

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.01.001

杨梅, 胡晓婷, 徐卫红. 不同类型土壤与辣椒风味品质的相关性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 2-16.

不同类型土壤与辣椒风味品质的相关性研究

杨梅^{1,2}, 胡晓婷¹, 徐卫红¹

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 四川省农业科学院作物研究所, 成都 610066

摘要: 为探究辣椒的风味品质与不同类型土壤的相关关系, 采用相关分析和 PLS-DA 分析法对不同类型土壤(重庆紫色土、成都水稻土)辣椒的辣椒素、维生素 C、游离氨基酸和挥发性成分进行鉴定。结果表明, 紫色土辣椒的辣椒素、维生素 C 质量分数显著低于水稻土, 游离氨基酸质量分数则显著高于水稻土; 紫色土辣椒挥发性成分以醛、烯烃、酯、醇 4 类物质为主, 水稻土辣椒以醇、烯烃、酚 3 类物质为主; 3-蒈烯、罗勒烯、芳樟醇等 22 种物质是导致两种类型土壤辣椒风味明显不同的关键物质。相关分析结果表明, 土壤有机质与游离氨基酸、酸类呈显著或极显著正相关关系, 与辣椒素、维生素 C、醇类、酯类、酮类、酚类和烷烃类呈显著或极显著负相关关系; 碱解氮、速效磷与辣椒素、维生素 C、烯烃类、醇类、酮类、芳香族类、酚类、烷烃类呈显著或极显著正相关关系, 与游离氨基酸、酸类呈极显著负相关关系; 全磷、全钾、交换钙、交换镁与游离氨基酸、酸类呈显著或极显著正相关关系, 与辣椒素、维生素 C、烯烃类、醇类、酮类、芳香族类、酚类、烷烃类呈显著或极显著负相关关系。

关 键 词: 辣椒; 土壤类型; 辣椒素; 风味品质; PLS-DA 分析

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2024)01-0002-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Correlation between Different Types of Soil and Flavor Quality of Pepper

YANG Mei^{1,2}, HU Xiaoting¹, XU Weihong¹

1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Crop Research Institute of Sichuan Academy of Agriculture Sciences, Chengdu 610066, China

Abstract: In order to explore the correlation between the flavor quality of pepper and different types of soil, correlation analysis and PLS-DA analysis were used to identify capsaicin, vitamin C, free amino acids and volatile components of pepper planted in different types of soil (purple soil, paddy soil). The results showed that the contents of capsaicin and vitamin C in purple soil were significantly lower than those in paddy soil, while the content of free amino acid was significantly higher than that of in paddy soil. The volatile components of pepper in purple soil were mainly aldehydes, olefins, esters and alcohols, while those in paddy soil were mainly alcohols, olefins and phenols. 22 substances, such as 3-carene, ocimene, linalool, etc., were the key substances that affected the flavor of pepper in two types of soils. The results of correlation analysis showed that Soil organic matter had significant or extremely significant positive correlation with free amino acids and acids, and significant or extremely significant negative correlation with

capsaicin, vitamin C, alcohols, esters, ketones, phenols and alkanes. Alkali-hydrolyzed nitrogen and available P were significantly positively correlated with capsaicin, vitamin C, olefins, alcohols, ketones, aromatic groups, phenols and alkanes, and significantly negatively correlated with free amino acids and acids. Total P, total K, exchange Ca and exchange Mg were significantly or extremely significantly positively correlated with free amino acids and acids, and significantly or extremely significantly negatively correlated with capsaicin, vitamin C, olefins, alcohols, ketones, aromatic groups, phenols and alkanes.

Key words: pepper; soil types; capsaicin; flavor quality; PLS-DA analysis

辣椒是我国种植面积最大、产量最高的蔬菜作物。据2018年联合国粮食和农业组织统计数据库(FAOSTAT)数据显示(<https://www.fao.org/faostat/zh/#data/QCL>)，中国辣椒种植面积约74.0万hm²、产量约1 676.9万t。辣椒果实中含有丰富的维生素C、氨基酸、辣椒素等营养成分，既可作为蔬菜直接食用，也可作为调味品广泛应用于菜肴、食品加工中，对食物风味起重要作用^[1]。土壤是作物生长发育的重要载体，不同类型的养分状况明显不同，因而会导致作物产量与品质存在显著差异^[2-4]。张建等^[5]发现辣椒的维生素C、蛋白质、辣椒素等品质性状存在明显的地域分布特征，同时也有研究者发现土壤类型对辣椒的维生素C、可溶性固形物、粗蛋白、有机酸含量、硝酸盐含量有显著影响^[6-7]；秘鲁奇克拉约(Chiclayo)地区辣椒的辣椒素含量显著高于皮乌拉(Piura)和普卡帕(Pucallpa)两个地区，萜烯类、酯类、醛类、酮类是造成差异的关键挥发性物质；墨西哥韦拉克鲁斯(Veracruz)地区辣椒的天冬氨酸、亮氨酸含量远高于瓦哈卡州(Oaxaca)地区^[8-9]。这些研究结果证明了不同产地辣椒因土壤差异会有明显不同的营养及风味品质。

辣椒对氮、磷、钾需求量较高，其中氮是影响品质和产量的主要因素^[10]。在氮、磷、钾等营养元素与辣椒品质的相关性研究中，大多聚焦在复合肥、有机肥、元素肥等不同肥料的施用方法、施用量或辣椒的不同栽培方式上，不同类型土壤的营养成分与辣椒品质的相关性研究却鲜有报道。本试验研究重庆璧山紫色土、成都水稻土中养分与辣椒风味品质的相关性，旨在为不同地区优质辣椒的种植技术提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2019年收集了35个辣椒品种(含地方种、商业种、育成种，详见表1)，2020年将其种植于重庆市农业科学院西南蔬菜研究中心(重庆璧山)和四川省农业科学院现代农业科技创新示范园(成都)。璧山辣椒种植地块土壤类型为紫色土，成都为水稻土(土壤类型来源于中国土壤数据库)。

表1 供试辣椒品种信息

序号	品种名	种子来源	果形	序号	品种名	种子来源	果形
B1	艳椒 465	重庆	朝天椒	B19	云南秃顶椒	云南	牛角椒
B2	黄秀朝天椒	河北	朝天椒	B20	猪大肠尖椒	黑龙江	牛角椒
B3	珙县小米辣	四川	朝天椒	B21	鄂玉兰椒	湖北	牛角椒
B4	香楚 101	湖北	朝天椒	B22	佳美二号	湖北	牛角椒
B5	博辣酱椒一号	湖南	朝天椒	B23	禾盛绿秀	安徽	牛角椒
B6	日本三樱椒	河南	朝天椒	B24	农乐大椒	四川	牛角椒
B7	黑辣妹小尖椒	黑龙江	朝天椒	B25	福湘秀丽	湖南	牛角椒
B8	五彩小米椒	河北	朝天椒	B26	中华巨椒王	安徽	牛角椒
B9	云南朝天椒-3	云南	朝天椒	B27	川腾 6 号	四川	线椒
B10	珙县本地小海椒	四川	朝天椒	B28	香辣杭椒	河北	线椒
B11	茄门大甜椒	河北	灯笼椒	B29	博辣 9 号	湖南	线椒
B12	安徽甜椒	安徽	灯笼椒	B30	鄂椒帅亮	湖北	线椒
B13	中泰帝王椒	江苏	灯笼椒	B31	长箭	安徽	线椒
B14	长胜大薄皮	安徽	灯笼椒	B32	兴蔬 205	湖南	线椒
B15	渝椒 13 号	重庆	灯笼椒	B33	鄂椒香帅	湖北	线椒
B16	苏椒大果 717	重庆	灯笼椒	B34	博辣 3 号	湖南	线椒
B17	苏椒 5 号	江苏	灯笼椒	B35	合肥地方种	安徽	线椒
B18	苏椒 13 号	江苏	灯笼椒				

