肖垒, 盛庆, 董瑞婕, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 解析泸西不同品种细香葱挥发性代谢物差异 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 359−368. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070167

XIAO Lei, SHENG Qing, DONG Ruijie, et al. Analysis of Volatile Metabolite Differences in Different Chives (*Allium schoenoprasum* L.) Cultivars from Luxi Using HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 359−368. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070167

· 分析检测 ·

基于 HS-SPME-GC-MS 解析泸西不同品种细香葱挥发性代谢物差异

肖　垒, 盛　庆, 董瑞婕, 田文怀, 彭良琦, 王　悦, 胡紫妍, 丁玉梅*
（云南农业大学食品科学技术学院, 云南昆明 650201）

摘　要: 本研究采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（HS-SPME-GC-MS）技术，对云南泸西 4 个品种细香葱：‘白葱’‘黑葱’‘本地红葱’和‘铁杆红葱’的挥发性风味成分进行分析检测。结果表明，共鉴定出 15 类 797 种挥发性化合物，其中物质种类最为丰富的是酯类、萜类和醇类，分别为 140 种、123 种和 97 种，而物质含量最高是含硫化合物、酮类和萜类物质，总含量分别为 128.51、107.27 和 106.39 mg/kg，其中二丙基二硫醚为重要标志物，贡献青草香、洋葱味和硫磺味，并且以 VIP>1、*P*<0.05 为条件筛选出 166 种主要差异香气物质；除此之外，对四个品种细香葱中 OAV>10 的挥发性物质进行正交偏最小二乘判别（OPLS-DA）分析，由 VIP>1 并且 *P*<0.05 得到 22 种香气物质，其中香茅醛和 (S)-3,7-二甲基-6-辛烯醛的 VIP 值最高（2.62），为重要香气差异物；并且进一步对 22 种香气物质进行分析，发现青草香、硫磺味、咖啡味和薄荷味是细香葱中主要的香气特征，其中‘白葱’和‘黑葱’表现出突出的青草香。‘本地红葱’和‘铁杆红葱’表现出突出硫磺味、咖啡味、薄荷味、蔬菜香、坚果香和叶香，并且‘铁杆红葱’表现出的坚果香最为突出。本研究旨在为泸西细香葱品种品质评价提供科学依据，进一步为多样化泸西不同细香葱风味筛选和泸西细香葱深加工的开发利用奠定基础。

关键词: 细香葱, 挥发性物质, 气味活性值, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法（HS-SPME-GC-MS）
中图分类号: TS255.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0359−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070167
本文网刊:

Analysis of Volatile Metabolite Differences in Different Chives (*Allium schoenoprasum* L.) Cultivars from Luxi Using HS-SPME-GC-MS

XIAO Lei, SHENG Qing, DONG Ruijie, TIAN Wenhuai, PENG Liangqi, WANG Yue, HU Ziyan, DING Yumei*
（College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China）

Abstract: This study employed headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) to analyze the volatile flavor profiles of four chive cultivars ('White Chive"Black Chive"Local Red Chive' and 'Tiegan Red Chive') from the Luxi region of Yunnan. A total of 797 volatile compounds across 15 classes were identified. Esters (140), terpenoids (123), and alcohols (97) were the most abundant in variety, while sulfur-containing compounds (128.51 mg/kg), ketones (107.27 mg/kg), and terpenoids (106.39 mg/kg) were the highest in content, and 166 differential aroma compounds were selected using the cutoff of variable importance in projection (VIP)>1 with a *P* value<0.05. Dipropyl disulfide was identified as key odorants contributing to grassy, onion, and sulfur notes. Orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) of compounds with OAV>10 revealed 22 significant aroma compounds (VIP>1, *P*<0.05), among them, citronellal and (S)-3,7-dimethyl-6-octenal exhibited the highest VIP values (2.62) and were identified as critical aroma differential compounds. Further analysis characterized the primary aroma

收稿日期: 2025−07−14
基金项目: 云南省科技厅乡村振兴科技专项（202204BI090006, 202304BP090017）; 云南省蔬菜生物学重点实验室项目（202402AN360008）。
作者简介: 肖垒（2002−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬采后保鲜, E-mail: 3057863928@qq.com。
*** 通信作者:** 丁玉梅（1975−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬采后品质调控, E-mail: 2022033@ynau.edu.cn。

attributes as grassy, sulfurous, coffee, and minty. 'White Chive' and 'Black Chive' exhibited prominent grassy notes, whereas 'Local Red Chive' and 'Tiegan Red Chive' displayed stronger sulfurous, coffee, minty, vegetal, nutty, and leafy aromas, with 'Tiegan Red Chive' having the most distinct nutty character. This study has not only provided a scientific basis for flavor quality evaluation, but also has laid a foundation for the diversified flavor selection and deep processing of Luxi chives.

Key words: *Allium schoenoprasum* L.; volatile substances; odor activity value; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS)

近年来，随着健康饮食理念的普及，兼具营养与调味功能的蔬菜受到广泛关注[1]。葱属（*Allium* L.）植物属于百合科（Liliaceae），多年生鳞茎草本植物，叶鞘组成的假茎（俗称葱白）、鳞茎、嫩叶或气生鳞茎供食用。根据全球生物多样性信息系统，目前全球葱属植物有 1222 种，主要包括青葱、洋葱、大蒜、韭等[2]。不同种类葱属植物中的挥发性风味物质主要包括硫醚类、醛类、醇类、酮类、酯类以及杂环类化合物等，其中硫醚类化合物是其特征风味的重要来源，赋予典型的辛辣刺激性和葱香；醛类化合物则贡献青草香，并与其他各类化合物共同形成复杂风味体系[3]。在细香葱中，挥发性风味物质以硫醚类化合物为主，包括二丙基二硫醚、二甲基三硫醚、1-甲乙基-丙基-二硫醚及甲基丙基二硫醚，这些物质共同形成其强烈的辛香和微甜风味；细香葱的挥发性风味物质与大类葱属植物并无明显差别，以二硫醚和三硫醚为主[4]。泸西细香葱作为云南特色的品种，种植规模日益扩大。泸西县位于云南省中东部、红河州北部，属北亚热带半湿润季风气候，泸西县最高海拔为 2459 m、最低海拔为 821 m，年平均气温 15.5 ℃，昼夜温差大，年降雨量 800~1000 mm[5−6]。云南省泸西县凭借得天独厚的自然条件，建立了泸西县的细香葱特色种植产业，截至 2023 年年底，其种植面积达 13 万亩，年产量 116 万吨，产值超 35 亿元，成为单品种植面积最大的香葱种植基地，并成为 G20 峰会和杭州亚运会的专供蔬菜[6]。据产业数据显示，目前主栽品种包括白葱、黑葱、本地红葱和铁杆红葱，细香葱的风味品质直接影响着食品的口感和消费者的接受度。然而，泸西 4 个品种细香葱挥发性物质组成不同，在风味呈现上存在着明显的差异。因此，以细香葱为起点，研究不同品种细香葱的挥发性物质组成，为后期的品种选育和深加工等研究提供理论依据，推动泸西香葱产业的发展。

近年来，方海田等[7] 采用 HS-SPME-GC-MS 对宁夏同心红葱中挥发性成分进行分析，并与白葱和洋葱进行了比较，发现同心红葱与白葱、洋葱相比，其主要挥发性成分种类基本相同，其挥发性组分主要由醛类和含硫化合物组成，但是在含量上却有较大差异。Baky 等[8] 采用 HS-SPME-GC-MS 联用法，对 7 种葱属植物的挥发性物质进行分析，鉴定出 148 种挥发性物质，发现含硫化合物为主要区分的特征性挥发性物质，通过 PCA 和 OPLS-DA 等化学计量学分析对不同葱属植物进行了区分。如王斌等[9] 采用 ROAV 结合 AEDA 分析确定了内蒙古野葱干中 4 种特征挥发性气味活性物质是二甲基三硫醚、乙酸、2,3-丁二醇和苯甲醛。王蓉等[10] 研究发现白、红、黄皮洋葱主要的挥发性物质是含硫化合物和醇类，占总挥发性化合物的 59.23%、77.46% 和 73.66%。

