保质期的延长等方面^[11]。

2.1 维持风味

产品的风味品质是筛选发酵菌种的重要依据。PARK 等^[6]纯种接种植物乳杆菌发酵泡菜,发现接种不同菌株的泡菜之间代谢产物存在明显差异,表明可通过筛选菌种来控制特征代谢产物。为了得到低盐日式酸菜,SAKAI 等^[12]选用了 2 株在芥菜汁培养基中产酸速率高的植物乳杆菌和小片球菌分别发酵芥菜,在 2% 的低盐含量下,2 株菌在接种 12 d 后 pH 降至 4.3 以下,而在 6% 盐含量的自然发酵对照中,40 d 后 pH 才降至 4.2。纯种接种还可在低盐环境中防止杂菌污染长达 181 d,有效降低了盐的使用量。徐丹萍等^[13]比较了自然发酵、老泡菜水发酵、肠膜明串珠菌发酵、植物乳杆菌发酵和短乳杆菌发酵得到的 5 种不同泡菜的挥发性成分,并利用相对气味活度值确定了各种泡菜的主体风味成分。结果显示不同泡菜的主体风味成分种类差异较大,肠膜明串珠菌、植物乳杆菌发酵泡菜与自然发酵泡菜在总体风味成分上较

为接近,而老泡菜水发酵和短乳杆菌发酵泡菜风味明显不同。JUNG 等^[14]用肠膜明串珠菌接种 2 种韩国泡菜大白菜和萝卜,通过代谢产物分析发现纯种发酵与自然发酵相比,发酵完成更快且有有机酸和甘露醇产量更高。

2.2 降低有害代谢产物

接种乳酸菌可以控制发酵蔬菜中亚硝酸盐、生物胺等有害物质的产生和积累,从而得到健康、安全产品。YAN 等^[15]考察了 6 株不同种的乳酸菌降解亚硝酸盐的效果,选取了效果较好的戊糖乳杆菌、肠膜明串珠菌分别用作中式泡菜的发酵菌种。不同于自然发酵中亚硝酸盐含量上升到峰值,然后下降的过程,人工接种的泡菜中亚硝酸盐仅有很小的波动。同时,肠杆菌等产生亚硝酸盐的细菌数量明显少于自然发酵,解释了乳酸菌通过消耗亚硝酸盐和抑制其产生菌起到减少泡菜中亚硝酸盐的作用。XIA 等^[16]对 43 株乳酸菌分离株进行了亚硝酸盐降解性能的筛选,其中来源于四川泡菜的短乳杆菌 AR123 降解率最高,达到了 99.85%。在 6% 的盐含量下,该菌和市售发酵剂均可以迅速降低酱菜的 pH 值,同时在 72 h 的酱菜中亚硝酸盐含量分别为 0.83 和 3.05 mg/kg,而自然发酵中亚硝酸盐的含量高达 17.92 mg/kg。

利用乳酸菌控制发酵蔬菜中生物胺的研究集中在乳杆菌和明串珠菌。RABIE 等^[17]选用 3 株植物乳杆菌、干酪乳杆菌和弯曲乳杆菌接种德国泡菜,考察其对生物胺含量的影响。结果表明接种任一菌株后,生物胺总量明显低于对照。对照中的生物胺以腐胺、酪胺和较少的组胺为主,接种乳酸菌后使得腐胺含量降低 10 倍,储藏 45 d 的样品中组胺和酪胺则检测不到。PENAS 等^[18]比较了植物乳杆菌和肠膜明串珠菌接种在 0.5% 和 1.5% NaCl 含量的德国泡菜时的生物胺产生情况,发现 2 种菌在 0.5% NaCl 含量下的生物胺总量均低于 1.5% NaCl 浓度,肠膜明串珠菌相对于植物乳杆菌产生生物胺较少。

2.3 产细菌素抑制有害菌

一些乳酸菌可以产生细菌素抑制腐败菌和病原菌的生长,通过筛选产细菌素的乳酸菌提高发酵蔬菜的安全性和保藏性也是当前研究的热点。乳酸菌细菌素是乳酸菌通过核糖体合成的一类具有抑菌活性的多肽或前体多肽,已经鉴定出发酵蔬菜中的肠膜明串珠菌、柠檬明串珠球菌、植物乳杆菌、清酒乳杆菌、乳酸乳球菌和乳酸片球菌等乳酸菌可产细菌素^[19]。CHANG 等^[11]将诱导产生细菌素的柠檬明串珠菌用