2019 年 10 月在璧山育苗, 2020 年 3 月 26 日移栽至璧山, 3 月 27 日移栽至成都。两地田间种植方式、管理水平一致, 每个品种重复种植 3 次, 1 米开厢双行覆膜垄作, 沟施 1200 kg/hm² 菌渣有机肥作底肥, 16-16-16 硫酸钾复合肥按 100 kg/hm² 溶于水进行根灌。

1.2 土壤主要养分指标分析

辣椒绿熟期果实全部收获后, 以梅花形 5 点取样, 收集 0~20 cm 表层土样, 混合后测主要养分指标。参照杨剑虹等^[11]的方法测定 pH 值、全氮、碱解氮、速效磷。pH 采用土:水=1:2.5 混合, PHSJ-5 pH 计测定; 全氮用浓硫酸(H₂SO₄)消煮, 凯氏定氮法测定; 碱解氮用碱水解法测定; 速效磷用碳酸氢钠浸提, 分光光度法测定; 速效钾采用醋酸铵浸提, 火焰光度法测定; 交换钙、镁用醋酸铵法测定。

1.3 营养品质分析

实验样品于 2020 年 4~5 月采收, 根据色泽和外形, 选择成熟度一致的绿熟期果实进行分批采收。所有样品采摘后用保鲜袋分装并及时带回实验室。一部分用于测定维生素 C、游离氨基酸质量分数; 另一部分 105 ℃杀青 30 min, 75 ℃烘干至恒重后测辣椒素含量。维生素 C 采用 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定》中的 2,6-二氯靛酚滴定法进行测定, 游离氨基酸参考邵金良等^[12]的方法用茚三酮比色法测定, 辣椒素参考王燕等^[13]的方法用高效液相色谱法测定。

1.4 挥发性物质分析

新鲜果实采摘带回实验室后, 去掉果柄, 洗净、切碎, 采用四分法取 40~60 g 加入液氮研磨成粉, 检测挥发性物质。参照王雪雅等^[14]的方法, 用顶空-固相微萃取(HS-SPME)提取挥发性物质, 气相色谱-质谱联用法(GC-MS 法)测定。

GC 条件: 毛细管气相色谱柱为 HP-5 MS(30 m×0.25 μm×0.25 μm), 进样口温度 250 ℃, 柱箱温度 35 ℃, 载气为氦气(He), 流量控制方式为线速度, 柱流量 1.0 mL/min, 吹扫流量 3.0 mL/min, 不分流进样。升温程序: 起始温度 35 ℃, 保持 5 min; 以 3 ℃/min 上升至 180 ℃, 保持 2 min; 再以 5 ℃/min 升至 250 ℃, 然后再次冷却至 35 ℃。

MS 条件: 传输线温度 280 ℃, 离子源温度 230 ℃, 四极杆温度 150 ℃, 电离方式为 EI, 电离能量 70 eV, 采集方式为 Scan, 扫描范围 m/z 35~400。

定性分析: 各组分在图谱库 NIST 2008 和 Flavour 2.0 中匹配度大于 80% 的鉴定结果; 检测 C5~C25 正构烷烃标准品的保留时间, 参考 Kovats 保留指数公式^[18]计算各组分的 R 值, 通过 NIST 69 数据库(<http://webbook.nist.gov/chemistry/>)检索同方法下的已有 R 值, 以±20 为标准筛选各组分^[29]。

定量分析: 各化合物峰面积与 2-辛酮内标物峰面积比值, 按下面公式计算各挥发性化合物含量:

$$C_x = \frac{A_x \times m_i}{A_i \times m_x} \times 1000$$

式中, C_x 为挥发性化合物 x 的含量(μg/kg); A_x, A_i 分别为挥发性化合物和内标物峰面积; m_x, m_i 分别为样品质量(g)和内标物质量(μg)。

1.5 数据分析

利用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理和图表制作, DPS 18.0 进行方差分析、Duncan 多重比较和相关分析(Pearson 相关系数法), PLS-DA 分析使用 OmicShare 线上数据分析平台(<https://www.omicshare.com/tools>)。

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型主要养分指标比较

检测土壤养分指标发现(表 2), 紫色土和水稻土 pH 值分别是 6.54 和 7.07, 接近中性, 紫色土有机质

质量分数显著高于水稻土。两类土壤大量营养成分差异明显, 紫色土全磷、全钾、速效钾质量分数分别为水稻土的1.6, 1.1和1.1倍; 水稻土全氮、碱解氮、速效磷质量分数较紫色土分别高9.7%, 30.3%和26.0%。分析中量元素钙、镁发现, 紫色土交换钙、交换镁质量分数是水稻土的1.4和1.1倍。上述结果表明, 紫色土可利用氮、磷质量分数低于水稻土, 而钾、钙、镁质量分数高于水稻土。

表2 表层土壤基本理化性质

养分指标	紫色土	水稻土	养分指标	紫色土	水稻土
pH值	6.54	7.07	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	82.31b	103.71a
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.24b	1.36a	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	447.2a	415.9b
全磷/(g·kg ⁻¹)	2.92a	1.87b	交换钙/(g·kg ⁻¹)	22.17a	15.74b
全钾/(g·kg ⁻¹)	4.03a	3.75b	交换镁/(g·kg ⁻¹)	2.58a	2.33b
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	117.51b	153.06a	有机质/(g·kg ⁻¹)	34.2a	20.7b

2.2 两地辣椒素质量分数比较

紫色土和水稻土辣椒中, 每100 g干物质的辣椒素质量分数分别为1.52~274.37 mg和3.47~353.82 mg, 品种间差异有统计学意义(表3), 紫色土B1, B8和B19等3个辣椒品种的辣椒素质量分数较高, 是辣椒素质量分数较低品种B13的155.4, 180.5和153.4倍; 水稻土B14, B8和B5辣椒素质量分数较高, 是较低品种B25的60.5, 68.7和102.0倍。除B18和B25外, 同一辣椒品种在两类土壤中的辣椒素质量分数差异有统计学意义, 如紫色土B7, B9和B30的辣椒素质量分数是水稻土的2.6, 6.7和2.3倍, 水稻土B6, B11和B26的辣椒素质量分数是紫色土的33.3, 78.0和23.3倍。总体而言, 水稻土上辣椒的辣椒素质量分数显著高于紫色土。