本研究采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用（HS-SPME-GC-MS）技术，对四个品种细香葱的香气物质进行检测。该技术具有灵敏度高、无需有机溶剂的优势[11]。同时，采用主成分分析（PCA）、气味活度值（odor activityvalue, OAV）计算，筛选出重要风味物质，本研究基于 OAV 进行 OPLS-DA，筛选出主要的香气类型，并对四个品种细香葱特征风味进行强弱描述，该方法暂未在细香葱中应用。关于泸西四个品种细香葱间品质特征与挥发性风味物质差异的研究仍属空白，限制了品种选育与深加工技术的优化。本研究旨在为种质资源评价提供科学依据，进一步为多样化不同细香葱风味筛选奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白葱、黑葱、本地红葱、铁杆红葱　四个品种细香葱采集于云南省泸西县中枢镇文笔乡（东经 103°41′~103°49′，北纬 24°27′~24°35′，海拔 1655~1955 m）；氯化钠　分析纯，国药；正己烷　色谱纯，美国 Merck 公司；3-己酮　色谱纯，加拿大 C/D/N ISOTopes 公司。

8890-7000D 气质联用仪、色谱柱 DB-5MS（30 m×0.25 mm×0.25 μm）、萃取头（120 μm DVB/CWR/PDMS）　美国 Agilent 公司；MM400 球磨仪　德国 Retsch 公司；MS105DU 电子天平　瑞士 METTLER TOLEDO 公司；SPME Arrow 固相微萃取装置、Fiber Conditioning Station 老化装置、Agitator 样品加热箱　瑞士 CTC Analytics AG 公司；CM-5 色差仪　日本 KONICA MINOLTA 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品提取流程　从−80 ℃ 冰箱中取出细香葱样品进行液氮研磨，涡旋混合均匀，每个样本称取约 500 mg 于顶空瓶中；分别加入 2 mL 饱和 NaCl 溶液，20 μL（10 mg/L）的 3-己酮内标溶液；全自动顶空固相微萃取 HS-SPME 进行样本萃取，以供 GC-MS 分析。

1.2.2 HS-SPME 萃取条件　采样前萃取头在 250 ℃

下老化 5 min。在 60 ℃ 恒温条件下，振荡 5 min，120 μm DVB/CWR/PDMS 的萃取头插入样品顶空瓶，顶空萃取 15 min，于 250 ℃ 下解析 5 min，然后进行 GC-MS 分离鉴定。

1.2.3　色谱条件　DB-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为高纯氦气（纯度≥99.999%），恒流流速 1.2 mL/min，进样口温度 250 ℃，不分流进样，溶剂延迟 3.5 min。程序升温：40 ℃ 保持 3.5 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃，再以 7 ℃/min 升至 180 ℃，最后以 25 ℃/min 升至 280 ℃，保持 5 min。

1.2.4　质谱条件　电子轰击离子源（EI），离子源温度 230 ℃，四级杆温度 150 ℃，质谱接口温度 280 ℃，电子能量 70 eV，扫描方式为选择离子检测模式（SIM），定性定量离子精准扫描（GB 23200.8-2016）[12]。

1.2.5　挥发性物质成分半定量分析　采用内标法进行挥发性物质成分定量分析，计算公式为：

$$\text{挥发性物质相对含量(mg/kg)} = \frac{\text{挥发性化合物的峰面积}\times\text{内标物的体积(L)}\times\text{内标物的浓度(mg/L)}}{\text{内标物的峰面积}\times\text{待测样品的量(kg)}}$$

1.2.6　代谢物 OAV 分析　OAV 是结合化合物的感觉阈值建立的确定食品关键风味化合物的方法，用于阐明每种香气化合物对样品整体香气特征的贡献。参考相关文献 [13−14] 进行 OAV 分析，其计算公式如下：

$$\text{气味活度值} = \frac{\text{挥发性化合物的相对含量(mg/kg)}}{\text{挥发性化合物的阈值(mg/kg)}}$$

1.3　数据处理

每组样品做 3 次平行，使用 MS Office Excel 2019 和 IBM SPSS Statistics 27 软件对所测得数据结果进行整理和统计分析。使用迈维云平台（Metware Cloud, https://cloud.metware.cn）的云工具功能，选择所需进行分析的模块，进行正交偏最小二乘-判别分析（OPLS-DA, orthogonal partial least squares-discriminant analysis）、扇形图、柱状图以及聚类热图制作，由 OPLS-DA 模型得到的变量重要性投影（VIP）同时结合单变量 ANOVA 分析的 *P*-value，筛选出 4 个品种细香葱差异的代谢物。采用 Origin 2021 软件对 OAV 数据进行分析并绘制雷达图。

2　结果与分析

2.1　4 个品种细香葱总挥发性成分分析

细香葱的风味品质直接影响着食品的口感和消费者的接受度。然而，泸西 4 个品种细香葱在风味呈现上存在着明显的差异，这些风味差异源于其挥发性物质组成不同。4 个品种细香葱的挥发性化合物采用 HS-SPME-GC-MS 进行检测和分析。从 4 个品种细香葱中鉴定出 797 种挥发性化合物。检测到的挥发性化合物被分为 15 类，分别为酯类、萜类、醇类、酮类、杂环类、醛类、烃类、酸类、胺类、酚类、芳烃类、醚类、含氮化合物、含硫化合物和卤代烃。在这些化合物中，酯类数量最多，共有 140 种，占总挥发性化合物数量的 17.57%，其次是萜类化合物（123 种）、醇类（97 种）、酮类（94 种）、杂环化合物（75 种）和醛类（73 种），分别占总数的 15.43%、12.17%、11.79%、9.41% 和 9.16%，它们共同占总挥发性化合物的 70% 以上。剩余的 187 种挥发性化合物属于烃（63 种）、酸（37 种）、胺（23 种）、酚（20 种）、芳烃类（14 种）、醚（13 种）、含氮化合物

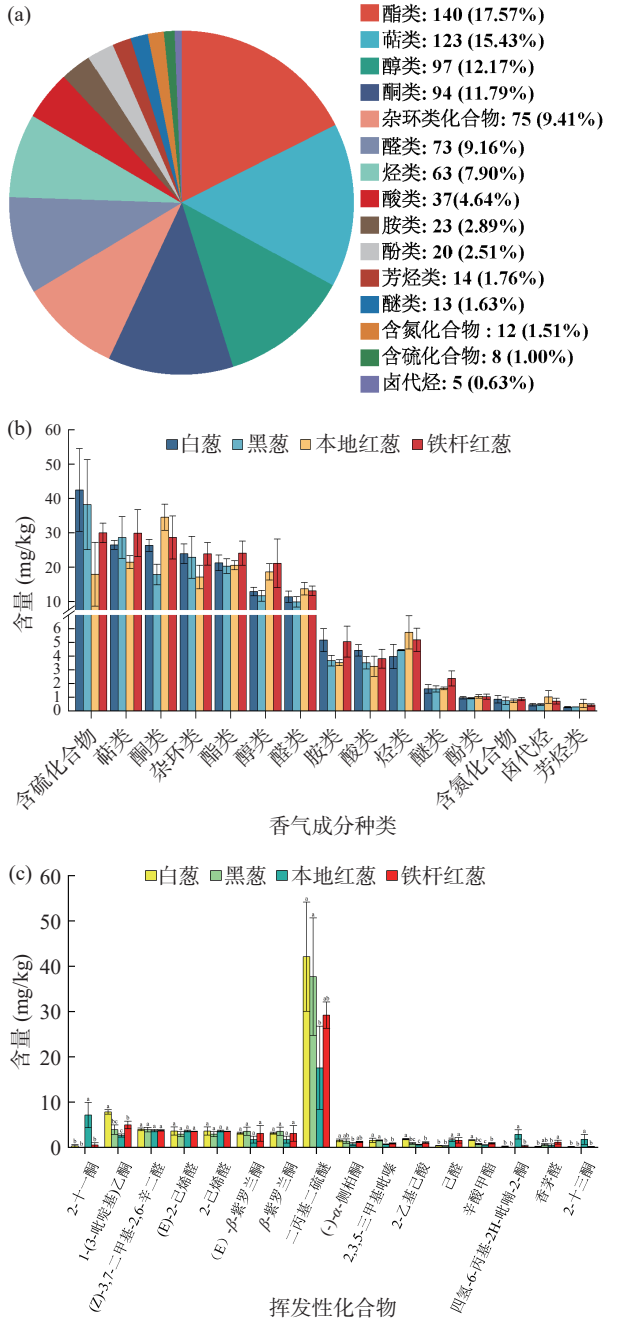


图 1　4 个品种细香葱总的挥发性化合物的分类（a）、挥发性物质含量（b）及排名前 10 挥发性物质含量（c）

Fig.1　Classification of total volatile compounds (a), content of volatile substances (b) and content of the top 10 volatile substances (c) in four cultivars of chives