于发酵韩国泡菜,以期提高泡菜的感官品质和保藏性。在125 d保藏期内,该菌株占接种发酵泡菜总菌群的70%~90%,并在整个期间未检测到酵母。然而自然发酵的泡菜中没有占主导的乳酸菌种类,并且在储存50 d后检测到酵母。在存放95~125 d时,接种发酵泡菜的质地(硬实度)相当于存放20 d的自然发酵。此外,感官评价指标(质地、异味和碳酸口感)明显优于对照组,显示接种产细菌素的柠檬明串珠菌可以控制菌群,防止泡菜过度成熟,并延长保质期。CHANG等^[20]接下来用同一株产细菌素的柠檬明串珠菌发酵韩国泡菜,并在发酵泡菜汁中接种大肠杆菌O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌等病原菌。相对自然发酵泡菜汁,接种发酵的泡菜汁能显著减少病原菌的数量,证明产细菌素的发酵菌种能保护食品免于病原菌的污染。TOLONEN等^[21]检测到发酵甘蓝泡菜水中乳酸乳球菌产生的乳酸链球菌肽(nisin)在24 h内高达1 400 IU/mL,且在发酵13 d后仍可检测到250 IU/mL的nisin。同时证明泡菜水中的nisin能有效抑制单核细胞增生李斯特氏菌。此外,植物乳杆菌E11在芥菜汁培养基中生长良好,并能产生抑制大肠杆菌、无毒李斯特菌和金黄色葡萄球菌,因而被用作四川泡菜的发酵剂,其在发酵早期就可以起到抑制病原菌的作用^[22]。

2.4 延长保质期

为了延长产品保质期,避免过酸和产气胀袋,各国研究人员开展了相应的菌种选育工作。一些研究集中在耐酸的肠膜明串珠菌的选育上,随着发酵后期酸度升高,明串珠菌被抑制,而通过亚硝基胍处理后获得的耐酸突变菌株可以在pH 4.0下生长,从而抑制引起过度成熟的其他乳酸菌,使泡菜最佳的感官品质得以延长。该耐酸突变株与1株产香并消耗乳酸的酵母菌*Saccharomyces fermentati*联合用作韩国泡菜发酵剂,其产品的最佳成熟期为自然发酵的1.5倍,发酵第28天仍可食用^[23]。 H^+ -ATPase是乳酸菌耐酸调控的关键酶,通过使该酶的亚基发生突变,筛选对酸敏感的植物乳杆菌突变菌,以期降低四川泡菜的后酸化,延长保质期^[24]。在黄瓜的发酵中,植物乳杆菌将苹果酸脱羧形成乳酸和 CO_2 ,而 CO_2 积累会导致产品膨胀损坏,因此有学者通过诱变获得不使苹果酸脱羧的植物乳杆菌,并从中筛选出生长和耐盐性高的突变株作为发酵菌种^[25]。

2.5 具有益生功能或活性产物

筛选具有益生功能的微生物也是当前蔬菜发酵

剂研究的热点。甘蓝等蔬菜基质被认为是益生菌合适的载体,可在胃肠道的恶劣条件下起到保护益生菌的作用。植物乳杆菌L4的体内益生特性,比如在小鼠胃肠道中的存活、竞争、黏附和定植,以及免疫调节能力得到了证实,并被用作德国泡菜的发酵菌种^[26]。对韩国泡菜的功效研究显示其具有抗肿瘤、抗肥胖、降低胆固醇、抗氧化、抗衰老、增强免疫力和促进脑健康等健康功效。XIONG等^[27]依据对高浓度胆盐和酸的耐受性,筛选可在模拟胃液环境中幸存下来,并可能到达肠道的乳酸菌,筛选出1株发酵中式泡菜的功能植物乳杆菌亚种。

此外,一些乳酸菌具有抗氧化、降解胆固醇和产 γ -氨基丁酸及异麦芽低聚糖等功能特性。接种了1株布氏乳杆菌的韩国泡菜中的 γ -氨基丁酸含量为61.65 mg/100 g,比未接种的对照泡菜高出约8倍,并且接种布氏乳杆菌的泡菜和对照泡菜的感官接受度没有显著差异^[28]。1株高产葡聚蔗糖酶的柠檬明串珠菌和底物蔗糖、麦芽糖一起用于韩国泡菜的发酵,提高了益生异麦芽低聚糖的产量,并通过酶促反应释糖果糖,达到了适宜的甜度^[29]。