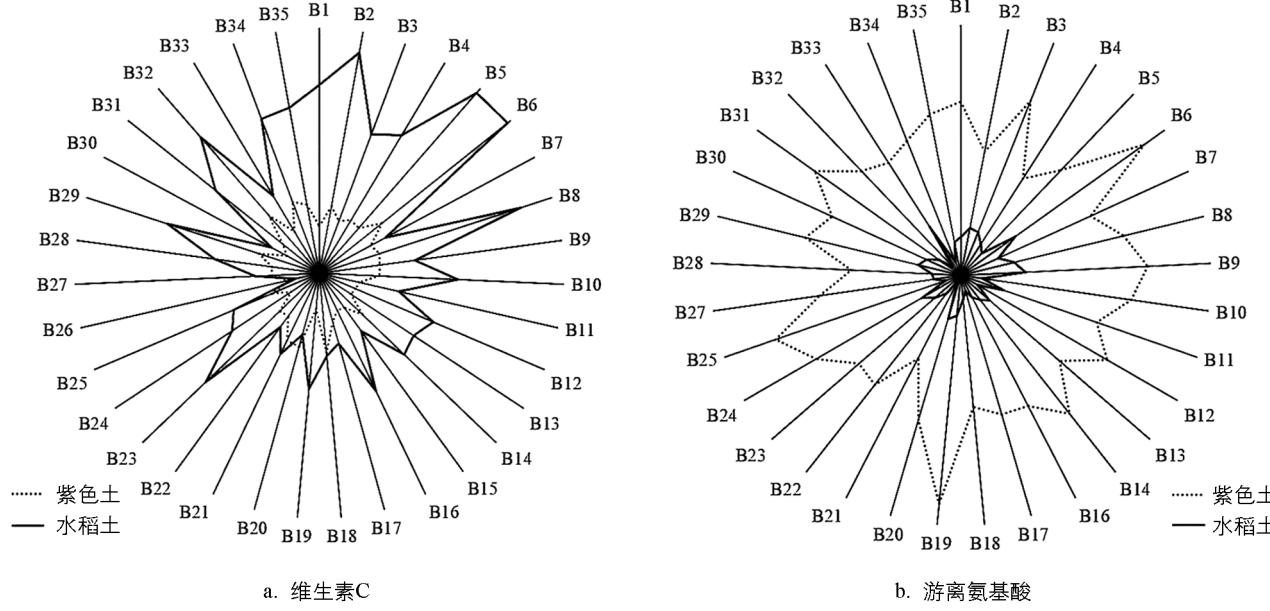
表3 紫色土、水稻土不同辣椒品种间辣椒素质量分数比较

品种编号	紫色土/mg	水稻土/mg	品种编号	紫色土/mg	水稻土/mg
B1	236.15±6.95a	208.62±1.38b	B19	233.19±6.37a	148.65±1.30b
B2	150.10±5.15b	171.92±0.52a	B20	107.29±2.35a	83.06±0.48b
B3	98.10±1.19b	139.04±1.09a	B21	41.19±0.71b	57.21±0.16a
B4	195.05±1.62a	114.71±4.63b	B22	4.87±0.19b	12.91±0.20a
B5	54.54±0.10b	209.81±0.74a	B23	52.95±1.69b	137.24±0.13a
B6	4.54±0.30b	151.34±1.27a	B24	3.96±0.47b	6.47±0.26a
B7	206.21±3.23a	80.06±0.44b	B25	4.29±0.17a	3.47±0.11a
B8	274.37±7.80a	238.43±3.83b	B26	2.43±0.30b	56.60±0.43a
B9	111.43±1.07a	16.71±0.15b	B27	35.91±0.13b	106.48±1.51a
B10	18.64±0.54b	45.96±0.15a	B28	88.30±0.29a	62.94±0.23b
B11	1.74±0.06b	136.02±4.70a	B29	54.15±0.71a	24.51±0.46b
B12	1.58±0.30b	4.12±0.02a	B30	67.44±0.08a	29.46±0.41b
B13	1.52±0.27b	5.68±0.02a	B31	41.66±0.24b	122.58±1.40a
B14	18.91±1.11b	353.82±3.76a	B32	34.22±1.08b	119.79±28.80a
B15	172.68±0.58a	78.42±2.71b	B33	33.63±0.55b	79.79±0.21a
B16	32.02±0.53b	205.45±0.20a	B34	55.19±1.87b	85.57±1.84a
B17	13.69±0.68a	7.59±0.18b	B35	41.01±3.37b	65.25±5.50a
B18	2.95±0.04a	3.08±0.08a			

注: 小写字母表示在0.05水平下差异具有统计学意义, 下同; 辣椒质量分数以每100 g干物质计。

2.3 维生素 C、游离氨基酸质量分数比较

辣椒作为维生素 C 质量分数最高的蔬菜之一, 是日常膳食中维生素 C 的重要来源; 游离氨基酸是影响食物风味的重要因素, 也是评价食物营养的关键指标^[15-16]. 通过比较紫色土、水稻土辣椒的维生素 C、游离氨基酸质量分数发现, 不同品种间差异较大(图 1). 除 B20, B26 外, 水稻土辣椒的维生素 C 质量分数是紫色土辣椒的 1.0~4.0 倍; 但水稻土辣椒游离氨基酸质量分数明显低于紫色土辣椒, 不超过紫色土辣椒的 40%, 说明不同栽培土壤对辣椒的维生素 C、游离氨基酸质量分数有显著影响, 这与张晓芬等^[17]的研究结果一致.



单位 mg, 以 100 g 干物质计.

图 1 两类土壤辣椒的维生素 C、游离氨基酸质量分数比较

2.4 两地辣椒挥发性物质组分及质量分数分析

2.4.1 两地挥发性物质的组分及质量分数

采用 HS-SPME-GC-MS 联用技术分别检测紫色土、水稻土各个辣椒品种的挥发性物质组分, 通过 NIST 2008 和 Flavour 2.0 质谱库匹配得出各化合物名称并进行归类. 紫色土辣椒鉴定出 152 种化合物, 水稻土辣椒鉴定出 85 种化合物(表 4). 两类土壤辣椒都鉴定出的挥发性物质有 71 种, 这些物质可能是辣椒的典型挥发性物质; 只在紫色土辣椒鉴定出的挥发性物质有 81 种, 只在水稻土辣椒鉴定出的挥发性物质有 14 种, 这些物质可能与栽培土壤的差异有关.

表 4 紫色土、水稻土辣椒挥发性物质组分与质量分数

序号	挥发性物质组分	R	紫色土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水稻土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
烯烃类				
C1	β -律草烯	1 455	28.28±10.81	—
C2	双戊烯	1 032	418.25±53.79	327.35±16.05
C3	E, E-2, 6-二甲基-1, 3, 5, 7-辛四烯	1 136	34.23±9.72	—
C4	α -雪松烯	1 415	12.95±4.70	150.45±72.74
C5	长叶烯	1 408	37.80±8.61	186.16±40.06
C6	(+)-香橙烯	1 490	68.36±21.28	—
C7	α -古朱烯	1 485	50.71±10.2	1 482.14±566.1
C8	三环萜	923	56.81±21.68	—

续表 4

序号	挥发性物质组分	R	紫色土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水稻土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
C9	β -榄香烯	1 397	43.68±7.74	498.99±44.62
C10	萜品油烯	1 092	18.64±3.16	370.64±232.69
C11	2, 6-二甲基-2, 4, 6-辛三烯	1 138	44.61±5.86	140.17±13.56
C12	1-十四烯	1 398	9.81±0.11	—
C13	(+)-长叶环烯	1 373	44.81±5.83	175.80±18.18
C14	β -雪松烯	1 506	279.23±62.68	1 068.88±231.09
C15	莎草烯	1 390	6.13±0.67	—
C16	8-十七烯	1 658	19.95±9.02	—
C17	(Z)- β -罗勒烯	1 048	74.97±10.23	710.75±136.64
C18	(E)- β -罗勒烯	1 045	19.18±2.43	—
C19	(+)- α -半水芹烯	1 453	158.11±13.53	1 145.52±145.15
C20	巴伦西亚橘烯	1 496	52.63±13.27	403.66±194.75
C21	(+)-莰烯	950	14.88±2.36	—
C22	α -榄香烯	1 488	7.14±1.95	—
C23	α -长叶蒎烯	1 367	127.95±26.92	383.22±75.70
C24	马兜铃烯	1 488	118.74±5.62	—
C25	别罗勒烯	1 140	42.75±7.38	384.90±92.52
C26	L- α -蒎烯	935	58.45±5.89	—
C27	蒎烯	934	36.51±7.15	—
C28	α -葡萄烯	1 484	287.73±16.93	—
C29	佛手烯	1 495	22.05±7.48	178.9±61.74
C30	3-蒈烯	1 055	286.17±20.49	2 196.74±283.38
C31	罗勒烯	1 054	316.35±29.15	2 481.86±303.94
C32	衣兰烯	1 376	101.58±15.6	623.63±179.47
C33	(-)- α -荜澄茄油烯	1 380	13.06±0.29	—
C34	花柏烯	1 453	125.33±21.77	—
C35	金合欢烯	1 464	69.10±14.52	433.56±73.94
C36	γ -马阿里烯	1 408	16.89±2.29	—
C37	异香树烯	1 477	108.03±25.64	—
C38	(E)- β -金合欢烯	1 464	34.83±0.98	—
C39	榄香烯	1 397	22.63±3.74	—
C40	(3Z)-3-十六碳烯	1 589	9.19±1.78	—
C41	(Z)-7-十六烯	1 575	23.95±11.48	33.23±1.66
C42	E-7-十四烯	1 370	19.81±1.56	260.16±131.30
C43	(E)-6-十四烯	1 357	36.25±12.75	220.49±2.03
C44	(E)-5-十四烯	1 374	20.18±5.14	—
C45	3, 4-二甲基-2, 4, 6-辛三烯	1 143	15.35±2.82	—
C46	雪松醛-2, 4-二烯	1 432	99.35±43.59	399.45±231.77
C47	10s, 11s-雪松醛-3(12), 4-二烯	1 403	1 629.08±417.51	12 521.91±4 066.48

