

邱爽,刘畅,谢美林,等.不同产区‘红灯’樱桃香气成分与产地生态因子相关性分析[J].食品工业科技,2021,42(11):240-247. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020070389

QIU Shuang, LIU Chang, XIE Meilin, et al. Correlation Analysis between Aroma Components and Ecological Factors of ‘Hongdeng’ Cherry in Different Producing Areas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 240-247. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020070389

· 分析检测 ·

不同产区‘红灯’樱桃香气成分与产地生态因子相关性分析

邱爽¹,刘畅¹,谢美林¹,杨丽丽¹,魏阳吉^{2*},李景明^{1*}

(1.中国农业大学食品科学与营养工程学院,北京 100083;

2.中化现代农业有限公司,北京 100031)

摘要:为探究产地生态因子对樱桃果实香气的影响,本研究以我国 5 个不同生态条件地区的同一品种(‘红灯’)樱桃为实验材料,采用气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对 5 个樱桃样品进行香气特征分析,揭示不同产区‘红灯’樱桃香气差异,并采用主成分分析(principal component analysis, PCA)、Pearson 相关性分析和冗余分析(Redundancy analysis, RDA)对 GC-MS 结果与产地生态因子进行关联性分析,明确影响不同产区樱桃香气成分差异的具体环境因素。结果表明,不同产地‘红灯’樱桃香气物质在种类和含量上都有一定的差异,山西‘红灯’樱桃香气总量最高,特别是醛类香气占其香气总量的 95% 以上。陕西‘红灯’樱桃香气总量最低,仅为 23493.07 $\mu\text{g/L}$ 。而山东‘红灯’樱桃香气种类最为丰富,有 8 种特有香气物质。产地生态因子,特别是年积温、年日照时数和年降水量可以对樱桃香气产生显著性影响,其中年日照时数与 75% 的香气物质呈现正相关关系,与酮类香气($R^2=0.890$)呈显著正相关($P<0.05$),年积温与 84.4% 的香气呈现正相关,但与酯类香气($R^2=-0.979$)呈极显著负相关($P<0.01$),而年降水量与 84.4% 的香气物质呈现负相关关系。研究结果有助于更好地理解香气物质代谢和生态因素的内在关系,对揭示环境对水果香气的影响具有重要的意义。

关键词:‘红灯’樱桃,香气物质,气相色谱-质谱法(GC-MS),产地生态因子,相关性分析

中图分类号:TS207.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2021)11-0240-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020070389

Correlation Analysis between Aroma Components and Ecological Factors of ‘Hongdeng’ Cherry in Different Producing Areas

QIU Shuang¹, LIU Chang¹, XIE Meilin¹, YANG Lili¹, WEI Yangji^{2*}, LI Jingming^{1*}

(1.College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2.Sinochem Agriculture Holdings, Beijing 100031, China)

Abstract: In order to explore the effect of ecological factors on the aroma of cherry fruit, the aroma differences of ‘Hongdeng’ cherry from different ecological conditions in China were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and principal component analysis (PCA). Pearson correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were used to analyze the correlation between the aroma and ecological factors of habitats. The results showed different results of types and contents of volatile compounds in different regions. ‘Hongdeng’ cherry in Shanxi had the highest amount of volatile compounds. Especially, more than 95% of the total content of volatile compounds were aldehydes. The total content of volatile compounds of ‘Hongdeng’ cherry in Shaanxi was the lowest, only 23493.07 $\mu\text{g/L}$. Among them, eight kinds of characteristic volatile compounds were found in Shandong ‘Hongdeng’ cherry. Ecological factors, especially annual accumulated temperature, annual sunshine hours and annual precipitation, had significant effects on cherry aroma. The

收稿日期: 2020-07-31

作者简介: 邱爽(1997-),女,硕士研究生,研究方向:食品风味,E-mail: qiushuang0614@163.com。

* 通信作者: 魏阳吉(1986-),女,博士,研究方向:食品风味,E-mail: weiyangji@sinochem.com。

李景明(1969-),男,博士,教授,研究方向:食品风味、天然产物开发与利用,E-mail: lijingming@can.edu.cn。

annual sunshine hours was positively correlated to 75% volatile compounds, especially ketone aroma ($R^2=0.89$, $P<0.05$). 84.4% volatile compounds showed positive correlation with annual accumulated temperature and negative correlation with annual precipitation. However, ester aroma showed a significantly negative correlation ($R^2=-0.979$) with annual accumulated temperature ($P<0.01$). The results conduce to further understand the relationship between metabolism synthesis of aroma substances and ecological factors, and it is significant for revealing the influence of environment on fruit aroma substance.