2.6 菌种协同作用

相对于纯种发酵,复合菌种发酵具有感官品质优、稳定性高、产品低盐低害等优点。HAN等^[30]从自然发酵大白菜中筛选了3株生长速率和降解亚硝酸盐效率高的分离株,并考察了其纯种发酵和两两组合发酵的效果。结果显示,德氏乳杆菌IWQ和副干酪乳杆菌J21具有协同效应,两者复合发酵大白菜得到了比对照发酵剂更优的产品酸度和感官品质,同时亚硝酸盐含量明显降低。ZHAO等^[9]发现植物乳杆菌、布氏乳杆菌和耐乙醇片球菌为四川泡菜卤水中的优势乳酸菌种群,用这3个种的分离株混合接种发酵萝卜能够显著提高泡菜特征滋味物质的含量。XIANG等^[31]评估了食窦魏斯氏菌共接种对植物乳杆菌发酵四川泡豇豆品质的影响,与单纯接种植物乳杆菌相比,混合接种可加快产酸速率和发酵初期非挥发性有机酸的产生,并且显著提高了挥发性风味化合物,特别是关键香气活性化合物的种类和含量,从而改善了泡豇豆整体感官品质。此外,混合接种分别将亚硝酸盐和生物胺的浓度降低了5%~12%和6%~12%。

3 发酵蔬菜菌群调控措施

蔬菜发酵过程中,原料的选择和处理、盐、发酵温

度、抑菌剂、物理杀菌等因素都会影响微生物群落,导致产品的感官和保藏特性发生变化。对于发酵蔬菜的工业化生产来说,控制、优化这些影响因素是保证产品品质的重要途径。

3.1 原料选择和处理

原料是发酵蔬菜乳酸菌的重要来源,且原料成分含有特定的营养或抗菌物质,对微生物群落及其代谢产物有重要影响。孙小静等^[32]通过分析不同辣椒品种对辣椒酱发酵品质的影响,发现不同品种辣椒因其成分差异,对发酵过程中的 pH 值、酸度、亚硝酸盐、可溶性糖含量的变化等均呈现一定的影响,而这些差异综合导致了成品辣椒酱的品质不一。发酵蔬菜的配料对微生物群落也有一定影响。有研究表明,添加辣椒粉会导致韩国泡菜发酵过程减慢,尤其是在发酵初期,并且维持较高的魏斯氏菌丰度以及较低的明串珠菌和乳杆菌的丰度^[7]。

除了选择适宜的原料之外,还可对原料进行减菌处理,通过减少有害菌群的数量,促进乳酸菌的生长。时永杰^[33]考察了食盐、乙酸、臭氧等对辣椒原料减菌的影响,最终选用 15% 的食盐溶液浸泡 10 min 作为减菌工艺。用此工艺对样品进行减菌后,12 h 后的减菌率在 80% 以上,可降低辣椒发酵过程中杂菌污染的概率。

3.2 发酵温度

由于不同乳酸菌生长特性因温度而异,温度对发酵蔬菜中乳酸菌群落的动态发展有重要影响。肠膜明串珠菌在发酵的前期是优势乳酸菌,其最适生长温度 25 ℃,当环境温度升高时,其生长优势减弱,异型乳酸发酵时间缩短,不利于泡菜风味的形成^[34]。卢沿钢^[35]以植物乳杆菌、短乳杆菌、肠膜明串珠菌这 3 株菌复配进行萝卜泡菜发酵,研究发现随发酵温度的升高,泡菜发酵越快,产酸量越大,在 36 与 40 ℃ 下发酵,泡菜酸度在第 2 天就接近 0.4%,达到成熟。泡菜在低于 25 ℃ 下发酵时菌株生长和产酸较慢,而在 35 ℃ 以上进行发酵时,泡菜在前期的产酸量突出,但是高温及较高的酸性环境不利于肠膜明串珠菌的生长,后期泡菜酸度变化不明显,感官评定时发现由于产酸过快,此类泡菜产品滋味较差,酸味太浓,香气不正,甚至有如臭鸡蛋的气味等。因此,选择 32 ℃ 发酵,既能缩短发酵周期也最符合感官品质的要求。MHEEN 等^[36]研究了不同盐含量下泡菜的 pH 和酸度随温度的变化,发现在 20 ℃ 时,pH 随酸度的增加而急剧下降,但在 10 ℃ 时,pH 和酸度的变化较慢。