续表 4

序号	挥发性物质组分	R	紫色土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水稻土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
C48	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	1 035	77.53±11.05	272.07±90.83
C49	6E-6(Z-2-亚丁烯)-1,5,5-三甲基-1-环己烯	1 367	8.49±1.88	—
C50	α -紫穗槐烯	1 488	43.81±0.97	—
C51	β -马来烯	1 373	29.21±9.56	—
C52	4,11-蛇床二烯	14 85	32.18±6.36	236.36±143.17
C53	α -芹子烯	1 500	—	362.08±86.68
C54	(E)-3-十四碳烯	1 392	—	175.78±23.49
烷烃类				
C55	十二烷	1 206	40.58±6.61	—
C56	二十烷	1 607	77.33±8.04	360.96±118.01
C57	十六烷	1 602	52.40±11.05	299.44±34.24
C58	十三烷	1 306	30.22±3.31	108.62±11.63
C59	十四烷	1 406	52.72±9.63	362.06±53.81
C60	十五烷	1 506	157.81±79.11	1 362.67±252.19
C61	十七烷	1 706	27.93±11.98	471.27±139.82
C62	十九烷	1 506	14.09±2.36	—
C63	2-甲基-二六烷	1 668	61.29±18.18	283.55±65.19
C64	2-甲基-十五烷	1 570	149.56±10.5	868.44±203.49
C65	2-甲基-四癸烷	1 470	264.40±34.14	1 888.08±136.71
C66	2-甲基-十三烷	1 370	327.83±28.55	2 048.01±229.75
C67	3-甲基十五烷	1 577	51.16±9.67	—
C68	3-甲基十三烷	1 370	56.90±14.85	—
C69	Z-($-$)-2,4a,5,6,9a-六氢-3,5,5,9-四甲基 (1H)苯并环庚烷	1 483	435.20±10.33	2 794.30±424.04
C70	螺环烷(异构体)	1 305	—	311.47±16.14
酯类				
C71	异丁酸苄酯	1 304	82.41±21.86	—
C72	3-甲基丁酸苯甲酯	1 400	123.62±56.99	90.95±27.34
C73	己酸甲酯	933	87.97±25.91	—
C74	水杨酸甲酯	1 198	567.12±96.07	3 827.97±1784.15
C75	丁酸戊酯	1 102	109.35±19.4	—
C76	异戊酸异戊酯	1 113	343.17±129.29	338.14±92.69
C77	己酸异戊酯	1 258	63.11±21.16	—
C78	癸酸异戊酯	1 615	156.97±19.16	—
C79	异丁酸己酯	1 159	267.48±44.92	—
C80	异丁酸戊酯	1 059	60.15±19.14	—
C81	三氟乙酸 1-辛酯	1 079	75.27±21.74	—
C82	丁酸己酯	1 162	191.97±18.97	—
C83	2-甲基丁酸-3-己烯醇酯	1 240	529.64±44.25	1 067.41±375.76

续表 4

序号	挥发性物质组分	R	紫色土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水稻土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
C84	戊酸苄酯	1 396	48.96±12.51	—
C85	2-甲基丁酸己酯	1 250	274.64±65.63	—
C86	(Z)-丁酸-3-己烯酯	1 194	218.62±53.99	—
C87	13-十四烷内酯	1 657	96.69±18.16	—
C88	2-甲基丁酸异戊酯	1 107	526.78±249.58	—
C89	(Z)-己酸-3-己烯酯	1 388	106.38±30.22	—
C90	异戊酸叶醇酯	1 243	81.78±44.75	—
C91	正戊酸-(Z)-3-己烯酯	1 242	42.26±7.44	—
C92	正戊酸叶醇酯	1 253	64.87±18.59	—
C93	2-甲基丁酸戊酯	1 147	217.33±19.7	—
C94	十三内酯	1 632	34.70±5.94	132.78±47.21
C95	辛酸乙酯	1 206	—	785.98±168.02
C96	乙酸异戊酯	885	—	2 237.92±399.76
醛类				
C97	己醛	807	2 137.06±288.74	1 015.18±221.71
C98	苯甲醛	963	215.30±18.29	200.43±61.22
C99	庚醛	909	76.10±7.33	—
C100	癸醛	1 213	28.22±1.92	—
C101	苯乙醛	1 049	46.21±5.94	183.67±65.47
C102	壬醛	1 111	92.63±13.14	116.43±9.03
C103	(E, E)-2, 4-己二烯醛	917	436.76±104.5	—
C104	β -环柠檬醛	1 225	38.45±10.23	330.3±147.44
C105	E-2-己烯醛	859	308.21±23.09	—
C106	E, Z-2, 6-壬二烯醛	1 160	139.20±22.85	—
C107	2, 4-癸二烯醛	1 300	47.98±5.24	—
C108	E-2-辛烯醛	1 064	416.10±67.29	1 029.83±323.51
C109	正十五碳醛	1 684	214.84±45.67	—
C110	(E, E)-2, 4-庚二烯醛	1 015	35.79±3.37	—
C111	(E, E)-2, 4-壬二烯醛	1 220	26.16±3.34	—
C112	(E)-2-己烯醛	859	616.68±184.18	1 080.48±176.89
C113	E-2, 6-壬二醛	1 160	82.67±14.69	—
C114	(E)-2-庚烯醛	963	196.06±68.9	—
C115	(E)-2-壬烯醛	1 166	132.05±6.32	276.84±135.04
C116	E-2, 4-癸二烯醛	1 306	148.05±23.83	—
C117	5-乙基环戊-1-烯醛	1 035	93.26±11.07	—
C118	(Z)-2-壬烯醛	1 166	121.49±37.99	—
醇类				
C119	苯乙醇	1 120	9.79±1.45	7 806.66±226.83
C120	芳樟醇	1 106	341.00±40.44	18 924.07±2188.91