Key words: ‘Hongdeng’ cherry; aroma substances; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); environmental ecological factors; correlation analysis

食品香气即食品风味物质中一小部分具有致香活性的物质^[1],虽然它们仅占水果鲜重的 0.01%~0.001%,但这些物质是影响果实品质的重要因素,也是吸引消费者和巩固市场的关键^[2-3]。香气被认为是植物相互交流和与环境相互作用的重要物质。果实香气的形成受内在品种因素、外在环境因素(温度、光照、湿度等)以及人为因素(栽培及采后管理等)的共同影响^[4],而在这众多影响因素中,环境因素的影响最大^[5-6]。Gachons 等^[7]研究发现长相思葡萄轻度缺水时的香气物质含量最高,但严重缺水会限制香气物质的积累。Deluc 等^[8]对赤霞珠和霞多丽葡萄的转录和代谢产物综合分析结果也同样表明长期和季节性缺水会影响葡萄果实的香气。光照也是影响果实香气合成的重要环境因子,如遮蔽光照可以通过抑制香气合成途径从而显著降低香气物质的含量^[9-10],紫外(UV-C)处理可以增加香气合成过程中关键酶的活性促进酯类香气的生成^[11-12]。赵胜亭^[13]研究香气含量与生态因子的相关性发现年积温、年降水量与苹果香气含量呈正相关关系,而海拔则与苹果的香气含量呈负相关。可见产地生态因子对果实香气的组成有着极其重要的影响。

樱桃(Cherry)是蔷薇科,李属类果实,在世界各地广泛种植^[14]。樱桃中含有丰富的营养成分,具有极高的营养价值^[15-17]。樱桃香气浓郁,其香气已被国内外大量研究和报道^[18-20]。每个地域都具有独特的生态条件,即便同一果实品种在不同地区栽培,所产生的香气物质也有很大的差异^[21-22],而有关不同产区樱桃香气的研究还未见报道,更未涉及到特定地域精确环境因子对樱桃果实香气的影响。

樱桃的花期到果实成熟期一般为 3 月~5 月,营养成分的积累也受到上一年气候条件的影响。基于以上研究背景,本研究对 5 个产区‘红灯’樱桃样品进行分析,包括西北地区(青海省、陕西省)、西南地区

(四川省)、华北地区(山西省)、华东地区(山东省),跨度基本包括我国东、南、西、北,搜集 5 个产区 2018 年 6 月~2019 年 5 月的气象情况,并利用 GC-MS 技术对‘红灯’樱桃香气物质进行分析,通过主成分分析对 5 个产区‘红灯’樱桃的香气物质进行了区分,最后借助 Pearson 相关性分析及冗余分析等数学分析手段系统探讨了与樱桃香气物质的形成起显著影响的环境因子,旨在为选择合适的樱桃栽培地域提供理论参考,以提高樱桃的品种品质。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

5 个产区‘红灯’樱桃 产地信息见表 1;正构烷烃 $C_7\sim C_{40}$ 、甲醇、乙醇 色谱纯,上海安普(Anpel)实验科技有限公司;无水乙醇、碳酸钠、氯化钠、PVPP、D-葡萄糖酸内酯 分析纯,北京百灵威科技有限公司;2-壬酮 色谱纯,美国 Sigma-Aldrich 公司。

BSA124S-CW 型分析天平 德国塞利多斯公司;RZ-708H 型干磨料理机 荣事达公司;GL-20G-II 型高速冷冻离心机 上海安亭科学仪器厂;Aglient 7890B 型色谱仪、Aglient 5977B 型质谱、HP-5MS UI 30×0.25 mm×0.25 μm 毛细管色谱柱 美国 Agilent 公司;聚二甲基硅氧烷/碳筛/二乙烯苯(DVB/CAR/PDMS)SPME 萃取头 美国 Supelco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的采集 樱桃样品采用随机取样法采样,随机选择 6 株生长一致的樱桃植株,按照商业成熟标准,从样株外围随机采果 5 kg 后用保鲜盒盛装,用带有冰袋的保温箱 24 h 内运输至实验室。挑选 1 kg 健康、大小和成熟度一致的果实,液氮快速冷冻后于 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 储存,待分析。提取 5 个采样点的气象资料

表 1 ‘红灯’樱桃样品信息汇总

Table 1 Summary of ‘Hongdeng’ cherry sample information

地点	品种	经纬度	海拔(m)	年日照时数(h)	年降水量(mm)	年积温($^\circ\text{C}$)
青海乐都	红灯	102°35'34"E,36°25'46"N	1941	2206.2	530	2850.4
四川越西	红灯	102°28'27"E,28°37'17"N	1990	1677.9	1198.9	5031.4
山西临猗	红灯	110°31'58"E,35°2.4'27"N	373	1998.4	373.2	5471.1
陕西耀州	红灯	108°55'10"E,34°54'8.3"N	731	1651.8	377.9	4888.6
山东福山	红灯	121°16'0.3"E,37°26'38"N	17	2614.2	514.5	4930.9