泡菜在 20 和 15 ℃ 时产生的最大酸度为 1.6%,但在 10 ℃ 时不会超过 1.2%。通过感官评估确定了泡菜最佳成熟期的 pH 值和酸度分别为 4.2 ~ 4.5 和 0.6% ~ 0.8% (以乳酸计)。并发现盐含量和发酵温度共同决定发酵周期,在 20 ℃、盐质量分数 2.25%,最佳成熟期 2 d,最佳食用期为 1 ~ 3 d;盐质量分数 7%,最佳成熟期为 10 d,最佳食用期为 1 ~ 16 d。在较低的温度下,最佳的成熟期和最佳食用期要长于在更高的温度时。在 5 ℃ 和 5.0% 以上的盐质量分数下,泡菜的成熟非常缓慢,盐质量分数为 7.0% 时,即使发酵 180 d 也未成熟。张会生^[1]采用直投式乳酸菌发酵西兰花泡菜发现温度过低会抑制乳酸菌的生长繁殖,不利于泡菜中酸的积累。温度过高会影响乳酸菌的酶系统,不利于代谢产物的积累,最佳发酵温度为 30 ℃。柳建华^[37]在优化凉薯泡菜工艺中发现,在 25 和 30 ℃ 下发酵,凉薯泡菜的 Vc 含量要高于 15 和 20 ℃ 时,可能是在这 2 个温度条件下,泡菜中的乳酸菌繁殖得更好,而乳酸菌的繁殖有利于泡菜中 Vc 的保护,从而导致泡菜发酵终点时 Vc 含量稍高。

3.3 食盐含量

食盐含量对泡菜微生物菌群影响甚大。MHEEN 等^[36]指出,泡菜的最佳盐含量约为 2.0% ~ 3.0%,如果低于最佳盐含量,发酵会进行得过快,从而导致酸化和软化;而随食盐含量的增大,乳酸菌的活性受到抑制,泡菜发酵速度变慢,发酵周期越延长。XIONG 等^[38]开展了不同盐质量分数(2%、5%、8%)对中国传统酸菜发酵特性的影响,研究表明合适的盐质量分数(5%)可以有效地抑制真菌和大肠杆菌的繁殖,而高盐质量分数(8%)会延迟酸菜的成熟并抑制乳酸菌的代谢。ZHANG 等^[39]采用低盐(1% ~ 3%),中盐(4% ~ 5%)和高盐(10%)发酵泡菜,在泡菜发酵的初始阶段分别接种了 4 种食源性病原体,通过测定 pH 和酸度发现在 25 ℃ 时,天然乳酸菌在低盐泡菜中表现出较高的生长速率,其代谢产生的有机酸和细菌素导致病原菌在发酵后 4 d 内减少了 5 个数量级。除了脆度以外,低盐泡菜具有良好的感官品质。AHMADSAH 等^[40]采用 PCR-DGGE 监测低盐(1.0% ~ 2.1%)对泡菜发酵过程中微生物的影响及样品的感官接受度,发现泡菜在各种盐含量中 pH 值、酸度、活细胞计数、大肠杆菌计数和乳酸菌分布相似,但经过感官评定盐含量为 1.3% 时感官接受度最好。

3.4 其他抑菌剂

随着人们健康意识的提高,运用天然抑菌剂改进发酵蔬菜制作工艺或减缓过度发酵而延长保质期是目前重要的研究方向。发酵蔬菜菌群对酸度的敏感度存在差异,可通过酸度调节菌群的生长。有研究证明了四川泡菜10年以上老卤水酸度与其菌群的对应关系,随着酸度增加,细菌多样性降低。与卤水酸度呈正相关的耐酸乳杆菌是主要优势物种,其次是短乳杆菌,其与乙酸呈正相关。酸度较低的样品具有更高的细菌多样性和更多种相对丰度 $>1\%$ 的乳杆菌以及更多条件致病菌^[41]。在蔬菜自然发酵过程中,适量添加有机酸可抑制部分腐败菌的生长,促进乳酸菌形成优势,有利于发酵蔬菜的质量控制,缩短发酵时间。

多种植物来源的抑菌成分被成功应用于发酵蔬菜的制作中。KIM等^[42]在泡菜发酵过程中添加白葡萄酒,可降低食盐的添加量,提高泡菜的硬度,且白葡萄酒被认为可以去除泡萝卜中含硫化物引起的气味。葡萄柚籽提取物(*grapefruit seed extract*, GFSE)是一种天然抗菌剂,可有效抑制多种微生物的生长,且毒性低($LD_{50} = 2\ 900\ \text{mg/kg}$),已被用作各种食品的防腐剂。PARK等^[43]向泡菜中添加了0(对照)、0.1%、0.3%和0.5%(质量分数)的GFSE,并测量了30 d发酵过程中pH值、酸度、还原糖含量和微生物种群的变化。结果显示随着发酵的进行,含有较高含量GFSE的泡菜的酸度较低,还原糖消耗较低;发酵30 d后,对照泡菜和含0.5% GFSE的泡菜的还原糖含量分别为0.2%和1.7%。当添加量为0.3%时,泡菜的货架期在10℃时至少可以从5 d延长到20 d。绿茶叶中的主要成分是儿茶素,其对食源性细菌具有抗菌活性。WEE等^[44]研究了从绿茶叶中制备的儿茶素粉对韩国泡菜发酵中微生物的拮抗活性,结果表明,当绿茶儿茶素粉添加量为2 mg/g时,可抑制植物乳杆菌的生长,泡菜pH值和酸度变化受到明显抑制,可以延长泡菜的保质期。