续表 4

序号	挥发性物质组分	R	紫色土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水稻土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
C121	α -松油醇	1 196	7.46±1.41	1 412.84±354.9
C122	苯醇	1 042	47.75±11.84	482.00±119.57
C123	2-乙基己醇	1 037	241.49±17.11	850.05±157.16
C124	正己醇	877	780.35±158.81	1 185.96±58.56
C125	1-辛醇	1 079	132.6±45.14	—
C126	4-甲基-1-戊醇	844	377.82±128.55	—
C127	Z-3-己烯醇	862	1091.41±22.63	2 368.55±891.05
C128	Z-3-壬烯醇	1 161	75.14±12.69	1 886.09±215.84
C129	反式-2-辛烯-1-醇	1 077	108.90±33.45	—
C130	2-甲基-6-庚烯-1-醇	1 001	80.10±19.6	464.81±49.08
C131	仲辛醇	1 010	—	4 293.28±183.70
C132	(E)-3-己烯-1-醇	865	—	265.71±20.34
酮类				
C133	β -紫罗酮	1 492	11.65±0.06	—
C134	2-庚酮	899	42.95±6.77	—
C135	α -紫罗兰酮	1 434	44.50±5.60	85.24±21.48
C136	L(-)-樟脑	1 148	17.11±5.88	—
C137	樟脑	1 148	21.88±5.92	—
C138	β -紫罗兰酮	1 492	110.00±24.22	650.88±251.46
C139	二氢- β -紫罗兰酮	1 445	39.23±10.04	129.44±30.77
C140	3, 5-辛二烯-2-酮	1 079	40.52±16.74	—
C141	二氢- α -紫罗兰酮	1 421	115.74±20.54	—
C142	(3E, 5E)-辛-3, 5-二烯-2-酮	1 079	31.63±5.17	—
C143	甲基壬基甲酮	1 303	—	1 496.70±142.80
C144	2-十三酮	1 507	—	261.39±138.02
C145	2-壬酮	1 101	—	1 801.17±514.64
芳香族类				
C146	1-甲基萘	1 311	14.70±3.09	108.39±23.38
C147	萘	1 184	43.96±4.81	204.34±15.52
C148	2-甲基萘	1 294	16.95±3.83	75.72±40.93
C149	邻二甲苯	880	35.19±2.43	256.38±79.02
C150	对二甲苯	871	60.14±5.70	309.42±52.18
C151	甲苯	767	4.61±1.40	392.63±134.54
C152	十氢-2-甲基萘	1 126	18.49±6.27	—
酚类				
C153	愈创木酚	1 095	40.48±8.11	2 684.98±1246.29
C154	2, 4-二叔丁基苯酚	1 520	18.40±1.32	—
C155	2, 5-二叔丁基酚	1 520	27.93±13.08	—
C156	2-甲氧基-4-乙烯苯酚	1 320	8.10±3.69	630.93±123.20

续表 4

序号	挥发性物质组分	R	紫色土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水稻土/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
C157	4-乙基苯酚	1 183	—	3 337.71±437.10
C158	4-乙基愈创木酚	1 285	—	5 008.93±910.43
C159	4-甲基愈创木酚	1 202	—	7 313.38±1501.28
酸类				
C160	己酸	1 012	876.06±122.74	—
C161	己基戊酸	1 273	125.93±27.53	—
其他类				
C162	N-甲基吡咯	739	—	3 166.53±2 232.21
C163	吲哚	1 300	166.53±58.36	—
C164	2-甲氧基-3-异丁基吡嗪	1 187	258.68±16.24	520.83±79.02
C165	Z-2-(2-戊烯基)呋喃	1 007	89.95±3.34	—
C166	(E)-2-(2-戊烯基)呋喃	1 007	84.98±30.22	—

注: R 值以正构烷烃标准品出峰保留时间为基准, 采用 Kovats 保留指数计算^[18].

从表 5 可以看出, 醛类和醇类分别是紫色土和水稻土辣椒相对质量分数最高的挥发性物质组分, 因此, 醛类、醇类对辣椒果实的风味起着至关重要的作用。醛类大多具有浓烈的花香味和果香味, 两类土壤辣椒中检出的醛类种类和相对质量分数差别较大。紫色土辣椒鉴定出 22 种, 相对质量分数为 24.76%, 而水稻土辣椒仅鉴定出 8 种, 相对质量分数仅有 3.70%。紫色土辣椒的己醛质量分数最高(2137.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$), 占挥发性物质总量的 9.37%; 其次是(E)-2-己烯醛、E-2-辛烯醛、(E, E)-2, 4-己二烯醛、E-2-己烯醛、苯甲醛, 相对质量分数为 0.94%~2.70%。水稻土辣椒的(E)-2-己烯醛、E-2-辛烯醛、己醛 3 种物质质量分数较高且相差不大, 相对质量分数为 0.85%~0.90%。11 种具有脂肪味的醛类物质(如庚醛、癸醛、(E, E)-2, 4-己二烯醛、(E, E)-2, 4-庚二烯醛等)和 2 种具有黄瓜、生菜等青嫩味的醛类物质(E, Z-2, 6-壬二烯醛、E-2, 6-壬二醛)仅在紫色土辣椒中鉴定出, 说明紫色土辣椒果实的脂肪味和青嫩味更浓郁。醇类具有令人愉快的花香味和水果味, 紫色土、水稻土辣椒的醇类种类相差不大, 但相对质量分数差异明显。醇类在水稻土辣椒的相对质量分数为 33.35%, 远高于其他物质, 醇类在紫色土辣椒中的相对质量分数仅有 14.44%。水稻土辣椒的芳樟醇相对质量分数最高, 为 15.80%; 其次是苯乙醇和仲辛醇, 相对质量分数分别为 6.52% 和 3.59%。紫色土辣椒的 Z-3-己烯醇质量分数最高, 相对质量分数为 4.78%; 其次是 4-甲基-1-戊醇和芳樟醇, 相对质量分数分别为 1.66% 和 1.49%。芳樟醇、苯乙醇都具有花香味和水果味, 故水稻土辣椒的花果香味主要由醇类物质组成, 而紫色土辣椒的花果香味由醛类物质组成^[19-21].

烯烃类物质是辣椒挥发性成分中种类最多的一类化合物, 对辣椒风味有着不容忽视的作用, 尤其是萜烯类物质, 大多具有花香、水果香味, 是柑橘类的典型挥发性化合物, 对风味贡献较大^[22]。两类土壤种植的辣椒烯烃类物质种类差别较大(紫色土辣椒有 52 种, 水稻土辣椒有 28 种), 相对质量分数却相近。10s, 11s-雪松醛-3(12), 4-二烯在紫色土、水稻土辣椒中的相对质量分数最高, 分别为 7.14% 和 10.5%。紫色土辣椒的双戊烯、罗勒烯和 3-蒈烯相对质量分数仅次于 10s, 11s-Himachala-3(12), 4-二烯, 分别为 1.83%, 1.39% 和 1.25%。水稻土辣椒中罗勒烯、3-蒈烯和 α -古朱烯的相对质量分数较高, 分别为 2.07%, 1.83%, 1.24%。紫色土辣椒中相对质量分数较低(<0.15%)的物质有 α -雪松烯、萜品油烯、(+)-莰烯、(-)- α -荜澄茄油烯、(E)- β -金合欢烯等 21 种, 水稻土辣椒中相对质量分数较低的物质有 α -雪松烯、长叶烯、(+)-长叶环烯、佛手烯、(Z)-7-十六烯等 7 种。

酯类具有水果香味,是判断水果成熟的重要指标^[14]. 紫色土辣椒果实中鉴定出的酯类物质种类仅次于烯烃类,相对质量分数也较高(19.16%);水稻土辣椒果实中酯类检出种类较少,相对质量分数也较低,但单个物质质量分数较高.水杨酸甲酯是水稻土辣椒中质量分数最高的酯类物质,具有花香味、薄荷味、冬青味,是茶、玫瑰花、苹果和樱桃的典型香气成分^[23-24].己酸甲酯、丁酸戊酯、己酸异戊酯、丁酸己酯、(Z)-丁酸-3-己烯酯等7种具有水果味的挥发性物质只在紫色土辣椒中鉴定出,而辛酸乙酯、乙酸异戊酯2种具有水果味的物质仅在水稻土辣椒中鉴定出,说明两种土壤种植的辣椒果实形成水果香味的挥发性组分是不同的,紫色土辣椒的水果味挥发性组分更丰富.