(包括年日照时数、大于 0 ℃ 年积温、年降水量)及地形资料(海拔高度),气象数据来自中国气象科学数据中心网(<http://data.cma.cn/>)。

1.2.2 样品制备 参照 Chen 等^[23]的方法操作:取出存于-40 ℃ 冰箱中的樱桃若干,液氮环境下去核初破碎,称取约 30 g 樱桃,依次加入 0.60 g PVPP, 0.30 g D-葡萄糖酸内酯后破碎成粉末,迅速转移至 50 mL 离心管中,于 4 ℃ 冰箱保存 4 h。4 h 后取出样品于 4 ℃、8000 r/min 下离心 15 min,取上清液,命名为澄清樱桃汁备用。

1.2.3 顶空固相微萃取(HS-SPME) 参考 Villière 等^[24]的方法并加以修改。取 5 mL 澄清樱桃汁,加入 10 μL 浓度为 8.22 mg/L 的 2-壬酮、1 g NaCl 和磁力转子于 20 mL 顶空瓶中,加盖密封后置于磁力搅拌台上,40 ℃ 下平衡 30 min,待平衡后将老化后的 SPME 萃取头插入顶空瓶,萃取头距液面 1 cm,40 ℃ 下吸附 30 min,吸附结束拔出萃取头,插入 GC-MS 进样口,250 ℃ 下热解析 8 min。

1.2.4 GC-MS 分析 参考 Wen 等^[18]的方法并加以修改。樱桃香气物质检测的色谱条件:载气为高纯氦气(He>99.999%),流速 1 mL/min,不分流进样。进样口温度为 250 ℃,热解析时间为 8 min。升温程序为:40 ℃ 保持 3 min,然后以 5 ℃/min 的速度升温到 85 ℃,保持 2 min,然后以 2 ℃/min 的速度升温到 130 ℃,保持 2 min,再以 6 ℃/min 的速度升温到 210 ℃,保持 2 min,以 10 ℃/min 的速度升温到 250 ℃,保持 2 min。质谱电离方式为 EI,离子能量 70 eV,扫描范围为 40~450 amu。

1.2.5 挥发性成分的定性、定量分析 GC-MS 实验结果由 NIST17 数据库的相似度检索并结合参考文献中相应化合物的保留指数双重定性。将正构烷烃(C₇-C₄₀)标准品直接液体上样分析,计算保留指数,通过与 NIST17 数据库参考文献中相应物质的保留指数进行对比,对样品中的香气成分进行定性分析。保留指数计算公式如式(1):

$$RI = 100 \times \left[n + \frac{t(x) - t(n)}{t(n+1) - t(n)} \right] \quad \text{式(1)}$$

式中: $t(x)$ 、 $t(n)$ 、 $t(n+1)$ 分别为待测物 x 、具有 n 个、 $n+1$ 个碳原子正构烷烃的保留时间。

利用内标法对香气物质进行定量,计算公式如式(2):

$$C_x = \frac{M_x}{M_y} \times C_y \quad \text{式(2)}$$

式中: C_x 和 M_x 分别为待测香气物质的浓度(mg/L)和峰面积; C_y 和 M_y 分别为内标物(2-壬酮)的浓度(mg/L)和峰面积。

1.2.6 相关性分析 Pearson 相关性分析常被用于分析两个变量 X 和 Y 之间的关系密切程度,可以评估二者之间的线性关系。对于变量 $X=[x_1, x_2, \dots,$

$x_n]$ T 和 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ T,其相关系数 r 的取值为 $[-1,1]$,接近 0 代表无相关性,接近 1 或-1 代表强相关性。计算公式如式(3)^[25]:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left[\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad \text{式(3)}$$

式中: \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为产地气象资料变量和 GC-MS 得到香气浓度变量的平均值。

1.3 数据分析

采用 SPSS 24.0 进行数据的统计学分析;主成分分析、Pearson 相关性分析及可视化由 R(Rx64 3.6.3) 软件分析绘制;冗余分析由 Canoco 5 软件分析。

2 结果与分析

2.1 GC-MS 分析结果

通过 GC-MS 对 5 个不同产地‘红灯’樱桃中的香气物质进行定性、定量分析,共鉴定出 32 种香气成分,大多数物质在先前的文献已被报道^[18-19]。其中醛类 9 种,萜烯类 7 种,酯类 6 种,醇类 5 种,酮类 4 种,酸类种类较少,仅有 1 种。每种樱桃香气物质的平均质量浓度见表 2。

不同产地樱桃样品间香气物质的含量和种类均存在差异,利用 R 软件对香气物质在种类上的差异可视化绘制韦恩图,如图 1,图中不同数字表示 5 个产地‘红灯’樱桃特有或共有的香气物质种类数,可得所有樱桃样品共有的香气物质为 11 种。山东福山‘红灯’樱桃所含香气种类最丰富,共鉴定出 22 种化合物,其中 8 种为山东‘红灯’樱桃特有的香气物质。青海和陕西‘红灯’樱桃特有的香气物质均为一种醛类和一种酯类,青海‘红灯’特有香气为月桂醛和 4-己烯-1-醇乙酸酯,其中 4-己烯-1-醇乙酸酯含量较高,占香气总量的 18.71%。陕西‘红灯’特有香气为(E,E)-2,4-庚二烯醛和苯甲酸乙酯,但含量均较低。山西‘红灯’樱桃香气种类含量最少,仅有 15 种,无特有香气物质。