KIM等^[45]研究了壳聚糖对泡菜发酵的影响,制备包含0(对照)或0.5%壳聚糖(质量分数)的泡菜,并在10℃发酵10 d的过程中测定pH和酸度。泡菜的初始pH值、酸度分别为6.0、0.2%。发酵4 d后,对照泡菜的pH值约为4.0,而含壳聚糖的泡菜pH值约为5.0;在发酵的第10天,对照泡菜的酸度为1%,而含壳聚糖的泡菜为0.7%。结果表明,壳聚糖可以用作防腐剂,以延长泡菜的保质期。

nisin能有效抑制多种病原微生物和食物腐败

菌,具有热稳定性好、对蛋白酶敏感、能被人体蛋白酶降解、对人体无毒副作用、与抗生素无交叉拮抗作用等优点^[46]。CHOI^[47]向乳酸菌培养物添加不同浓度的nisin,在20℃下多数植物乳杆菌株的生长被延迟了2~3 d。当向泡菜发酵过程中添加100 IU/mL的nisin时,实验组比对照组延迟2 d达到最佳食用pH(4~5),并通过扫描电镜观察到nisin在细胞表面形成孔而迅速破坏乳酸菌细胞壁。CHOI^[48]通过研究nisin对泡菜发酵中天然菌群的影响,发现与未经处理的泡菜相比,添加nisin时乳酸菌数量从未超过 $5 \times 10^7\ \text{CFU/mL}$,泡菜发酵液的pH保持在4.8以上。

3.5 物理保藏技术

蔬菜发酵完成后,选用适当的保藏技术控制储存过程中微生物引起的不良感官变化,也是发酵蔬菜调控工艺的一个重要环节。蒋和体等^[49]对四川泡菜进行了微生态保藏技术研究,发现以低还原糖的蔬菜为原料,发酵成熟后调味并真空包装(0.095 MPa),0~10℃冷藏,3个月后仍能保持泡菜固有的优良品质,并维持乳酸菌数在 $10^4\ \text{CFU/g}$ 。吴锦铸等^[50]研究表明加热杀菌不适宜泡菜、酸菜的贮藏,酸菜在杀菌后(即使70~80℃处理10 min的较低强度),其色泽、香味、质地等均受到不同程度的影响,如加速褐变,脆度降低,香气损失,风味变劣等。近年来,非热杀菌技术逐渐受到关注,该技术处理温度低,对食品的风味、色泽和营养成分影响较小,避免了传统热杀菌技术造成的食品品质劣变问题。现在常用非热物理处理技术主要包括使用超高压、脉冲电场、紫外线、低温等离子体和伽马射线。PARK等^[51]研究发现在冷冻温度下,特别是在干冰下用伽马射线照射泡菜时,泡菜的质地软化和感官品质的下降得以减少。BAO等^[52]研究发现500 MPa超高压持续5 min处理泡萝卜后,菌落总数降低了5.57个数量级,霉菌和酵母则完全失活。ZHAO等^[53]使用低温等离子体杀菌可以选择性地将产气酵母降低4个数量级而乳酸菌不受影响,与巴氏杀菌相比可以减轻泡菜的褐变与软化,并减少储藏期间亚硝酸盐含量的增加。虽然非热杀菌技术对产品品质的影响较小,但是由于投入成本高、生产效率低等问题,该类技术在工业化生产中普及度不高。

4 结语

蔬菜发酵过程的菌群调控是控制发酵蔬菜品质的关键技术,通过应用功能菌种和控制关键环境影响因素,发酵蔬菜的工业生产可实现标准化,产品附加

值可以得到提升。然而尽管科技人员对此开展了大量的研究工作,目前生产中仍然存在由于微生物调控不精准所引起的问题,突出表现在工业生产的发酵蔬菜多数不及天然手工发酵蔬菜风味完整浓郁。传统发酵蔬菜生产涉及到复杂的菌群结构及其动态变化,所产生的风味物质丰富多样,而接种限定组成的菌种较难达到原有的风味特征。面对这样的挑战,近年来蓬勃发展起来的多组学技术可以揭示自然状态下微生物菌群影响蔬菜发酵的分子机制,有助于解析传统发酵蔬菜核心菌群的相互作用关系和特征风味活性物质的代谢形成机制,为实现菌群的精准调控提供理论依据。本文综述了国内外发酵蔬菜在菌种选育应用和菌群调控方面的研究进展,以期为我国发酵蔬菜产品的品质提升和工艺改进提供一定的借鉴,推动传统发酵蔬菜产业的升级改造。