注：图 1c 中不同小写字母表示同一挥发性物质在不同品种细香葱中差异显著，$P<0.05$。

(12 种)、含硫化合物(8 种)和卤代烃(5 种),分别占总数的 7.90%、4.64%、2.89%、2.51%、1.76%、1.63%、1.51%、1.00% 和 0.63%(图 1a)。

如图 1b 所示,挥发性物质中含硫化合物的含量最高,总含量为 128.51 mg/kg,是细香葱的主要挥发性成分,在细香葱被切开或受损时,大量释放,刺激嗅觉神经,产生强烈刺鼻感,这些含硫化合物的辛香和刺激性气味在葱的气味中起到增强风味、刺激食欲的作用,是葱作为调味料的重要气味特征[15−18],这与汪潇等[19]、刘松忠[20] 等和刘源等[21] 的研究一致。其次是酮类和萜类化合物,总含量分别为 107.27、106.39 mg/kg。另外是杂环化合物、酯类、醇类、醛类、烃类、胺类,这些化合物至少占挥发性化合物的 70%。相反,酚类、含氮化合物、卤代烃、芳烃类化合物的含量较低,在所有细香葱中的含量均低于 1.50 mg/kg。通过挥发性物质含量分析,不同细香葱的挥发性成分的总含量存在差异,4 个品种细香葱的挥发性成分的含量均超过 160.00 mg/kg,其中‘铁杆红葱’的香气含量最高,为 190.01 mg/kg,明显高于其他细香葱,香气特征突出,说明‘铁杆红葱’的香气相较于其他细香葱更为丰富,其次是‘白葱’和‘黑葱’,‘本地红葱’的香气含量最低,为 161.25 mg/kg。

本研究分别筛选了 4 个品种细香葱中含量排名前 10 具有特殊香气的挥发性成分,如图 1c 所示,具有青草香、硫磺香和葱蒜香的二丙基二硫醚、呈甜香和柠檬香的(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二醛以及呈烘焙香和可可香的 2,3,5-三甲基吡嗪在‘白葱’中含量丰富,并且‘白葱’中呈甜香和坚果香的 1-(3-吡啶基)乙酮、呈油漆香的 2-乙基己酸、呈果香和柑橘香的辛酸甲酯以及具有独特香气的呈雪松叶香的(-)-α-侧柏酮明显高于其他品种细香葱;具有花香、木质香和果香的 β-紫罗兰酮和(E)-β-紫罗兰酮在‘黑葱’中含量最高;具有青草香、药草香和果香的(E)-2-己烯醛、2-己烯醛和己醛在‘本地红葱’中含量最高,并且‘本地红葱’中呈椰子香的四氢-6-丙基-2H-吡喃-2-酮以及具有蜡质香、果香和脂肪香的 2-十一酮和 2-十三酮明显高于其他品种细香葱;甜香、花香和药草香的香茅醛在铁杆红葱中含量更丰富。排名前 10 的挥发性成分大多具有青草香、花香、甜香和果香,其含量分别占 4 个品种细香葱香气总含量的 28.25%~39.65%,是赋予 4 个品种细香葱青草香、花香和甜香属性的物质基础。

2.2 4 个品种细香葱的差异代谢物鉴定与分析

基于 VIP>1,P<0.05,总共鉴定出 166 种差异挥发性物质,其中大部分被聚类为酯(33 种)、萜类(31 种)、杂环化合物(23 种)、酮(19 种)、醇(15 种)、烃(13 种)、醛(10 种)、胺(6 种)、含硫化合物(4 种)、酸(4 种)、芳烃类(2 种)、醚(2 种)、含氮化合物(2 种)、酚(1 种)和卤代烃(1 种)(图 2,附表 1,附表 1 详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版)。

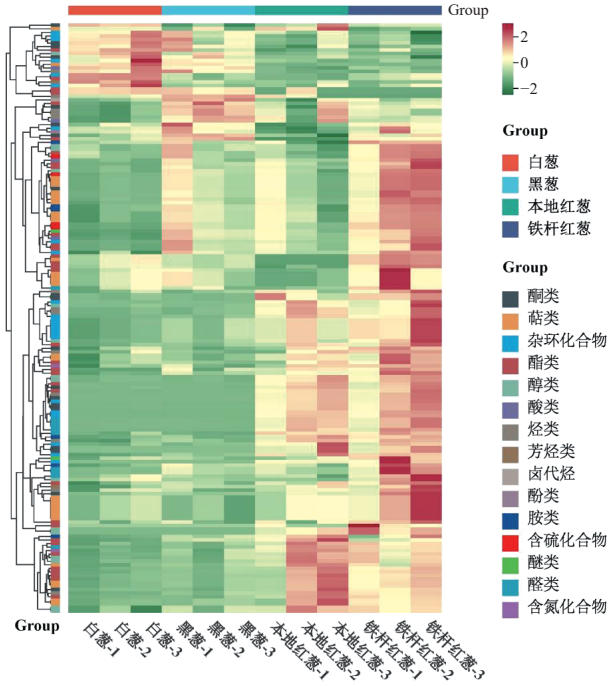


图 2 4 个品种细香葱挥发性物质的差异物质聚类

Fig.2 Differential substance clustering of volatile substances in four cultivars of chives

2.2.1 酯类化合物 酯类物质来源于原料中天然含有或原料中醇和酸反应生成的[9]。在 33 种酯类差异代谢物中,辛酸甲酯、(Z)-3-己基丙酸酯、2-甲基-2-丁烯酸-2-甲基丙基酯、(E)-2-甲基-2-丁烯酸-2-甲基丙酯在‘白葱’中含量最高,其中辛酸甲酯达 1.585 mg/kg,赋予了‘白葱’果香和柑橘香。2-辛基甲基氟膦酸酯和具有椰子香、奶油香和甜香的 δ-壬内酯在‘黑葱’中含量最高。3-环己烯甲酸乙酯、4-戊烯乙酸酯、1(3H)-异苯并呋喃酮等 7 种挥发性物质在‘本地红葱’中含量更丰富。2-甲基-2-丙烯酸-3,3,5-三甲基环己酯、异硫氰酸异丁酯、2-甲基丙酸-2-甲基丁酯等 20 种挥发性物质在‘铁杆红葱’中含量最高,主要贡献热带水果、辛辣刺鼻和青草药草香的香气,其中 2-甲基丙酸-2-甲基丁酯含量达 0.066 mg/kg,贡献果香、热带水果香和香蕉香。

2.2.2 萜烯类化合物 萜烯类化合物是植物中一类重要的次生代谢产物,由异戊二烯单元组成的化合物及其衍生物[22]。在 31 种萜类差异代谢物中,2,3-脱氢-1,8-桉树脑在‘白葱’中含量最高。1,3,8-对薄荷三烯、香叶酸、马鞭草酚等 6 种挥发性物质在‘本地红葱’中含量最高,具有药草香、木质香、松脂香和樟脑香的 1,3,8-对薄荷三烯赋予了‘本地红葱’独特的香气。香茅醛、(S)-3,7-二甲基-6-辛烯醛和反式-5-甲基-2-(1-甲基乙基)环己酮等 24 种挥发性物质在‘铁杆红葱’中更加丰富,赋予了‘铁杆红葱’薄荷香、药草香、果香和甜润花香,其中香茅醛的含量最高达