图 2 展示了不同产地樱桃香气含量的差异,5 个樱桃样品中山西‘红灯’樱桃香气总量最高(65198.10 μg/L),陕西‘红灯’樱桃香气总量最低(23493.07 μg/L)。

醛类物质是樱桃香气中最主要的组分,这在先前的研究报道中已得到了证实^[28]。C₆ 醛类和芳香醛类,如己醛(青绿香气)、(E)-2-己烯醛(苹果和青绿味)、苯甲醛(苦杏仁、樱桃、坚果味)是‘红灯’樱桃的重要香气物质,在所有产地‘红灯’樱桃中均含量较高,这与 Zhang 等^[29] 先前对‘红灯’樱桃的香气研究结果一致。此外,壬醛、癸醛也是所有樱桃样品共有的醛类香气,具有一定的青绿和柑橘味^[19]。山西‘红灯’樱桃含有极高的醛类香气,主要是己醛和(E)-2-己烯醛,分别占其香气总量的 45.96% 和 47.37%,这也是导致山西‘红灯’香气含量最高的主要原因。

醇类、酮类、萜烯类和酯类香气含量远低于醛类

表 2 樱桃果实香气物质质量浓度
Table 2 Concentration of aroma compounds in cherry fruit

序号	名称	香气成分质量浓度(μg/L)					定性方式	香气描述*
		青海乐都	四川越西	山西临猗	陕西耀州	山东福山		
	醇类	558.38	1394.39	688.84	532.61	1476.54		
1	3-己烯醇	nd	912.47	nd	nd	nd	MS+RI	青绿味、脂肪味
2	2-乙基-1-己醇	301.02	203.8	407.1	138.15	530.12	MS+RI	花香
3	苯甲醇	nd	24.74	19.48	391.05	368.06	MS+RI	果香、花香
4	DL-薄荷醇	257.37	253.38	262.26	3.41	499.41	MS+RI	薄荷
5	2-(苯亚基)辛醇	nd	nd	nd	nd	78.96	MS+RI	花香
	醛类	22312.7	25305.81	62500.44	22310.85	32371.33		
6	1-己醛	9758.06	13894.63	29964.96	11499.8	10863.26	MS+RI	青绿、木香、蔬菜、水果
7	(E)-2-己烯醛	11604.16	10765.39	30884.05	9500.09	16837.31	MS+RI	苹果果香、青绿味
8	苯甲醛	474.89	324.82	969.93	988.34	3767.45	MS+RI	苦杏仁、樱桃、坚果香气
9	2,4-庚二烯醛(E,E)-	nd	nd	nd	21.7	nd	MS+RI	-
10	辛醛	36.2	nd	nd	19.01	nd	MS+RI	青绿、脂肪、水果气味
11	苯乙醛	nd	17.97	nd	14.4	456.96	MS+RI	玫瑰、蜂蜜、土壤香、风信子香
12	壬醛	217.91	201.87	370.28	188.74	282.69	MS+RI	青绿味、柑橘味
13	癸醛	206.23	101.13	311.24	78.76	163.67	MS+RI	青绿味、柑橘味
14	月桂醛	15.25	nd	nd	nd	nd	MS+RI	蜡香、青绿、果、木、柑橘香
	酯类	5874.91	51.32	92.44	152.91	584.1		
15	4-己烯-1-醇乙酸酯	5823.12	nd	nd	nd	nd	MS+RI	-
16	苯甲酸甲酯	nd	nd	nd	nd	50.31	MS+RI	花香、蜂蜜、果香
17	苯甲酸乙酯	nd	nd	nd	88.24	nd	MS+RI	樱桃、葡萄香气
18	乙酸香叶酯	nd	nd	nd	44.18	105.4	MS+RI	玫瑰、薰衣草香
19	苯甲酸2-乙基己酯	51.79	51.32	92.44	20.49	257.8	MS+RI	-
20	苯甲酸苄酯	nd	nd	nd	nd	170.59	MS+RI	清淡的类似杏仁的香气、辣味
	酮类	1381.37	460.8	250.82	204.66	1669.57		
21	1-戊酮, 1-苯基-	nd	nd	nd	nd	112.99	MS+RI	-
22	6-甲基-5-庚烯-2-酮	69.53	73.39	103.39	65.97	nd	MS+RI	蜂蜜、花香
23	脱氢二氢-β-紫罗兰酮	75.31	nd	nd	12.48	nd	MS+RI	-
24	香叶基丙酮	1236.53	387.41	147.43	126.21	1556.58	MS+RI	青绿、果、酚、木、水果香
	酸类	0	0	0	0	93.21		
25	壬酸	nd	nd	nd	nd	93.21	MS+RI	脂肪、椰子香气
	萜烯类	991.98	868.12	1665.56	292.04	1737.36		
26	β-月桂烯	nd	nd	nd	nd	84.46	MS+RI	果香、葡萄、酒香
27	里那醇	606.72	196.85	947.04	187.98	907.02	MS+RI	薰衣草、青香、柑橘
28	α-松油醇	111.42	94.71	341.19	34.74	287.23	MS+RI	丁香、花香、百合香
29	香叶醇	nd	nd	nd	nd	272.85	MS+RI	花、木、青绿、柑橘、柠檬香
30	橙花醇	178.75	276.43	236.88	55.03	nd	MS+RI	甜、青绿、果、醛香
31	β-大马士酮	95.08	300.13	140.45	14.29	nd	MS+RI	蜂蜜、花香、煮苹果
32	雪松醇	nd	nd	nd	nd	185.8	MS+RI	淡雪松木香
	合计	31119.34	28080.44	65198.1	23493.07	37932.11		