酚类物质是食醋特有的香气来源^[25],两种土壤的辣椒果实中酚类物质检出种类较少,但其在水稻土辣椒果实中相对质量分数较高,是水稻土辣椒中相对质量分数较高的3类物质之一.水稻土辣椒中的4-甲基愈创木酚、4-乙基愈创木酚相对质量分数较高,分别为6.11%和4.18%,高于大部分具有水果味的醇类、酯类物质的相对质量分数.这2种物质都具有培根味、丁香味或烟味,是红、青、黄甜椒或青辣椒中常检出的物质.

烷烃、酮、芳香族和酸4类物质在辣椒中的相对质量分数均较低,但因阈值不同,对辣椒的风味也有重要作用.烷烃类物质阈值较高,对风味贡献较小,其中Z-(—)-2,4a,5,6,9a-六氢-3,5,5,9-四甲基(1H)苯并环庚烷在水稻土辣椒中的相对质量分数较高,为2.33%.大多数酮类物质具有持久的花香味和水果香味,紫色土辣椒中的β-紫罗兰酮和二氢-α-紫罗兰酮质量分数较高,水稻土辣椒中的2-壬酮和甲基壬基甲酮质量分数较高.芳香族类质量分数较高的物质都具有令人不愉快的汽油味、苦杏仁味和木材味等,水稻土辣椒中单个芳香族类物质的质量分数都高于紫色土辣椒,说明水稻土辣椒果实令人不愉快的味道更重.本研究仅鉴定出2种酸类物质,且都仅存于紫色土辣椒品种中,说明紫色土辣椒具有酸味,而水稻土辣椒没有.

两地辣椒果实中均检出的5种其他类物质都属于杂环类化合物,其中,紫色土4种、水稻土2种,仅2-甲氧基-3-异丁基吡嗪在两种土壤中鉴定出.2-甲氧基-3-异丁基吡嗪具有香料味,是甜椒的典型风味物质,其在水稻土辣椒中的质量分数高于紫色土辣椒,是紫色土辣椒的2倍.

表5 两地辣椒果实中检出的挥发性物质种类及相对质量分数

挥发性物质种类	紫色土		水稻土	
	种类/种	相对质量分数/%	种类/种	相对质量分数/%
烯烃类	52	23.38	28	23.79
烷烃类	15	7.89	12	9.04
酯类	24	19.16	7	8.06
醛类	22	24.76	8	3.70
醇类	12	14.44	11	33.35
酮类	10	2.08	6	3.75
芳香族类	7	0.85	6	1.06
酚类	4	0.42	5	15.29
酸类	2	4.39	0	0
其他类	4	2.63	2	1.97
合计	152	100	85	100

2.4.2 两地挥发性物质的PLS-DA分析

用紫色土、水稻土辣椒的挥发性物质质量分数建立PLS-DA分值图,从图2a可以看出,第一主成分(t1)与第二主成分(t2)分别为81.0%和12.0%,表明该模型能代表样本93.0%的信息,能将两类土壤辣椒的挥发性物质有效分开,说明两类土壤辣椒的挥发性成分具有极显著的差异.图2b是PLS-DA变量重要

度分值图, 重要度分值越大, 说明该物质在两类土壤辣椒中的差异越明显。由图 2b 可知, α -古朱烯、 β -雪松烯、(+)- α -半水芹烯、3-蒈烯、罗勒烯、10s, 11s-雪松醛-3(12), 4-二烯、十五烷、2-甲基-十五烷、2-甲基-四癸烷、2-甲基-十三烷、Z-(+)-2, 4a, 5, 6, 9a-六氢-3, 5, 5, 9-四甲基(1H)苯并环庚烷、辛酸乙酯、己醛、苯乙醇、芳樟醇、Z-3-壬烯醇、仲辛醇、愈创木酚、4-乙基苯酚、4-乙基愈创木酚、4-甲基愈创木酚、己酸对两类土壤辣椒的分类具有关键作用, 故这 22 种物质可能是导致两类土壤辣椒气味明显不同的关键物质。

2.5 土壤养分与辣椒素、维生素 C、游离氨基酸的相关性分析

分析土壤养分与辣椒营养品质的相关性发现(表 6), 全氮与辣椒素、游离氨基酸质量分数, 速效钾与辣椒素质量分数的相关关系不显著($p > 0.05$), 其余养分指标与辣椒素、维生素 C、游离氨基酸质量分数均存在显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)相关关系。辣椒素质量分数与土壤碱解氮、速效磷呈极显著正相关关系, 与全磷、全钾、交换钙、交换镁呈极显著负相关关系, 与有机质质量分数呈显著负相关关系。维生素 C 与全氮呈显著正相关关系, 与碱解氮、速效磷呈极显著正相关关系; 与有机质呈显著负相关关系, 与全磷、全钾、速效钾、交换钙、交换镁呈极显著负相关关系。上述结果表明提高土壤氮、速效磷养分, 可提高辣椒素、维生素 C 的质量分数。游离氨基酸质量分数与养分指标的关系和维生素 C 与养分指标的关系基本相反, 说明不同类型土壤种植的辣椒果实营养品质差异较大。

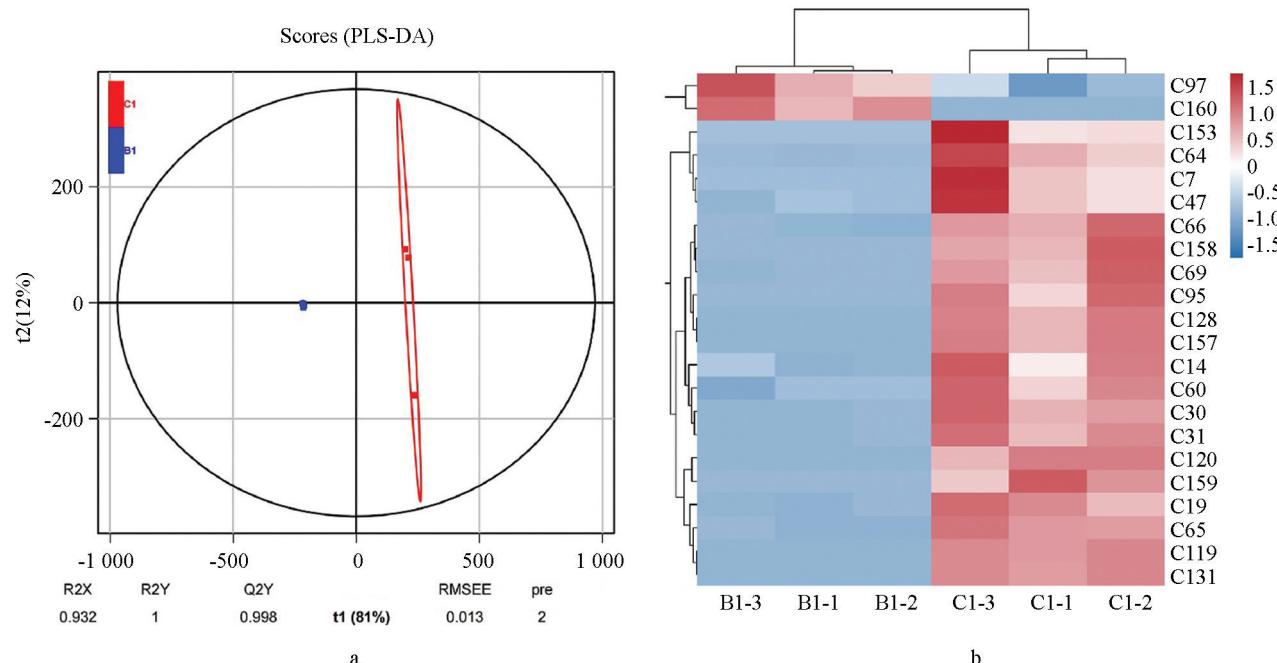


图 2 两类土壤辣椒 PLS-DA 分值图

表 6 土壤养分与营养品质的相关分析结果

土壤养分	辣椒素	维生素 C	游离氨基酸
有机质	-0.895 *	-0.917 *	0.885 *
全氮	0.807	0.825 *	-0.802
全磷	-0.996 **	-0.996 **	0.990 **
全钾	-0.938 **	-0.929 **	0.931 **
碱解氮	0.937 **	0.933 **	-0.928 **
速效磷	0.995 **	0.994 **	-0.991 **
速效钾	-0.937	-0.929 **	0.931 **
交换钙	-0.996 **	-0.994 **	0.991 **
交换镁	-0.975 **	-0.977 **	0.967 **