1.128 mg/kg，分别是‘白葱’‘黑葱’和‘本地红葱’的 6.2、1.9 和 2.7 倍，贡献甜香、花香、药草香、蜡质香和柑橘香。

2.2.3　杂环类化合物　在 4 个品种细香葱中有 24 种杂环类差异挥发性物质，2-甲基咪唑、4-(氨基甲基)吡啶、2-甲氧基-3-(1-甲基丙基)吡嗪等 6 种挥发性物质在‘白葱’中含量最高，具有青草香、豌豆香和甜椒味的 2-甲氧基-3-(1-甲基丙基)吡嗪是形成‘白葱’的青草香的主要物质，含量为 0.070 mg/kg，刘松忠等[20] 在章丘大梧桐葱和隆尧鸡腿葱中也发现了该物质，但未对香气进行分析。6-硝基-2-甲基吡啶在‘黑葱’中含量最高，为 0.013 mg/kg。具有生香、土豆香的 2-乙氧基-3-乙基吡嗪和具有果香、酒香、甜香和辛香的 2-正丁基呋喃在‘本地红葱’含量最高。2-甲基-1H-吡咯、7-氧杂双环 [4.1.0] 庚烷、2,5-二甲基噻吩等 15 种挥发性物质在‘铁杆红葱’中更加丰富，其中 2,5-二甲基噻吩、2,4-二甲基噻吩和 3,4-二甲基噻吩是葱属植物蒸馏油中二烷基二硫化物的热分解产物[23]，共同形成了‘铁杆红葱’的坚果香和硫磺味。值得注意的是，具有鸡肉味、熟牛肉味和硫磺味的四氢-3a-甲基-1,3-二硫并 [4,5-b] 呋喃含量达 0.089 mg/kg，推测‘铁杆红葱’可用于肉类风味食用香精调配，增强自然烹饪肉香。

2.2.4　酮类化合物　酮类化合物是葱属植物中又一类重要的挥发性成分，酮类物质具有果香和青草样香气。在 19 种酮类差异代谢物中，3-甲基-2-环己烯-1-酮、3-壬酮、1-(2-呋喃基)-1-丁酮、二氢-3-亚甲基-2(3H)-呋喃酮在‘白葱’中更丰富，其中呈焦糖香、辣味和甜香的 3-壬酮含量为 0.224 mg/kg，分别是‘黑葱’‘本地红葱’和‘铁杆红葱’的 1.6、1.1 和 1.2 倍。6,7-十二烷二酮、2,5-己二酮和 2-十二酮在‘黑葱’中含量最高，分别为 0.340、0.104 和 0.021 mg/kg，其中 2-十二酮贡献花香、果香、柑橘香和橙子香。6-溴-2-己酮在‘本地红葱’含量最高。1-环丙基-1-丙酮、3,4,5,6,7,8-六氢-2(1H)-萘酮、(2R-顺式)-5-甲基-2-(1-甲基乙基)环己酮等 11 种挥发性物质在‘铁杆红葱’含量最高，其中呈熟味、蔬菜香、金属味的 1-己烯-3-酮、呈薄荷香的(2R-顺式)-5-甲基-2-(1-甲基乙基)环己酮、呈刺鼻味和蔬菜香的 4-甲基-3-戊烯-2-酮，赋予了‘铁杆红葱’清香和辛辣刺鼻的属性。

2.2.5　醇类化合物　醇类物质是细香葱中较为重要的一类化合物。在 15 种醇类差异代谢物中，具有玫瑰花香、脂肪香的苯甲醇在‘白葱’中最高。(E)-3-甲基戊-1,3-二烯-5-醇、(S)-2-庚醇、2-庚醇和 1-甲基环己醇在‘本地红葱’中含量最高，2-庚醇贡献蘑菇香和果香。8,8-二甲氧基-2,6-二甲基-2-辛醇、(Z)-3-己烯醇、(E)-3-己烯醇等 10 种挥发性物质在‘铁杆红葱’中含量最高，主要贡献青草香、药草香和蔬菜香，其中(Z)-3-己烯醇、(E)-3-己烯醇含量达 0.239 mg/kg。

2.2.6　烃类化合物　在 4 个品种细香葱中有 13 种烃类差异挥发性物质，其中 3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯在‘黑葱’中含量最高。十二烷、、(E)-2-十四碳烯和 2-甲基十三烷在‘黑葱’中含量最丰富，十二烷和 1-十四烯含量分别为 0.181、0.028 mg/kg，贡献淡淡的蜡质香。(1,1-二甲基丙基)环己烷、(Z)-4-乙基-3-壬烯-5-炔、(E)-4-乙基-3-壬烯-5-炔在‘本地红葱’中含量最高。3-乙基-2-甲基己烷、1-庚炔、(Z)-3-甲基-4-十一碳烯在‘铁杆红葱’中含量最高，其中壬烷贡献油脂香和亚麻籽香。

2.2.7　醛类化合物　醛类属于挥发性羰基化合物，也会产生浓郁的香味[24]，4-亚甲基-5-己醛在‘本地红葱’中含量最高，具有青草香和果香的(Z)-3-己烯醛、具有叶香和甜瓜香的 3-己烯醛等 9 种挥发性物质在‘铁杆红葱’中含量最高，(Z)-3-己烯醛、3-己烯醛含量达 0.043 mg/kg，赋予了‘铁杆红葱’清新果香。

2.2.8　胺类化合物　植物中的胺类化合物是一类含氮的有机化合物，由氨基酸脱羧或醛类转氨等生物合成途径在植物体内产生[25]，6 种胺类差异挥发性物质均低于 0.050 mg/kg。对异丙氧基苯胺在‘本地红葱’中含量最高。1-十二胺、N,N-二甲基己酰胺、苯丙胺等 5 种挥发性物质在‘铁杆红葱’中含量最高。

2.2.9　含硫化合物　含硫化合物能产生原生的、浓郁的辛香味，稍带有硫磺的气味[7]。4 个品种细香葱中共检出 8 种含硫化合物，这类化合物是葱属植物特征风味的重要来源[3]，其中 4 种为差异挥发性物质，包括甲基丙基二硫醚、甲基丙基三硫化物、甲基丙烯基二硫醚和烯丙基甲基二硫醚，主要贡献硫磺味、洋葱香、萝卜香和番茄香，均在‘铁杆红葱’含量最高，含量分别为 0.507、0.073、0.053 和 0.053 mg/kg，形成了‘铁杆红葱’硫磺味和洋葱香的物质基础。

2.2.10　酸类化合物　3-呋喃甲酸在‘黑葱’中含量最高。2-甲基丁酸酐在‘黑葱’中含量最丰富，为 0.136 mg/kg。2-羟基-2-甲基丙酸、具有酸味和果香的二乙基乙酸在‘铁杆红葱’中含量最高。

2.2.11　其他化合物　在细香葱中芳烃类、醚、含氮化合物、酚和卤代烃含量较低。其中，1-碘壬烷在‘黑葱’中含量最高。1-硝基戊烷、4-亚甲基-5-己醛在‘本地红葱’中含量最高。己醛二甲基缩醛、1-(3-甲基丁基)-2,3,5,6-四甲基苯、1,1-双(2-甲基丙基)肼等 5 种挥发性物质在‘铁杆红葱’中含量最高，其中对羟基苯乙烯贡献木质香，(2,2-二甲氧基乙基)苯贡献青草香和花香。

2.3　4 个品种细香葱关键风味物质鉴定

OAV 大于 1 的化合物被认为对整体风味具有贡献，且数值越大其香气的贡献就越大[26]。4 个品种细香葱共筛选出 147 个 OAV>1 的挥发性化合物，其中 OAV>10 的香气成分，‘白葱’有 58 个，‘黑葱’54 个，‘本地红葱’64 个，‘铁杆红葱’67 个，这些挥发性化合物可能对不同品种细香葱的香气特征具有重要作用。如表 1 所示，4 个品种细香葱中 OAV>10