注: 香气描述*主要参考Chen等^[26]和Gemert等^[27]的结果。

香气,且在 5 个产区樱桃样品中含量差异较大。山东‘红灯’樱桃醇类香气含量最高,其次是四川‘红灯’樱桃,两产区‘红灯’樱桃醇类香气含量相差不大,值得注意的是,四川‘红灯’樱桃特有的醇类香气——“3-己烯醇”含量较高,占其醇类香气总量的 60% 以上,具有较强的青绿味和脂肪味。山东‘红灯’樱桃酮类香气含量仍最高,青海‘红灯’樱桃次之,而其余 3 个产区‘红灯’樱桃酮类香气含量较低,均不及山东和青海‘红灯’樱桃酮类香气的一半。对于萜烯类香气,山东和山西‘红灯’樱桃含量较高,陕西‘红灯’樱桃

萜烯类含量最低,仅为 292.04 μg/L,其余 4 种樱桃萜烯类香气含量达到其 2.97~5.95 倍。青海‘红灯’樱桃酯类香气含量最高(5874.91 μg/L),酯类香气占其香气总量的 18.88%,而其余产区‘红灯’樱桃酯类香气含量相对较低,主要因为青海‘红灯’樱桃具有极高的 4-己烯-1-醇乙酸酯,占其酯类香气的 99.12%。就酸类香气而言,仅在山东‘红灯’樱桃中检测出一种酸类物质壬酸,且含量极低。由此可以看出,山东‘红灯’樱桃醇类、酮类、萜烯类和酸类香气含量均为最高,但因山东‘红灯’樱桃中醛类香气含量与山西‘红灯’樱

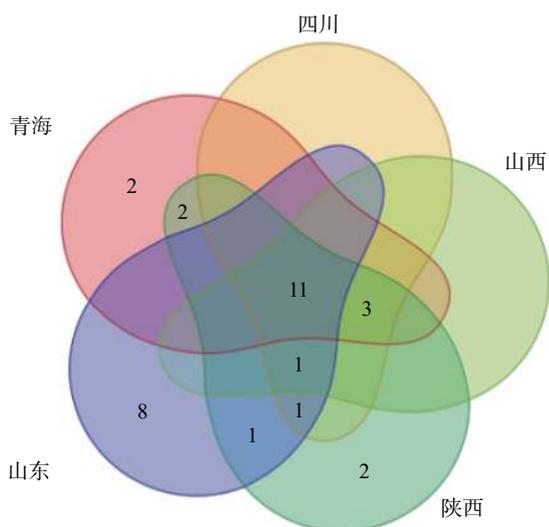


图1 不同产地‘红灯’樱桃样品香气种类差异图
Fig.1 Different aroma types of ‘Hongdeng’ cherry from different regions

桃差距较大,使得山东‘红灯’樱桃在5个产区中香气总量排名第二。

2.2 PCA 分析结果

为进一步从整体上反应不同产地‘红灯’樱桃香气成分的差异,以5个产地‘红灯’樱桃样品为分析对象,采用主成分分析对32种香气成分进行分析,结果如图3(a,b)所示。从图3可以看出,前两个主成分提取了总方差的74.9%,可解释样本的大部分信息。由主成分得分图(图3a)可以看出不同产地的樱桃分布在不同象限内。山西和山东产樱桃的离散度

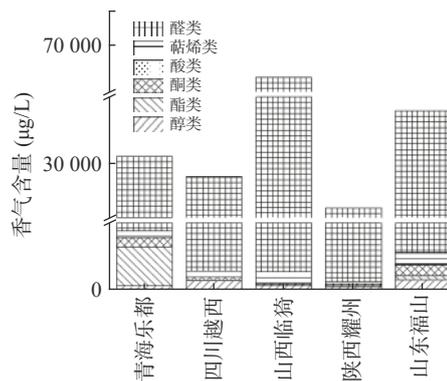


图2 不同产地‘红灯’樱桃香气含量差异图
Fig.2 Difference of aroma content of ‘Hongdeng’ cherry from different regions