注: * 表示显著相关($p < 0.05$), ** 表示极显著相关($p < 0.01$), 下同。

2.6 不同土壤类型与挥发性物质的相关性分析

从表 7 可以看出, 醛类物质质量分数与土壤养分不相关, 说明这类物质质量分数受土壤养分差异影响较小。有机质质量分数与酸类呈极显著正相关关系, 与醇类呈极显著负相关关系, 与酯、酮、酚 3 类物质呈显著负相关关系, 说明土壤有机质质量分数高, 辣椒酸味重, 不利于香味物质的形成。全氮与酮类质量分数呈显著正相关关系, 与酸类呈显著负相关关系; 碱解氮与烯烃、醇、酮等 7 类物质均有显著或极显著关系, 值得注意的是碱解氮与酸类物质质量分数呈极显著负相关关系, 说明提高土壤氮素养分, 可以降低辣椒酸味。全磷除与酸类物质质量分数呈极显著正相关外, 与烯烃类、醇类等 5 类物质均呈极显著负相关关系; 速效磷除与酸类物质呈极显著负相关外, 与烯烃类、醇类等 5 类物质均呈极显著正相关关系, 说明提高土壤的有效磷质量分数不仅可以降低辣椒酸味, 还可以增加香味。全钾、速效钾、交换钙、交换镁与烯烃类、醇类等 6 类物质的质量分数呈显著或极显著负相关关系, 与酸类呈显著正相关关系, 说明土壤钾、钙、镁养分过高, 对辣椒的风味品质有负面影响。

表 7 土壤养分与挥发性物质的相关分析结果

土壤养分	烯烃类	醇类	酯类	酮类	芳香族类	酚类	醛类	酸类	烷烃类	其他类
有机质	-0.806 4	-0.925 0**	-0.836 0*	-0.903 0*	-0.761 9	-0.907 2*	0.756 0	0.943 1**	-0.861 4*	-0.475 6
全氮	0.776 5	0.809 5	0.651 3	0.835 7*	0.779 6	0.801 7	-0.501 9	-0.872 8*	0.752 1	0.591 0
全磷	-0.954 9**	-0.995 4**	-0.671 1	-0.969 6**	-0.903 5*	-0.999 2**	0.641 8	0.988 5**	-0.995 4**	-0.676 9
全钾	-0.897 9*	-0.936 7**	-0.561 6	-0.880 6*	-0.821 6*	-0.947 1**	0.620 8	0.899 5*	-0.972 3**	-0.610 5
碱解氮	0.898 7*	0.939 5**	0.541 9	0.872 1*	0.817 7*	0.951 0**	-0.636 2	-0.928 0**	0.979 6**	0.605 1
速效磷	0.954 0**	0.993 4**	0.682 9	0.974 5**	0.905 8*	0.996 5**	-0.632 8	-0.973 1**	0.990 3**	0.680 0
速效钾	-0.897 5*	-0.936 2**	-0.560 8	-0.879 9*	-0.821 0*	-0.946 7**	0.620 7	0.899 0*	-0.972 0**	-0.610 0
交换钙	-0.954 4**	-0.994 2**	-0.673 8	-0.970 6**	-0.903 1*	-0.998 0**	0.637 4	0.977 3**	-0.994 6**	-0.677 1
交换镁	-0.935 8**	-0.977 3**	-0.623 4	-0.934 7**	-0.874 5*	-0.983 7**	0.645 6	0.983 6**	-0.990 3**	-0.651 9

3 讨论

土壤类型的差异对作物生长和品质有重要影响^[26-29], 本研究发现紫色土与水稻土种植的辣椒维生素 C、游离氨基酸、辣椒素和挥发性物质组分有明显的差异。紫色土辣椒中维生素 C、辣椒素质量分数显著低于水稻土, 而游离氨基酸质量分数显著高于水稻土。紫色土辣椒中挥发性物质相对质量分数较高的是醛类、烯烃类、酯类、醇类, 水稻土辣椒中则是醇类、烯烃类、酚类; 紫色土辣椒具有更加浓厚的脂肪味、青嫩味, 水稻土辣椒的花、果香味主要由醇类物质组成, 而紫色土辣椒的花、果香味由醛类物质组成。

PLS-DA 分析是一种常用于处理分类和判别问题的统计方法, 孙国昊等^[30]利用该方法确定了菜籽油中的 13 个特征风味物质, 李云峰等^[31]利用该方法确定了甜玉米中的 10 个关键挥发性物质。本研究采用 PLS-DA 分析方法, 明确了 3-蒈烯、罗勒烯、芳樟醇等 22 种物质是导致紫色土、水稻土辣椒具有明显不同风味的关键物质。

不同类型土壤的肥力状况差异明显, 土壤肥力指标与作物品质有显著关系, 孙琛梅等^[32]发现土壤中氮、磷、钾、钙、镁对苹果的品质有重要影响; 段文学等^[33]发现甘薯块根的维生素 C、铁元素质量分数与土壤碱解氮、速效钾呈显著或极显著正相关, 维生素 C、铁锌元素质量分数与速效磷显著正相关。本研究分析了辣椒营养品质与土壤养分的相关性, 发现辣椒素、维生素 C 的质量分数与土壤碱解氮、速效磷极显著正相关, 与速效钾、交换钙、交换镁有极显著负相关关系, 游离氨基酸质量分数与土壤速效钾、交换钙、交换镁呈极显著正相关。Yuan 等^[34]认为氮对酯类和高级醇类有重要影响, 胡亚杰等^[35]发现不同氮磷钾配比的烤烟中新植二烯、二氢紫罗兰醇、二氢猕猴桃内酯等挥发性物质质量分数差异明显。本文分析土壤养分指

标与辣椒挥发性物质的相关关系,发现土壤有机质质量分数与酸类物质极显著正相关,与醇、酯、酮、酚4类物质呈显著或极显著负相关;土壤氮、磷、钾、钙、镁等养分指标与醛、酯2类物质的质量分数不相关;碱解氮、速效磷的质量分数与醇、烯烃、酮、芳香族、酚、烷烃6类物质呈显著正相关,与酸类物质呈显著负相关;速效钾、交换钙、交换镁与醇、烯烃、酮、芳香族、酚、烷烃6类物质呈显著负相关,与酸类呈显著正相关。上述研究结果将为紫色土、水稻土辣椒种植技术提供理论依据,为不同类型土壤与辣椒的营养、风味品质相关性研究提供参考。