表 1　4 个品种细香葱中重要挥发性化合物香气描述及对应的 OAV

Table 1　Aroma descriptions of important volatile compounds of four cultivars of chives and corresponding OAV

序号	化合物	香气描述	阈值(mg/kg)	OAV			
				白葱	黑葱	本地红葱	铁杆红葱
	醛类(24种)						
1	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	黄瓜香, 青草香	1×10^{-5}	10295.36	8906.17	11397.41	11532.66
2	2,4-壬二烯醛	油脂味, 青草香, 黄瓜香	5×10^{-5}	3339.52	3811.19	2296.14	2747.43
3	(Z,Z)-3,6-壬二烯醛	油脂味, 皂香, 黄瓜香	5×10^{-5}	2147.72	1762.81	1991.65	2167.25
4	8-壬烯醛	烟熏味, 塑料味	2×10^{-4}	1791.13	1718.95	1584.45	1682.38
5	(E)-6-壬烯醛	无气味	2.2×10^{-5}	1911	1463.21	742.63	1564.65
6	(E)-2-己烯醛	青草香, 药草香	3.1×10^{-3}	1159.56	936.43	1159.65	1128.16
7	(E,E)-2,4-壬二烯醛	油脂味, 甜瓜香, 蜡香, 青草香, 紫罗兰香, 叶香, 黄瓜香, 热带水果香, 果香, 鸡肉香	1.6×10^{-4}	1043.6	1191	717.54	858.57
8	(Z)-4-庚烯醛	油味, 油脂味, 青草香, 乳制品香, 奶香味, 奶油香	2.5×10^{-5}	717.82	584.81	1019.54	913.65
9	2-辛烯醛	油脂味, 青草香, 药草香	2×10^{-4}	300.41	293.53	309.42	254.76
10	(Z)-6-壬烯醛	青草香, 黄瓜香, 甜瓜香, 哈密瓜香, 白兰瓜香, 蜡香, 蔬菜香, 鸢尾根香, 紫罗兰香, 叶香	1.4×10^{-4}	300.3	229.93	116.7	245.87
11	癸醛	甜香, 醛类香, 蜡香, 橙皮香, 柑橘香, 花香	1×10^{-4}	137.96	190.11	328.49	212.35
12	(E,E)-2,6-壬二烯醛	清新感, 柑橘香, 青草香, 黄瓜香, 甜瓜香	5×10^{-4}	205.91	178.12	227.95	230.65
13	2-己烯醛	甜香, 杏仁香, 果香, 青草香, 叶香, 苹果香, 李子香, 蔬菜香	1.7×10^{-2}	211.45	170.76	211.46	205.72
14	己醛	醛类香, 青草香, 青草香, 叶香, 醋香	5×10^{-3}	74.7	65.38	333.18	308.84
15	4-甲氧基苯甲醛	甜香, 粉质感, 含羞草香, 花香, 山楂香, 巴萨米克醋香	2×10^{-4}	152.16	154.72	152.64	139.51
16	(E,E)-2,4-癸二烯醛	粉尘感, 蜡香, 油味, 皂香	7×10^{-5}	120.06	106.22	116.5	142.11
17	(E,Z)-2,4-癸二烯醛	油炸感, 油脂味, 天竺葵香, 青草香, 蜡香	7×10^{-5}	120.06	106.22	116.5	142.11
18	壬醛	醛类香, 柑橘香, 橙皮香	1×10^{-3}	87.79	83.21	80.26	75.36
19	(E)-2-壬烯醛	油脂味, 青草香, 黄瓜香, 醛类香, 柑橘香	8×10^{-5}	73.87	57.2	86.6	80.66
20	2-壬烯醛	油脂味, 青草香, 蜡香, 黄瓜香, 甜瓜香	1×10^{-4}	59.1	45.76	69.28	64.53
21	3-甲基-2-丁烯醛	甜香, 果香, 刺鼻味, 棕色系香气, 坚果味, 杏仁香, 樱桃香	5×10^{-4}	16.11	15.79	30.08	30.07
22	(E)-2-辛烯醛	清新感, 黄瓜香, 油脂味, 青草香, 药草香, 香蕉香, 蜡香, 叶香[28]	3×10^{-3}	20.03	19.57	20.63	16.98
23	3-甲硫基丁醛	煮熟土豆味	2.5×10^{-3}	19.51	18.29	12.6	15.67
24	(Z)-3-己烯醛	青草香, 油脂味, 青草香, 杂草香, 果香, 苹果香	4×10^{-3}	0.25	0.26	9.4	10.84
	醇类(10种)						
25	苯甲硫醇	尖刺味, 葱蒜味, 洋葱味, 硫磺味, 大蒜味, 辣根味, 薄荷香, 咖啡香	3×10^{-6}	6779.06	6906.16	8932.06	9979.99
26	5-甲基-2-呋喃甲硫醇	硫磺味, 烤香, 咖啡香	5×10^{-5}	105.74	116.23	134.64	125.18
27	反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇	青草香, 黄瓜香, 油味, 紫罗兰香, 叶香	1×10^{-3}	72.4	58.88	104.89	111.13
28	2-十一醇	清新感, 蜡香, 洁净感, 布料香, 棉香, 洋菠萝香	8.6×10^{-3}	7.21	–	120.56	7.25
29	(Z)-5-辛烯-1-醇	青草香, 甜瓜香, 水感, 西瓜香, 泥土味, 蘑菇香, 紫罗兰香, 叶香, 鱼腥味, 皂香	2×10^{-3}	50.97	41.13	10.58	18.12
30	3-呋喃甲醇	无气味	4.501×10^{-3}	20.38	17.95	15.94	36.12
31	2,2-二甲基-3-戊醇	无气味	4.1×10^{-2}	–	–	–	42.87
32	1-辛烯-3-醇	油脂味, 果香, 青草香, 蘑菇香, 香水感, 甜香	1×10^{-3}	14.29	15.04	11.16	16.79
33	6-十一醇	无气味	8.6×10^{-3}	2.87	0.72	42.94	3.47
34	[R-(R*,R*)]-2,3-丁二醇	无气味	9.51×10^{-2}	3.08	2.2	11.79	10.91
	萜类(8种)						
35	*β*-紫罗兰酮	花香, 木香, 甜香, 果香, 浆果香, 热带水果香, 蜂蜡香	7×10^{-6}	446880.62	506957.58	244234.27	438643.66
36	(E)-*β*-紫罗兰酮	干燥感, 粉质感, 花香, 木香, 鸢尾根香	2×10^{-4}	15640.82	17743.52	8548.2	15352.53
37	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-甲醛	热带水果香, 藏红花香, 药草香, 清新感, 玫瑰香, 甜香, 烟草香, 大马士革酮香, 果香	3×10^{-3}	112.67	129.85	65.1	90.32
38	大根香叶烯D	木香, 辛香	1.2×10^{-3}	52.27	58.21	39.95	52.81
39	香叶醇	甜香, 花香, 果香, 玫瑰香, 蜡香, 柑橘香	6.6×10^{-3}	19.28	20.23	14.83	25.65
40	(S)-3,7-二甲基-6-辛烯醛	无气味	3×10^{-2}	6.09	19.68	14.11	37.6
41	香茅醛	甜香, 干燥感, 花香, 药草香, 蜡香, 醛类香, 柑橘香	6×10^{-2}	3.05	9.84	7.05	18.8
42	(-)-乙酸香芹酯	青草香, 薄荷香, 留兰香, 旱金莲香, 药草香, 朗姆酒香, 葡萄香, 梨香, 辛香	1.5×10^{-3}	8.69	6.79	–	15.8
	酮类(8种)						