较大,分别位于第二和第四象限内,表明二者对主成分贡献较高。四川产樱桃与青海产樱桃离散度较低,说明二者香气结构较为相似,可聚为一类,但对主成分的贡献率不高。陕西产樱桃位于第三象限内,对主成分贡献率较高,与第一主成分和第二主成分均呈负相关关系。

进一步分析后得到PCA载荷图(图3b)。cos2值用来衡量某变量的有用程度,其值越大,该主成分贡献值越大,此时变量在相关曲线图中位于圆的边缘。同时点的大小及颜色的深浅也代表了不同变量对主成分的贡献程度。山西产樱桃与1-己醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、橙花醇等香气物质显著相关,四川、青海产樱桃与3-己烯醇、月桂醛、4-己烯-1-醇乙酸酯、脱氢二氢-β-紫罗兰酮相关性较强,而陕西产樱桃

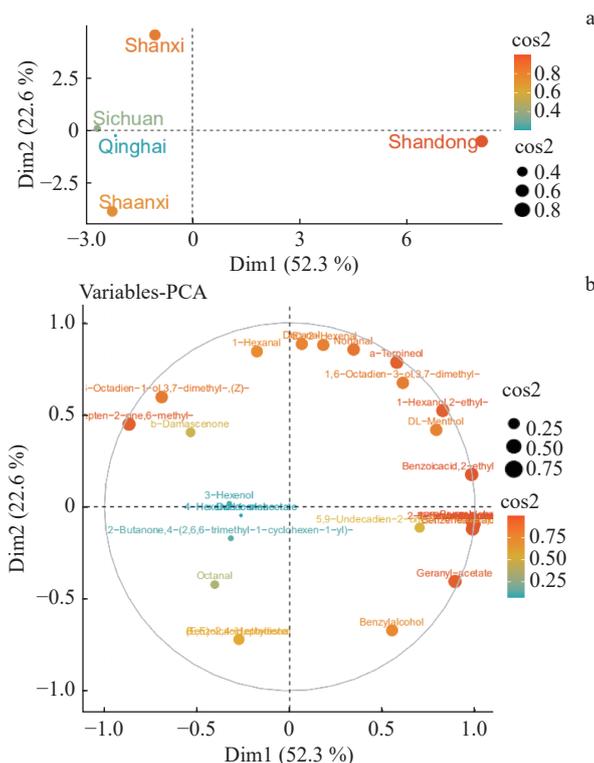


图3 不同产地‘红灯’樱桃香气的主成分得分图(a)与载荷图(b)

Fig.3 The PCA scores plot (a) and loading plot (b) of volatile compounds in ‘Hongdeng’ cherry in different regions

仅与(E,E)-2,4-庚二烯醛、苯甲酸乙酯显著相关。与山东产‘红灯’樱桃密切相关的香气物质较多,主要是萜烯类香气和山东产樱桃特有的酸类香气壬酸。可见不同产地的‘红灯’樱桃香气成分有很大的差异,因此下文对樱桃香气物质与一系列生态因子进行了相关性分析,以期观察生态因子对樱桃香气的影响。

2.3 相关性分析结果

为确定产地生态因子与香气物质间的关系,对 GC-MS 分析结果中不同种类香气物质的含量数据和各生态因子数据进行 Pearson 线性相关分析,结果见表 3。由表 3 可以发现年日照时数与酮类香气显著相关($R^2=0.890$)($P<0.05$),与酸类($R^2=0.817$)、萜烯类($R^2=0.752$)香气相关性较强。年积温与酯类香气达到极显著负相关($R^2=-0.979$)($P<0.05$)。从上文图 2 中得知山东产樱桃含有最高的酮类、醇类、酸类、萜烯类香气,究其原因可能是因为山东地区的年日照时数最高,从而促进了香气物质的积累。青海产樱桃的酯类香气含量极高,但年积温最低,表明随着年积温

的升高,樱桃酯类香气物质含量反而呈现下降趋势。醇类、醛类香气含量受产地生态因子影响较小,海拔对‘红灯’樱桃果实香气物质含量无较大影响。

进一步对每种香气物质相对含量与各生态因子间相关性进行分析,结果见图 4,共有 7 种香气物质与生态因子数据达到显著($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$)。

虽然海拔与各香气物质含量相关性不强,但海拔高度直接关系到果实生长的温度、湿度和其他影响果实成熟的环境因素。由图 4 可知,海拔与 75% 香气物质均呈现负相关关系,仅与 3-己烯醇、月桂醛、4-己烯-1-醇乙酸酯、橙花醇、 β -大马士酮等 8 种香气物质呈现一定的正相关,这与 Yue 等^[30]研究发现随着海拔的升高,葡萄果实总挥发物的浓度降低的研究结果相一致。年降水量与 84.4% 的香气物质呈现负相关关系,但与 3-己烯醇($R^2=0.977$)呈现显著正相关,与 β -大马士酮($R^2=0.834$)正相关性较强。先前的研究表明限制供水分能够增加果实香气物质的含量^[31-32],特别是水分不足会增加脂氧合酶(LOX)和氢过氧化物裂解酶(HPL)的转录丰度,从而产生更高水平的 C6 醛^[8],本文显示 1-己醛($R^2=-0.222$)、(E)-2-己烯醛($R^2=-0.399$)含量与降水量呈现负相关关系,研究结果支持这一结论,但并不显著。关于年降水量与果实香气间的关系,本研究与赵胜亭^[13]研究发现的年降水量与苹果香气成分含量呈正相关关系的结论稍有出入,分析原因可能是不同果实香气物质的形成与代谢存在一定的差异。年积温与 84.4% 的香气物质呈现正相关,与 5 种香气物质呈现负相关关系,其中与辛醛($R^2=-0.895$)达到显著负相关($P<0.05$),与月桂醛($R^2=-0.974$)、4-己烯-1-