参 考 文 献

- [1] 张会生. 直投式乳酸菌发酵泡菜技术研究[D]. 南昌:南昌大学,2019.
ZHANG H S. Optimization of technology of Direct Vat Set pickles fermented by lactic acid bacteria[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [2] JEONG S H, JUNG J Y, LEE S H, et al. Microbial succession and metabolite changes during fermentation of Dongchimi, traditional Korean watery kimchi[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 164(1): 46–53.
- [3] JUNG J Y, LEE S H, KIM J M, et al. Metagenomic analysis of kimchi, a traditional Korean fermented food[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(7): 2 264–2 274.
- [4] 刘长蕾, 苗乘源, 文宇萍, 等. 东北酸菜和朝鲜族辣白菜发酵过程中微生物的变化[J]. 东北农业科学, 2019, 44(3): 74–77; 82.
LIU C L, MIAO C Y, WEN Y Q, et al. Changes of microorganism in pickled cabbage and kimchi fermentation[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(3): 74–77; 82.
- [5] LIANG H, CHEN H, JI C F, et al. Dynamic and functional characteristics of predominant species in industrial Paocai as revealed by combined DGGE and metagenomic sequencing[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 02416.
- [6] PARK S E, YOO S A, SEO S H, et al. GC-MS based metabolomics approach of kimchi for the understanding of *Lactobacillus plantarum* fermentation characteristics[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68: 313–321.
- [7] JEONG S H, LEE H J, JUNG J Y, et al. Effects of red pepper powder on microbial communities and metabolites during kimchi fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 160(3): 252–259.
- [8] JUNG J Y, LEE S H, JIN H M, et al. Metatranscriptomic analysis of lactic acid bacterial gene expression during kimchi fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 163(2–3): 171–179.
- [9] ZHAO N, ZHANG C G, YANG Q, et al. Selection of taste markers related to lactic acid bacteria microflora metabolism for Chinese traditional Paocai: A gas chromatography-mass spectrometry-based metabolomics approach[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(11): 2 415–2 422.
- [10] PEREIRA G V D, NETO D P D, JUNQUEIRA A C D, et al. A review of selection criteria for starter culture development in the food fermentation industry[J]. Food Reviews International, 2020, 36(2): 135–167.
- [11] CHANG J Y, CHANG H C. Improvements in the quality and shelf life of kimchi by fermentation with the induced bacteriocin-producing strain, *Leuconostoc citreum* GJ7 as a starter[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(2): M103–M110.
- [12] SAKAI M, NAGANO M, OHTA H, et al. Salt-reduced Takanzuke produced with an isolated starter strain[J]. Food Science and Technology Research, 2014, 20(4): 749–753.
- [13] 徐丹萍, 蒲彪, 刘书亮, 等. 不同发酵方式的泡菜挥发性成分分析[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 94–100.
XU D P, PU B, LIU S L, et al. Analysis of volatile components in pickles fermented with different starter cultures[J]. Food Science, 2015, 36(16): 94–100.
- [14] JUNG J Y, LEE S H, LEE H J, et al. Effects of *Leuconostoc mesenteroides* starter cultures on microbial communities and metabolites during kimchi fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 153(3): 378–387.
- [15] YAN P M, XUE W T, TAN S S, et al. Effect of inoculating lactic acid bacteria starter cultures on the nitrite concentration of fermenting Chinese Paocai[J]. Food Control, 2008, 19(1): 50–55.
- [16] XIA Y J, LIU X F, WANG G Q, et al. Characterization and selection of *Lactobacillus brevis* starter for nitrite degradation of Chinese pickle[J]. Food Control, 2017, 78: 126–131.
- [17] RABIE M A, SILIHA H, EL-SAIDY S, et al. Reduced biogenic amine contents in sauerkraut via addition of selected lactic acid bacteria[J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1 778–1 782.
- [18] PENAS E, FRIAS J, SIDRO B, et al. Impact of fermentation conditions and refrigerated storage on microbial quality and biogenic amine content of sauerkraut[J]. Food Chemistry, 2010, 123(1): 143–150.
- [19] JUNG J Y, LEE S H, JEON C O. Kimchi microflora: History, current status, and perspectives for industrial kimchi production[J]. Applied Microbiol Biotechnol, 2014, 98(6): 2 385–2 393.
- [20] CHANG J Y, CHANG H C. Growth inhibition of foodborne pathogens by kimchi prepared with bacteriocin-producing starter culture[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): M72–M78.
- [21] TOLONEN M, RAJANIEMI S, PIHLAVA J M, et al. Formation of nisin, plant-derived biomolecules and antimicrobial activity in starter culture fermentations of sauerkraut[J]. Food Microbiology, 2004, 21(2): 167–179.
- [22] RAO Y, CHANG W, XIANG W L, et al. Screening and performance of *Lactobacillus plantarum* E11 with bacteriocin-like substance secretion as fermentation starter of Sichuan pickle[J]. Journal of Food Safety, 2013, 33(4): 445–452.
- [23] KIM Y C, JUNG E Y, KIM H J, et al. Improvement of kimchi fermentation by using acid-tolerant mutant of *Leuconostoc mesenteroides* and aromatic yeast *Saccharomyces fermentati* as starters[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 1999, 9(1): 22–31.