续表 1

序号	化合物	香气描述	阈值(mg/kg)	OAV			
				白葱	黑葱	本地红葱	铁杆红葱
43	1-壬烯-3-酮	刺鼻味，蘑菇香	1×10^{-6}	9429.75	9297.38	7626.46	7414.14
44	2,2,6-三甲基环己酮	刺鼻味，侧柏酮香，劳丹脂香，蜂蜜香，岩蔷薇香	1×10^{-4}	713.67	688.95	689.22	660.75
45	1-己烯-3-酮	熟味，蔬菜香，金属味	2×10^{-5}	7.87	–	927.83	1013.08
46	(E, E)-3,5-辛二烯-2-酮	果香，青草香，青草香	5×10^{-4}	613.28	542.04	136.1	204.24
47	2-十一酮	蜡香，果香，奶油香，油脂味，鸢尾根香，花香	6.2×10^{-3}	51.31	0.79	1149.66	81.93
48	5-乙基-2(5H)-呋喃酮	辛香	9.7×10^{-3}	18.95	15.66	20.78	22.4
49	3-壬酮	焦糖香，辛香，甜香[29]	1.7×10^{-2}	13.17	8.33	11.63	10.84
50	1-(3-吡啶基)乙酮	甜香，坚果味，干燥感，山楂香，苯酚香，木香，爆米花香	5×10^{-1}	15.63	7.8	5.22	9.88
	酯类(7种)						
51	3-环己烯甲酸乙酯	无气味	3×10^{-6}	44684.03	53642.21	146523.47	136913.38
52	3-甲基丁酸-2-苯乙酯	花香，果香，甜香，玫瑰香，桃子香，杏子香	1×10^{-5}	2308.61	2543.67	1830.79	2540.69
53	2-甲基丁酸丙酯	酒味，果香，苹果香，菠萝香	2×10^{-4}	126.69	135.15	76.11	88.08
54	丙酸己酯	梨香，青草香，果香，霉味，腐烂味	8×10^{-3}	96.75	72.72	42.58	81.34
55	顺式-3-己烯基异戊酸酯	清新感，青草香，苹果香，果香，热带水果香，菠萝香	2×10^{-2}	19.77	18.77	18.57	19.27
56	Z-4-癸烯酸甲酯	果香，梨香，芒果香，鱼腥味，桃皮香，青草香	3×10^{-3}	13.96	10.86	10.8	14.46
57	乙酸-2-戊酯	药草香，杂草香，霉味，青草香，蔬菜香，坚果皮香，豆香，酮类香，动物感香气	1.5×10^{-2}	11.85	12.16	10.71	10.41
	杂环化合物(5种)						
58	2-甲氧基-3-(1-甲基丙基)吡嗪	霉味，青草香，豌豆香，格蓬香，灯笼椒香，胡椒香	2×10^{-6}	34941.52	27350.57	10608.59	10925.62
59	2,5-二甲基噻吩	坚果味，硫磺味	5×10^{-4}	173.05	310.09	507.61	744.95
60	三甲基恶唑	坚果味，坚果皮香，烤香，芥末香，贝类香，芥末香，蔬菜香	5×10^{-3}	31.13	31.89	29.39	25.35
61	2-乙基呋喃	化学味，豆香，飘逸感，可可香，面包香，麦芽香，咖啡香，坚果味	2.3×10^{-3}	9.65	9.88	12.35	20.27
62	四氢-3*a*-甲基-1,3-二硫并[4,5-b]呋喃	煮熟味，奶香味，鸡肉香，煮熟牛肉香，橡胶味，硫磺味，硫胺素味	6×10^{-3}	7.95	9.79	14.15	14.77
	酚类(3种)						
63	愈创木酚	坚果味	1.6×10^{-3}	135.96	123.51	164.69	148.54
64	2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	辛香，葡萄干香	3×10^{-3}	12.33	7.89	22.66	15.49
65	2,4-二氯苯酚	无气味	1.4×10^{-3}	12.38	11.7	14.43	16.97
	含硫化合物(2种)						
66	二丙基二硫醚	硫磺味，泥土味，焦糊味，青草香，洋葱味	1.95×10^{-2}	2159.15	1932.83	900.31	1497.3
67	硫氰酸苄酯	无气味	5×10^{-3}	10.32	7.03	6.61	10.45
	芳烃类(1种)						
68	4-苯基-1-环己烯	无气味	1×10^{-2}	2.4	2.19	23.4	11.23
	含氮化合物(1种)						
69	十二腈	柑橘香，橙子香，果皮香，金属感，辛香	9×10^{-5}	632.36	654.54	189.61	574.18
	醚类(1种)						
70	烯丙基甲基硫醚	硫磺味，葱蒜味，洋葱味，香料香	5×10^{-4}	29.7	21.37	47.87	54.03

注：“–”表示未检测出；香气特征数据查询于http://www.thegoodscentscompany.com, http://foodflavorlab.cn/#/home, http://www.thegoodscentscompany.com/search2.html, http://www.flavornet.org/flavornet.html, http://www.perflavory.com, http://www.odour.org.uk/odour/index.html；香气阈值数据[14,30–40]，部分来自https://www.vcf-online.nl。

的香气成分共有 70 种。这些挥发性化合物包括醛类(24 种)、醇类(10 种)、萜类(8 种)、酮类(8 种)、酯类(7 种)、杂环化合物(5 种)、酚类(3 种)、含硫化合物(2 种)、芳烃类(1 种)、含氮化合物(1 种)和醚类(1 种)。*β*-紫罗兰酮、3-环己烯甲酸乙酯、2-甲氧基-3-(1-甲基丙基)吡嗪、(E)-*β*-紫罗兰酮和(E,Z)-2,6-壬二烯醛的 OAV>10000，这些成分在含量和香气强度上表现都很突出，大多呈现出青草香、花香和果香的气味，对细香葱香气特征的贡献较大。其中，*β*-紫罗兰酮在 4 个品种细香葱中 OAV 最高，且均大于 100000，有花香、木质香、甜香、果香和蜂蜡香，是泸西 4 个品种细香葱的主要关键风味物质，为标志性成分。Xie 等[27] 提出韭菜中“花香”气味主要由 *β*-紫罗兰酮(OAV=19.95)组成，这是一种环化异戊二烯，广泛存在于水果和蔬菜中。

进一步对 4 个品种细香葱中 OAV>10 的香气成分进行 OPLS-DA 分析，由 VIP>1 并且 $P<0.05$ 得到 22 种香气物质，即 6 种醛类、5 种杂环类、4 种萜类、3 种醇类、3 种酮类和 1 种酯类，其中‘白葱’‘黑葱’均有 14 种，‘本地红葱’有 18 种，‘铁杆红葱’有 22 种(图 3)。4 个品种细香葱中关键风味物质组成不同，这些成分混合在一起构成了 4 个品种细香葱

独特的风味。值得注意的是，香茅醛和(S)-3,7-二甲基-6-辛烯醛的 VIP 值最高(2.62)，并且在含量上也有差异(附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版)，表明这 2 种香气物质对不同品种细香葱的区分起重要作用。除此之外，结合含量和 OAV，呈青草香和甜椒香的 2-甲氧基-3-(1-甲基丙基)吡嗪、呈焦糖香和辛香的 3-壬酮在‘白葱’中含量和 OAV 最高。呈熟味和蔬菜香的 1-己烯-3-酮、呈坚果香和硫磺味的 2,5-二甲基噻吩、呈甜香和花果香的香叶醇、呈青草香和药草香的(-)-乙酸香芹酯、呈熟味和肉味的四氢-3a-甲基-1,3-二硫并 [4,5-b] 呋喃、呈青草香和脂肪香的(Z)-3-己烯醛均在‘铁杆红葱’中最丰富，含量和 OAV 高于其他 3 种细香葱。

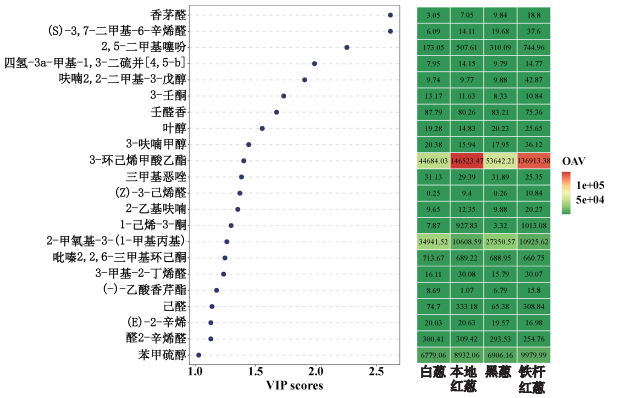


图 3 4 个品种细香葱挥发性成分正交偏最小二乘判别分析

Fig.3 Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) of volatile components in four cultivars of chives