表 3 樱桃香气种类与产地生态因子间 Pearson 相关系数表
Table 3 Pearson correlation coefficient between cherry aroma species and environmental ecological factors

	海拔(m)	年日照时数(h)	年降水量(mm)	年积温(°C)
醇类	-0.1	0.333	0.626	0.37
酯类	0.525	0.32	-0.137	-0.979**
酮类	-0.056	0.890*	-0.066	-0.545
酸类	-0.612	0.817	-0.137	0.162
萜烯类	-0.502	0.752	-0.163	0.227
醛类	-0.529	0.131	-0.348	0.542

注: **在0.01级别(双尾),相关性显著; *在0.05级别(双尾),相关性显著。图4同。

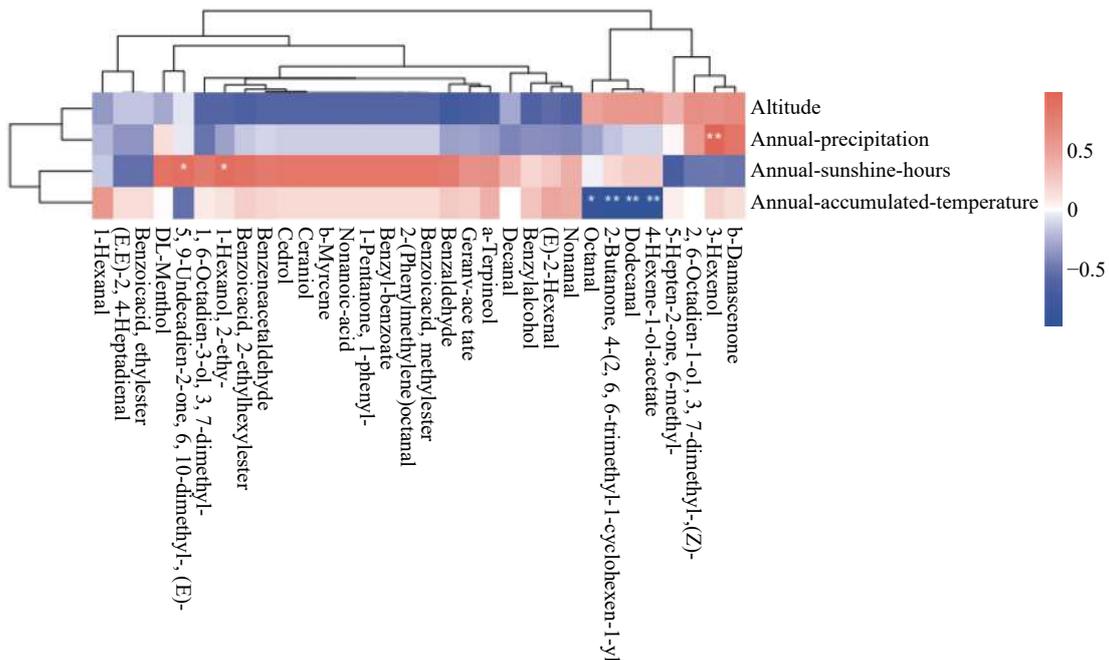


图 4 产地生态因子与 GC-MS 分析结果之间的相关性热图

Fig.4 Heatmap cluster of the correlation coefficients between ecological factors and volatile compounds