- [24] JIA B H, ZHONG X T, YUAN C H, et al. Screening of *Lactobacillus plantarum* LPM21 with F1F0-ATPase β -subunit mutation used as probiotics adjunct in Sichuan pickle[J]. Food Science and Technology Research, 2013, 19(6): 1 045 - 1 050.
- [25] MCDONALD L C, SHIEH D H, FLEMING H P, et al. Evaluation of malolactic-deficient strains of *Lactobacillus plantarum* for use in cucumber fermentations[J]. Food Microbiology, 1993, 10(6): 489 - 499.
- [26] BEGANOVIĆ J, PAVUNC A L, GJURACIC K, et al. Improved sauerkraut production with probiotic strain *Lactobacillus plantarum* I4 and *Leuconostoc mesenteroides* LMG 7954[J]. Journal of Food Science, 2015, 76(2): M124 - M129.
- [27] XIONG T, SONG S H, HUANG X H, et al. Screening and identification of functional *Lactobacillus* specific for vegetable fermentation[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(1): M84 - M89.
- [28] CHO S Y, PARK M J, KIM K M, et al. Production of high γ -aminobutyric acid (GABA) sour kimchi using lactic acid bacteria isolated from mukeunjee kimchi[J]. Food Science and Biotechnology, 2011, 20(2): 403 - 408.
- [29] CHO S K, EOM H J, MOON J S, et al. An improved process of isomaltooligosaccharide production in kimchi involving the addition of a *Leuconostoc* starter and sugars[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 170: 61 - 64.
- [30] HAN X, YI H, ZHANG L, et al. Improvement of fermented Chinese cabbage characteristics by selected starter cultures[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(7): M1 387 - M1 392.
- [31] XIANG W L, ZHANG N D, LU Y, et al. Effect of *Weissella cibaria* co-inoculation on the quality of Sichuan pickle fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 121: 108 975.
- [32] 孙小静, 王雪雅, 蓬桂华, 等. 不同辣椒品种对辣椒酱发酵品质的影响[J]. 中国酿造, 2017, 36(9): 55 - 59.
- SUN X J, WANG X Y, PENG G H, et al. Effects of different chilli varieties on the fermentation quality of chili sauce[J]. China Brewing, 2017, 36(9): 55 - 59.
- [33] 时永杰. 乳酸菌发酵辣椒酱菌种的筛选及系列辣椒酱产品的研发[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- SHI Y J. The separation of LAB for fermented chili sauce and series chili sauce product research [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013.
- [34] 纪晓焱. 优良乳酸菌的筛选及其发酵蔬菜的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- JI X Y. Selection of excellent lactic acid bacteria and its application in vegetable fermentation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [35] 卢沿钢. 胭脂萝卜纯种发酵泡菜及其保藏方式的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- LU Y G. Study on the pure fermenting pickles and storage methods of carmine radish [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [36] MHEEN T I, KWON T W. Effect of temperature and salt concentration on kimchi fermentation[J]. Korean Journal of Food Science & Technology, 1984, 16(4): 443 - 450.
- [37] 柳建华. 凉薯泡菜发酵工艺优化、对比及风味分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- LIU J H. The Optimization, contrast and flavor analysis of *Pachyrhizus erosus* pickle fermentation process [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [38] XIONG T, LI J, LIANG F, et al. Effects of salt concentration on Chinese sauerkraut fermentation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 169 - 174.
- [39] ZHANG Q S, CHEN G, SHEN W, et al. Microbial safety and sensory quality of instant low-salt Chinese Paocai [J]. Food Control, 2016, 59: 575 - 580.
- [40] AHMADSAH L S F, MIN S G, HAN S K, et al. Effect of low salt concentrations on microbial changes during kimchi fermentation monitored by PCR-DGGE and their sensory acceptance[J]. Journal of Microbiology & Biotechnology, 2015, 25(12): 2 049 - 2 057.
- [41] CAO J L, YANG J X, HOU Q C, et al. Assessment of bacterial profiles in aged, home-made Sichuan Paocai brine with varying titratable acidity by PacBio SMRT sequencing technology [J]. Food Control, 2017, 78: 14 - 23.
- [42] KIM K B, AN D G, HWANG S Y, et al. Quality characteristics of radish pickle added with different amounts of white wine[J]. Culinary Science and Hospitality Research, 2015, 21(4): 72 - 85.
- [43] PARK W P, CHANG D K. Kimchi quality affected by the addition of grapefruit seed extract powder[J]. Korean Journal Food Preservation, 2003, 10: 288 - 292.
- [44] WEE J H, PARK K H. Retardation of kimchi fermentation and growth inhibition of related microorganisms by tea catechins[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 1997, 29(6): 1 035 - 1 058.
- [45] KIM H S, KIM G J. Effects of the feeding *Hijikia fusiforme* (Harvey) Okamura on lipid composition of serum in dietary hyperlipidemic rats[J]. Journal Korean Society of Food and Nutrition, 1998, 27: 718 - 723.
- [46] LEYVA SALAS M, MOUNIER J, VALENCE F, et al. Antifungal microbial agents for food biopreservation-A review[J]. Microorganisms, 2017, 5(3): 37.
- [47] CHOI M H, PARK Y H. Selective control of lactobacilli in kimchi with nisin [J]. Letters in Applied Microbiology, 2010, 30(3): 173 - 177.
- [48] CHOI S Y. Inhibitory effect of nisin upon kimchi fermentation[J]. Korean Journal Applied Microbiology Biotechnology, 1990, 18: 620 - 623.
- [49] 蒋和体, 刘晓丽. 四川泡菜微生态保藏技术研究[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(1): 134 - 135.
- JIANG H T, LIU X L. Research on sichuan pickle micro-ecological preservation technology [J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(1): 134 - 135.
- [50] 吴锦铸, 余小林, 李筱瑜. 延长泡菜和酸菜保质期的研究[J]. 食品与发酵工业, 1999, 25(3): 39 - 42.
- WU J T, YU X L, LI X Y. Study on extending the shelf life of pickled vegetables [J]. Food and Fermentation Industries, 1999, 25(3): 39 - 42.
- [51] PARK J G, KIM J H, PARK J N, et al. The effect of irradiation temperature on the quality improvement of kimchi, Korean fermented vegetables, for its shelf stability[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2008, 77(4): 497 - 502.
- [52] BAO R, FAN A P, HU X, et al. Effects of high pressure processing on the quality of pickled radish during refrigerated storage[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 38: 206 - 212.
- [53] ZHAO N, GE L, HUANG Y, et al. Impact of cold plasma processing