根据 22 种挥发性物质的香气描述，将这些挥发性物质分为 9 个香气类型，即青草香、硫磺味、咖啡味、薄荷味、蔬菜香、坚果香、药草香、脂肪香和叶香，挥发性化合物的香气特征 OAV 累加，得出 4 个品种细香葱特征风味的强弱描述，并绘制香气雷达图(图 4)。‘白葱’的主要香气类型为青草香、硫磺味、咖啡味、薄荷味、药草香和脂肪香；‘黑葱’的主要香气类型为青草香、硫磺味、咖啡味、薄荷味、坚果香、药草香和脂肪香；‘本地红葱’和‘铁杆红葱’的主要香气类型为青草香、硫磺味、咖啡味、薄荷味、蔬菜香、坚果香、叶香、药草香和脂肪香。在 4 个品种细香葱中，青草香、硫磺味、咖啡味、薄荷味为最突出的香气特征，在‘白葱’中的香气物质 OAV 累加值最高，其次是‘黑葱’和‘铁杆红葱’，‘本地红葱’中的香气物质 OAV 累加值最低。‘白葱’和‘黑葱’表现出更为突出的青草香，并且‘白葱’中的青草香高于其他 3 个细香葱品种。‘本地红葱’和‘铁杆红葱’表现出更为突出硫磺味、咖啡味、薄荷味、蔬菜香和叶香。此外，与其他 3 个品种细香葱相比，‘铁杆红葱’表现出更为突出的坚果香。相似的是，Xie 等[27] 对韭菜中挥发性化合物的气味活性值(OAV)进行分析，将韭菜的挥发性化合物香气类型分为花香、脂肪香、蒜葱香、青草香、甜香和果香六类。对细香葱的 OAV 值进行分析，有利于深入研究细香葱的香气，也可以为细香葱的优质育种提供理论指导。

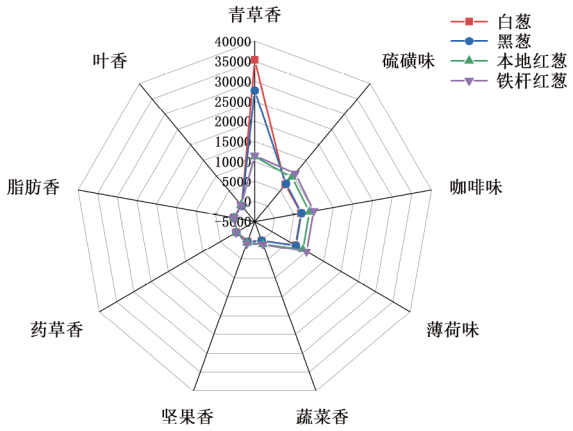


图 4 4 个品种细香葱香气雷达图(OAV)

Fig.4 Radar chart of the aroma of four cultivars of chives (OAV)

3 结论

通过对泸西地区 4 个品种细香葱‘白葱’‘黑葱’‘本地红葱’和‘铁杆红葱’的挥发性物质进行了检测分析。4 个品种细香葱香气成分种类上相似，共鉴定出 797 种挥发性化合物，但在含量上差异显著。其中以含硫化合物、萜类和酮类为主要的挥发性物质，这些挥发性物质的香气多以刺激性辛香、清新药草香为主，柔和甜香为辅，占香气总量的 45.80%~52.24%。含硫化合物为细香葱中含量最高的关键成分，二丙基二硫醚占含硫化合物的 58.09%~83.10%，认为是细香葱中重要的标志物，这与前人研究的结果一致。基于 VIP>1，P<0.05，总共鉴定出 1-环丙基-1-丙酮、3-甲基-2-环己烯-1-酮、3-甲基环戊酮、2-甲基环戊酮、香茅醛等 166 种 15 类差异挥发性物质，占挥发性化合物总数量的 20.83%，可用于 4 个品种细香葱的区分。通过 OAV 结合 OPLS-DA 筛选出 22 种关键风味物质，分析这些物质的香气特征进一步发现 4 个品种细香葱都具有青草香、硫磺味、咖啡味、薄荷味、蔬菜香、坚果香、药草香、脂肪香和叶香，‘白葱’和‘黑葱’表现出更为突出的青草香，‘本地红葱’和‘铁杆红葱’表现出更为突出的硫磺味、咖啡味和薄荷味。此外，与其他 3 个品种细香葱相比，‘铁杆红葱’具有更为突出的坚果香。β-紫罗兰酮在所有细香葱中 OAV>100000，是 4 个品种细香葱的关键香气成分，为整体香气贡献花香、木质香、甜香、果香和蜂蜡香。而呈甜香、花香和药草香的香茅醛和(S)-3,7-二甲基-6-辛烯醛 VIP 值最高，并且在含量上也有差异，对不同品种细香葱的区分起重要作用。

综上所述，泸西 4 个品种细香葱挥发性物质的组成差异，共同形成了不同细香葱独特的风味特征。这些结果不仅验证了葱属植物挥发性物质的普遍规律，还揭示了泸西 4 个品种细香葱间的风味差异，为种质资源评价提供科学依据，进一步为多样化不同细

香葱风味筛选奠定基础，推动泸西香葱产业的发展。挥发性物质的差异可能与土壤条件、气候条件、栽培条件等方面有关，今后可从多因素环境控制实验、结合遗传组学研究等方向开展研究，进一步明晰造成风味差异的原因。

© 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] SERAG A, BAKY M H, DÖLL S, et al. UHPLC-MS metabolome based classification of umbelliferous fruit taxa: A prospect for Phyto-equivalency of its different accessions and in response to roasting[J]. RSC Advances, 2020, 10(1): 76−85.

[2] 米月华. 葱属若干地方品种特性与分类的研究[D]. 杭州：浙江大学, 2020. [MI Yuehua. Studies on the characteristics and classification of several *Allium* landraces[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]

[3] 刘兵, 常远, 王瑞芳, 等. 葱属植物中挥发性风味物质研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 249−257. [LIU Bing, CHANG Yuan, WANG Ruifang, et al. Recent progress in research on volatile flavor compounds in *Allium*[J]. Food Science, 2022, 43(3): 249−257.]

[4] 何洪巨, 王希丽, 张建丽. GC-MS 法测定大葱、细香葱、小葱中的挥发性物质[J]. 分析测试学报, 2004, 23(S1): 98−100,103. [HE Hongju, WANG Xili, ZHANG Jianli. GC-MS determination of volatile substances in scallion, chive and shallot[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2004, 23(S1): 98−100,103.]

[5] 赵洪坤. 泸西县香葱产业发展现状、存在问题及建议[J]. 长江蔬菜, 2021(8): 76−77. [ZHAO Hongkun. Development status, problems and suggestions of chive (*Allium schoenoprasum* Linn.) industry in Luxi County[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2021(8): 76−77.]

[6] 瞿华蓥, 雷叶舒, 高文. 乡村振兴战略背景下泸西小香葱特色产业研究[J]. 产业创新研究, 2024(13): 97−99. [QU Huaying, LEI Yeshu, GAO Wen. Study on the characteristic industry of shallot in Luxi under the background of rural revitalization strategy[J]. Industrial Innovation, 2024(13): 97−99.]

[7] 方海田, 刘慧燕, 张光弟, 等. 宁夏 3 种葱属蔬菜的挥发性成分比较分析[J]. 中国调味品, 2018, 43(11): 145−149. [FANG Haitian, LIU Huiyan, ZHANG Guangdi, et al. Comparative analysis of volatile components in three alliaceous vegetables in Ningxia[J]. China Condiment, 2018, 43(11): 145−149.]

[8] BAKY M H, SHAMMA S N, KHALIFA M R, et al. How does *Allium leafy* parts metabolome differ in context to edible or inedible taxa? case study in seven *Allium* species as analyzed using MS-based metabolomics[J]. Metabolites, 2023, 13(1): 18.