- [4] Hadi M A, Zhang F J, Wu F F, et al. Advances in fruit aroma volatile research[J]. *Molecules*, 2013, 18(7): 8200–8229.
- [5] Van Leeuwen C, Friant P, Chone X, et al. Influence of climate, soil, and cultivar on terroir[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2004, 55(3): 207–217.
- [6] 秦欢. 川渝地区‘阳光玫瑰’果实主要香气成分分析及部分品质与气候因子相关性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [7] Des Gachons C P, Van Leeuwen C, Tominaga T, et al. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L cv Sauvignon blanc in field conditions[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2005, 85(1): 73–85.
- [8] Deluc L G, Quilici D R, Decendit A, et al. Water deficit alters differentially metabolic pathways affecting important flavor and quality traits in grape berries of Cabernet Sauvignon and Chardonnay[J]. *BMC Genomics*, 2009, 10(1): 212–212.
- [9] Ma Z H, Yang S J, Mao J, et al. Effects of shading on the synthesis of volatile organic compounds in ‘Marselan’ grape berries (*Vitis vinifera* L.)[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2020.
- [10] 冯帅帅, 闫成太, 张天皓, 等. 套袋对‘瑞雪’苹果香气成分的影响及相关基因表达分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(4): 185–192.
- [11] Severo J, De Oliveira I R, Tiecher A, et al. Postharvest UV-C treatment increases bioactive, ester volatile compounds and a putative allergenic protein in strawberry[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 685–692.
- [12] Zhou D D, Sun Y, Li M Y, et al. Postharvest hot air and UV-C treatments enhance aroma-related volatiles by simulating the lipoxygenase pathway in peaches during cold storage[J]. *Food Chemistry*, 2019: 294–303.
- [13] 赵胜亭. 基于 GIS 的山区气候因子空间模拟及苹果适宜性评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [14] Chockchaisawasdee S, Golding J B, Vuong Q V, et al. Sweet cherry: Composition, postharvest preservation, processing and trends for its future use[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2016: 72–83.
- [15] Vavoura M V, Badeka A, Kontakos S, et al. Characterization of four popular sweet cherry cultivars grown in Greece by volatile compound and physicochemical data analysis and sensory evaluation[J]. *Molecules*, 2015, 20(2): 1922–1940.
- [16] Bastos C, Barros L, Duenas M, et al. Chemical characterisation and bioactive properties of *Prunus avium* L.: The widely studied fruits and the unexplored stems[J]. *Food Chemistry*, 2015, 173(15): 1045–1053.
- [17] Noratto G D, Lage N N, Chew B P, et al. Non-anthocyanin phenolics in cherry (*Prunus avium* L.) modulate IL-6, liver lipids and expression of PPAR δ and LXRs in obese diabetic (db/db) mice[J]. *Food Chemistry*, 2018, 266(15): 405–414.
- [18] Wen Y Q, He F, Zhu B Q, et al. Free and glycosidically bound aroma compounds in cherry (*Prunus avium* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2014, 152(1): 29–36.
- [19] Ye L Q, Yang C X, Li W D, et al. Evaluation of volatile compounds from Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis* (Bge.) Sok.) germplasm by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 389–397.
- [20] Girard B, Kopp T G. Physicochemical characteristics of selected sweet cherry cultivars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, 46(2): 471–476.
- [21] 赵悦, 孙玉霞, 孙庆扬, 等. 不同产地酿酒葡萄“赤霞珠”果实中挥发性香气物质差异性研究[J]. *北方园艺*, 2016(4): 23–28.
- [22] 叶丽琴. 欧李果肉芳香物质构成特点、种质和地域差异及动态变化的研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2017.
- [23] Chen K, Wen J F, Ma L Y, et al. Dynamic changes in norisoprenoids and phenylalanine-derived volatiles in off-vine *Vidal blanc* grape during late harvest[J]. *Food Chemistry*, 2019, 289(15): 645–656.
- [24] Villière A, Symoneaux R, Roche A, et al. Comprehensive sensory and chemical data on the flavor of 16 red wines from two varieties: Sensory descriptive analysis, HS-SPME-GC-MS volatile compounds quantitative analysis, and odor-active compounds identification by HS-SPME-GC-MS-O[J]. *Data in Brief*, 2019.
- [25] Rodgers J L, Nicewander W A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient[J]. *The American Statistician*, 1988, 42(1): 59–66.
- [26] Chen K, Han S Y, Li M, et al. Use of lysozyme and oligomeric proanthocyanidin to reduce sulfur dioxide and the evolution of volatile compounds in Italian Riesling ice wine during aging process[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(1): e12755.
- [27] Gemert L J V. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[J]. 2003.
- [28] Sun S Y, Jiang W G, Zhao Y P, et al. Characterization of the aroma-active compounds in five sweet cherry cultivars grown in Yantai (China)[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2010, 25(4): 206–213.
- [29] Zhang X, Jiang Y M, Peng F T, et al. Changes of aroma components in ‘Hongdeng’ sweet cherry during fruit development [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(11): 1376–1382.
- [30] Yue T X, Chi M, Song C Z, et al. Aroma characterization of Cabernet Sauvignon wine from the plateau of Yunnan (China) with different altitudes using SPME-GC/MS[J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(7): 1584–1596.
- [31] 王开真, 刘程斐, 王新. 避雨栽培对酿酒葡萄果实品质和香气物质的影响[J]. *现代园艺*, 2018(1): 4–5.
- [32] Shellie K. Volatile compounds and sensory attributes of wine from Cv. Merlot (*Vitis vinifera* L.) grown under differential levels of water deficit with or without a kaolin-based, foliar reflectant particle film[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2010, 58(24): 12890.
- [33] Xu X Q, Liu B, Zhu B Q, et al. Differences in volatile profiles of Cabernet Sauvignon grapes grown in two distinct regions of China and their responses to weather conditions[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 89: 123–133.