4 结论

水稻土辣椒的辣椒素质量分数显著高于紫色土辣椒,紫色土辣椒的游离氨基酸质量分数显著高于水稻土辣椒;紫色土辣椒挥发性成分以醛、烯烃、酯、醇等4类物质为主,水稻土辣椒以醇、烯烃、酚等3类物质为主;3-蒈烯、罗勒烯、芳樟醇等22种物质是导致两种类型土壤上辣椒风味明显不同的关键物质。相关分析结果表明,土壤有机质与游离氨基酸、酸类呈显著或极显著正相关关系,与辣椒素、维生素C、醇类、酯类、酮类、酚类和烷烃类呈显著或极显著负相关关系;碱解氮、速效磷与辣椒素、维生素C、烯烃类、醇类、酮类、芳香族类、酚类、烷烃类呈显著或极显著正相关关系,与游离氨基酸、酸类呈极显著负相关关系;全磷、全钾、交换钙、交换镁与游离氨基酸、酸类呈显著或极显著正相关关系,与辣椒素、维生素C、烯烃类、醇类、酮类、芳香族类、酚类、烷烃类呈显著或极显著负相关关系。

参考文献:

- [1] 田红玉, 马变变, 孙宝国, 等. 辣椒挥发性成分研究进展 [J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(6): 31-39.
- [2] 刘哲文, 郭丹丹, 常旭虹, 等. 小麦产量和品质对不同类型土壤和施氮处理的响应 [J]. 麦类作物学报, 2022, 42(5): 623-630.
- [3] 郭丹丹, 刘亮, 常旭虹, 等. 剪叶对不同土壤类型及不同品种小麦产量和品质的影响 [J]. 核农学报, 2019, 33(7): 1432-1439.
- [4] 李洪亮, 孙玉友, 曲金玲, 等. 土壤类型对东北粳稻光合物质生产特征及稻米品质的影响 [J]. 中国水稻科学, 2013, 27(3): 287-296.
- [5] 张建, 杨瑞东, 陈蓉, 等. 贵州遵义辣椒矿质元素含量与其品质相关性分析 [J]. 食品科学, 2018, 39(10): 215-221.
- [6] 管西林, 王孝忠, 刘彬, 等. 三类土壤不同酰硝比供应下的辣椒产量、品质和氮素损失 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 730-739.
- [7] 王绍祥, 李云, 赵水灵, 等. 不同土壤类型与丘北辣椒产量及品质的相关性 [J]. 辣椒杂志, 2016, 14(1): 43-47.
- [8] MECKELMANN S W, RIEGEL D W, VAN ZONNEVELD M, et al. Capsaicinoids, Flavonoids, Tocopherols, Antioxidant Capacity and Color Attributes in 23 Native Peruvian Chili Peppers (*Capsicum* spp.) Grown in Three Different Locations [J]. European Food Research and Technology, 2015, 240(2): 273-283.
- [9] BECERRA-MARTÍNEZ E, FLORENTINO-RAMOS E, PÉREZ-HERNÁNDEZ N, et al. 1H NMR-Based Metabolomic Fingerprinting to Determine Metabolite Levels in Serrano Peppers (*Capsicum Annum* L.) Grown in Two Different Regions [J]. Food Research International, 2017, 102: 163-170.
- [10] 喻华, 秦鱼生, 冯文强, 等. 氮磷钾配施对四川紫色丘陵区干制辣椒产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2013(4): 66-70.
- [11] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [12] 邵金良, 黎其万, 董宝生, 等. 苛三酮比色法测定茶叶中游离氨基酸总量 [J]. 中国食品添加剂, 2008(2): 162-165.
- [13] 王燕, 夏延斌, 熊科, 等. 高效液相色谱法-紫外检测器测定辣椒制品中辣椒素的含量 [J]. 食品科学, 2006, 27(9): 193-196.
- [14] 王雪雅, 陆宽, 孙小静, 等. 贵州不同辣椒品种的品质及挥发性成分分析 [J]. 食品科学, 2018, 39(4): 212-218.

- [15] 高成安, 毛奇, 万红建, 等. 不同贮藏温度对绿熟期辣椒果实品质的影响 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(2): 226-235.
- [16] 史建硕, 郭丽, 王丽英, 等. 优化配方施肥对华北地区露地辣椒产量、品质和养分吸收利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(2): 86-92.
- [17] 张晓芬, 陈斌, 冯红军, 等. 辣椒果实 Vc 含量的变化规律与遗传分析 [J]. 核农学报, 2015, 29(12): 2287-2293.
- [18] WANG Y J, YANG C X, LI S H, et al. Volatile Characteristics of 50 Peaches and Nectarines Evaluated by HP-SPME with GC-MS [J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 356-364.
- [19] 朱琳琳, 周婉飞, 宁璇, 等. 不同桂花品种游离态香气物质分析 [J]. 园艺学报, 2022, 49(11): 2395-2406.
- [20] 钱蕾, 杨程, 侯亚龙. 基于主成分分析和聚类分析讨论不同桂花浸膏的香气品质 [J]. 香料香精化妆品, 2021(5): 20-27.
- [21] 卢路路, 樊怡灵, 邓珂, 等. 不同品种和花期栀子花挥发性物质的主成分和聚类分析 [J]. 核农学报, 2021, 35(7): 1601-1608.
- [22] 刘艳敏, 吴拥军, 王亚娟, 等. 贵州油辣椒挥发性风味物质分析 [J]. 食品科学, 2013, 34(20): 221-227.
- [23] 金友兰, 黄甜, 蒋容港, 等. 不同类型发花砖茶特征香气成分研究 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(3): 188-196.
- [24] 刘晔, 葛丽琴, 王远兴. 3个产地不同等级庐山云雾茶挥发性成分主成分分析 [J]. 食品科学, 2018, 39(10): 206-214.
- [25] 方冠宇, 蒋予箭, 穆晓静, 等. 浙江玫瑰醋不同发酵阶段特征性香气成分的确定 [J]. 食品科学, 2020, 41(8): 234-242.
- [26] 杨仕曦, 陈益, 杨东, 等. 不同氮钾肥配施对两种紫色土白菜产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 115-121.
- [27] 司玉坤. 不同土壤类型下氮磷肥类型对小麦生长发育的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
- [28] 高雅晓玲. 不同土壤类型中大豆的产量与品质对增温的响应 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [29] WANG S Y, ZHAO F, WU W X, et al. Comparison of Volatiles in Different Jasmine Tea Grade Samples Using Electronic Nose and Automatic Thermal Desorption-Gas Chromatography-Mass Spectrometry Followed by Multivariate Statistical Analysis [J]. Molecules, 2020, 25(2): 380.
- [30] 孙国昊, 刘玉兰, 连四超, 等. 油菜籽品种对浓香菜籽油风味及综合品质的影响 [J]. 食品科学, 2022, 43(8): 190-197.
- [31] 李云峰, 范競升, 陈冰琳, 等. 3个甜玉米品种在不同储藏条件下可溶性固形物含量及挥发性风味成分变化 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(3): 33-44.
- [32] 孙琛梅, 程冬冬, 杨越超, 等. 土壤肥力质量与苹果生长、产量及品质关系的研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(2): 207-215.
- [33] 段文学, 张海燕, 解备涛, 等. 化肥和生物有机肥配施对鲜食型甘薯块根产量、品质及土壤肥力的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 1971-1980.
- [34] YUAN F, SCHREINER R P, OSBORNE J, et al. Effects of Soil NPK Supply on Pinot Noir Wine Phenolics and Aroma Composition [J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2018, 69(4): 371-385.
- [35] 胡亚杰, 尹永强, 农李政, 等. 氮磷钾配施对龙岸烤烟中性香味成分及质量的影响 [J]. 山东农业科学, 2015, 47(12): 58-62.

责任编辑 孙文静
崔玉洁