[9] 王斌, 许浩, 徐俊, 等. 内蒙古野葱干的特征挥发性香气成分分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 296−304. [WANG Bin, XU Hao, XU Jun, et al. Analysis of characteristic volatile aroma components in Inner Mongolia dried *Allium chrysanthum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 296−304.]

[10] 王蓉, 曾文锦, 刘盼, 等. 顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用法对 3 种洋葱挥发性风味成分的分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 319−327. [WANG Rong, ZENG Wenjin, LIU Pan, et al. Analysis of volatile flavor components in three onion by headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 319−327.]

[11] 何小稳, 马寅正, 陈锦萍, 等. HS-SPME-GC-MS 法分析海南产黄皮不同部位的挥发性成分[J]. 中草药, 2018, 49(18): 4241−4249. [HE Xiaowen, MA Yinzheng, CHEN Jinping, et al. Analysis and identification of volatile components of different parts of *Clausena lansium* in Hainan by HS-SPME-GC-MS[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(18): 4241−4249.]

[12] GB 23200.8-2016 水果和蔬菜中 500 种农药及相关化学品残留量的测定气相色谱-质谱法[M]. 北京：中国标准出版社, 2017. [GB23200.8-2016 Determination of 500 pesticides and related chemical residues in fruits and vegetables by gas chromatography-mass spectrometry [M]. Beijing: China Standard Press, 2017.]

[13] HUANG Wenjing, FANG Shimao, WANG Jing, et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133549.

[14] XUE Jinjin, LIU Panpan, YIN Junfeng, et al. Dynamic changes in volatile compounds of Shaken black tea during its manufacture by GC×GC–TOFMS and multivariate data analysis[J]. Foods, 2022, 11(9): 1228.

[15] 王俊魁, 杨帆, 包斌. 顶空固相微萃取结合气质联用分析沙葱中挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 171−173. [WANG Junkui, YANG Fan, BAO Bin. Identification of volatile compounds in *Allium mongolicum* Regel by head space solid phase micro-extraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry(HS-SPME-GC-MS)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(24): 171−173.]

[16] 王蓓, 韩兆盛, 杨智杰, 等. 6 类常见食品中含硫化合物风味特征及形成机理研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(6): 13−25. [WANG Bei, HAN Zhaosheng, YANG Zhijie, et al. Research progress on flavor characteristics and formation mechanism of sulfur compounds in six common foods[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(6): 13−25.]

[17] 刘松忠, 陈清, 何洪巨, 等. 葱、蒜挥发性物质形成及影响因素研究进展[J]. 中国蔬菜, 2005(S1): 35−38. [LIU Songzhong, CHEN Qing, HE Hongju, et al. Research progress on the formation and influencing factors of volatile substances in onion and garlic[J]. China Vegetables, 2005(S1): 35−38.]

[18] 刘爱月, 盛成乐, 李存富. 常用调味料的化学结构与功效[J]. 中国调味品, 2004, 29(12): 30−33,19. [LIU Aiyue, SHENG Chengle, LI Cunfu. The chemical structure and function of common flavour[J]. Chinese Condiment, 2004, 29(12): 30−33,19.]

[19] 汪潇, 王锡昌. 顶空固相微萃取与气质联用法分析大葱的挥发性风味成分[J]. 现代食品科技, 2007, 23(3): 69−71,68. [WANG Xiao, WANG Xichang. Analysis of volatile flavor components of scallion by headspace solid phase micro-extraction and GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23(3): 69−71,68.]

[20] 刘松忠, 陈清, 高莉敏, 等. 固相微萃取-气相色谱-质谱法分析中国葱中的挥发性成分[J]. 质谱学报, 2008, 29(2): 88−91. [LIU Songzhong, CHEN Qing, GAO Limin, et al. Analysis of aroma components in Chinese onion by SPME-GC-MS[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2008, 29(2): 88−91.]

[21] 刘源, 周光宏, 王锡昌, 等. 顶空固相微萃取气质联用分析香葱挥发性风味成分[J]. 中国调味品, 2007, 32(9): 62−64. [LIU

Yuan, ZHOU Guanghong, WANG Xichang, et al. Determination of volatile flavor componets in *Allium tuberosum* L. by head space phase microextraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry(HS-SPME-GC-MS)[J]. China Condiment, 2007, 32(9): 62−64.]

[22] 张长波, 孙红霞, 巩中军, 等. 植物萜类化合物的天然合成途径及其相关合酶[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(4): 779−786. [ZHANG Changbo, SUN Hongxia, GONG Zhongjun, et al. Plant terpenoid natural metabolism pathways and their synthases[J]. Plant Physiology Communications, 2007, 43(4): 779−786.]

[23] KUSANO M, KOBAYASHI M, IIZUKA Y, et al. Unbiased profiling of volatile organic compounds in the headspace of *Allium* plants using an in-tube extraction device[J]. BMC Research Notes, 2016, 9: 133.

[24] 石芳, 李瑶, 杨雅轩, 等. 不同干燥方式对松茸品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 141−147. [SHI Fang, LI Yao, YANG Yaxuan, et al. Effect of different drying methods on the quality of *Tricholoma matsutake*[J]. Food Science, 2018, 39(5): 141−147.]

[25] RINGUELET J A, VIÑA S Z. Productos naturales vegetales[M]. La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 2013: 62-66.

[26] 陈芝飞, 蔡莉莉, 郝辉, 等. 香气活力值在食品关键香气成分表征中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 329−335. [CHEN Zhifei, CAI Lili, HAO Hui, et al. Progress in the application of odor activity values in the characterization of key aroma components in foods[J]. Food Science, 2018, 39(19): 329−335.]

[27] XIE Bojie, WU Qian, WEI Shouhui, et al. Optimization of headspace solid-phase micro-extraction conditions (HS-SPME) and identification of major volatile aroma-active compounds in Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler)[J]. Molecules, 2022, 27(8): 2425.

[28] MARSILI R. Flavor, fragrance, and odor analysis[M]. 2th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

[29] HU Xianqiao, LU Lin, GUO Zhenling, et al. Volatile compounds, affecting factors and evaluation methods for rice aroma: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 136−146.

[30] XIAO Zuobing, CAO Xueying, ZHU Jiancai, et al. Characterization of the key aroma compounds in three world-famous black teas[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(9): 2237−2252.

[31] GUO X Y, SCHWAB W, HO C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131933.

[32] GUO X Y, HO C T, WAN X C, et al. Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi rock tea during processing[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128230.

[33] ZHU Jiancai, NIU Yunwei, XIAO Zuobing. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS)[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128136.

[34] XIAO Zuobing, NIU Minxing, NIU Yunwei, et al. Evaluation of the perceptual interaction among sulfur compounds in durian by feller's additive model and odor activity value[J]. Food Analytical Methods, 2022, 15(7): 1787−1802.

[35] XIAO Zuobing, ZHANG Shenghang, ZHU Jiancai, et al. Identification of key aromas of grapefruit juice and study of their contributions to the enhancement of sweetness perception[J]. European Food Research and Technology, 2023, 249(2): 537−551.

[36] YUE Chuan, CAO Hongli, ZHANG Shaorong, et al. Aroma characteristics of Wuyi rock tea prepared from 16 different tea plant varieties[J]. Food Chemistry, 2023, 17: 100586.

[37] WANG Yun, HE Yuheng, LIU Yun, et al. Analyzing volatile compounds of young and mature *Docynia delavayi* fruit by HS-SPME-GC-MS and rOAV[J]. Foods, 2023, 12(1): 59.

[38] WANG J, YANG Z J, WANG Y D, et al. The key aroma compounds and sensory characteristics of commercial Cheddar cheeses[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(7): 7555−7571.

[39] SUN Ping, XU Bing, WANG Yi, et al. Characterization of volatile constituents and odorous compounds in peach (*Prunus persica* L) fruits of different varieties by gas chromatography-ion mobility spectrometry, gas chromatography-mass spectrometry, and relative odor activity value[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 965796.

[40] WANG MengQi, MA Wanjun, SHI Jiang, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination[J]. Food Research International, 2020, 130: 108908.