on quality parameters of packaged fermented vegetable (radish Paocai) in comparison with pasteurization processing ; Insight into safe-

ty and storage stability of products [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies , 2020 , 60 : 102-300 .

Research progress on the application of starter strains and the regulation of microflora in vegetable fermentation

SHI Qiao¹ , LIU Biqin¹ , TANG Huihua¹ , WANG Xinrui¹ , ZHU Lizhou¹ ,
ZHAO Nan² , LI Hong^{1*}

1 (Institute of Agro-Products Processing Science and Technology , Yunnan Academy of Agricultural Sciences , Kunming 650223 , China)

2 (Institute of Agro-Products Processing Science and Technology , Sichuan Academy of Agricultural Sciences , Chengdu 610011 , China)

ABSTRACT Vegetable fermentation is the cold processing of fresh vegetables through microbial metabolic activities under certain production conditions to maintain the nutritional value of the vegetables and improve their flavor. The flora in fermented vegetables is critical to the flavor characteristics, nutritional functions and safety of the product. At the same time, the viable flora also affects the preservative quality of the fermented products. This review focuses on recent research progress on the microbial diversity of fermented vegetables and the mechanism of microbial action based on multi-omics technology, as well as the selection and application of functional microorganisms in vegetable fermentation, and the factors affecting microbial flora. Microflora regulation using combined biological, chemical, and physical methods during vegetable fermentation can enhance the technological edge of the products, which provides theoretical basis for industrial production of fermented vegetables of good and stable quality.

Key words vegetable fermentation; omics; strain selection; lactic acid bacteria; microflora regulation