

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80304

欧李的成分、挥发性风味及生物活性研究进展

化清莹^{1,2} 魏涛¹ 韩伟³ 吴国浩⁴ 刘倩^{1,2}

(1. 北京联合大学生物化学工程学院, 北京 100023; 2. 北京联合大学生物活性物质与功能食品北京市重点实验室, 北京 100191; 3. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037; 4. 中国北京同仁堂(集团)有限责任公司, 北京 100010)

摘要: 欧李果实中含有钙、磷等多种矿质元素, 以及丰富的多酚类物质, 具有独特的花香型风味特征, 其种仁中还含有丰富的蛋白质、脂肪和多种药用成分, 具有抗炎、抗氧化、调节血脂和抑菌等生物活性, 是第三代水果的典型代表。文章系统综述了欧李果实中主要营养功效成分的组成与含量, 探讨了果实成熟期和品种对其挥发性风味成分的影响, 总结了欧李的主要生物功效, 并分析了欧李开发利用所面临的问题与机遇。

关键词: 欧李; 成分; 挥发性风味物质; 生物活性

Progress in the study of composition, volatile flavor compounds and bioactivity of Chinese dwarf cherry

HUA Qingying^{1,2} WEI Tao¹ HAN Wei³ WU Guohao⁴ LIU Qian^{1,2}

(1. College of Biochemical Engineering, Beijing Union University, Beijing 100023, China; 2. Beijing Key Laboratory of Bioactive Substances and Functional Foods, Beijing Union University, Beijing 100191, China; 3. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 4. Beijing Tong Ren Tang Co., Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: The fruit of Chinese dwarf cherry is a rich source of essential minerals, including calcium and phosphorus, and contains abundant polyphenols, characterized by a distinct floral aroma. Its seed kernel contains rich protein, fat, and various medicinal components, exhibiting anti-inflammatory, antioxidant, lipid-regulating, and antibacterial biological activities, making it a notable representative of the third-generation fruit. In this review, the composition and content of the main nutritional components in Chinese dwarf cherry fruit were summarized, and the effects of fruit maturity and variety on the volatile flavor components were discussed. Moreover, the main biological effects of Chinese dwarf cherry were summarized, and the problems and opportunities in the development and utilization of plum were also analyzed.

Keywords: Chinese dwarf cherry; composition; volatile flavor compounds; bioactivity

第三代水果主要是指那些生长在荒僻地区、尚未被广泛发掘利用的野生山果, 以及部分新近开发的优质水果, 如刺梨、树莓、桑葚、醋栗、沙棘和蓝莓等^[1]。与人工大规模栽培的传统水果相比, 第三代水果风味独特, 富含多种营养成分, 营养价值更高, 不仅可为人类提供新的食品资源, 还展现出作为保健品和药品原料的巨大潜力, 因此受到越来越多的关注。

欧李 [*Cerasus humilis* (Bge.) Sok.] 又称山梅子、小李仁, 是蔷薇科樱桃属矮生樱桃亚属的一种野生灌木果树, 为中国特有的古老果树, 具有极强的保水固土、抗旱抗寒耐瘠能力, 主要作为治理水土流失、防沙固沙的树种在中国西北、东北等地区种植。欧李果期为每年的6—8月, 果实为球形或椭圆形, 呈紫红色、橘红色或橘黄色等颜色, 颜色鲜艳, 风味浓郁, 具有一定的食用价值, 可制成果酱、

基金项目: 北京联合大学校级科研项目(编号: ZK10202204); 北京联合大学教改项目(编号: JJ2023Y019); “十四五”国家重点研发计划项目(编号: 2023YFA0914700)

通信作者: 刘倩(1987—), 女, 北京联合大学助理研究员, 博士。E-mail: shtliuqian@buu.edu.cn

收稿日期: 2024-04-03 **改回日期:** 2024-11-10

果脯、果酒等加工产品。在营养和活性方面,欧李果实、叶片以及欧李仁中含有丰富的蛋白质、维生素、矿物质以及多糖、多酚、黄酮等成分,具有抗炎、抗氧化、调节血脂等多种功效,潜在应用价值较大,是第三代水果的典型代表,但目前关于其基础研究和相关的应用仍较为缺乏。文章拟对欧李的营养功效成分、挥发性风味成分及生物活性进行介绍,以期促进欧李资源的深度开发及综合利用,为欧李在食品、保健品和生物医药领域的研究与应用提供依据。

1 欧李果实的主要营养功效成分

1.1 矿物质元素

欧李果肉中富含钙、镁、铁、铜、锰、锌、硒、钾等多种矿物质元素^[2-5],其中以钙含量最为丰富,远高于苹果、梨、柑橘等水果^[6]。例如,内蒙古大欧李果实中平均钙含量达到267.28 mg/kg^[7];Li等^[4]对27种不同基因型欧李中的矿物质元素组成进行分析,发现其钙含量平均值为235 mg/kg,最高可达524 mg/kg;内蒙古地区21种欧李品种的总钙含量为168.49~239.61 mg/kg,其中水溶钙含量为53.82~77.36 mg/kg,果胶钙含量为34.60~76.41 mg/kg,活性钙总占比在62%左右^[8];马建军等^[9]以燕山野生欧李为材料分析了果实中不同形态的钙在果实发育期含量的变化及分布,发现总钙含量为184.77~202.30 mg/kg,成熟果实不同形态钙累积量为水溶钙>果胶钙>磷酸钙>草酸钙>残渣钙,其中水溶钙和果胶钙占比约为70%。欧李果肉中不同形态钙含量与果实发育期密切相关。欧李果实钙累积主要发生在幼果细胞分裂期和果实膨大期两个阶段,在这两个过程中,中胶层的发育、新生细胞壁的形成和液泡膨大是造成果实中钙离子迅速积累的主要原因,这也使成熟欧李果实中的钙主要以果胶钙和水溶性钙的形式存在^[10-11]。

除钙元素外,欧李中还含有丰富的磷、钾、镁、铁、锰、锌等元素,对不同品种欧李中的常见矿物质元素进行分析表明,其磷含量平均值为198 mg/kg,高于苹果、梨、桃、李子等水果;铁含量平均值为8.36 mg/kg,最高可达24.02 mg/kg,而常见水果中以草莓含铁量最高,为18 mg/kg,其他水果中铁含量普遍为2~7 mg/kg^[12];镁、铜和锌含量平均值分别为75,0.47,2.33 mg/kg,达到或超出了常见水果的平均水平(表1)。

1.2 多酚类化合物

欧李中含有丰富的多酚类物质。多个品种的欧李鲜果总酚含量均在800 mg没食子酸/100 g以上,远高于蓝莓(135~280 mg没食子酸/100 g)、樱桃(60~90 mg没食子酸/100 g)、蔓越莓(77~247 mg没食子酸/100 g)等水果^[14]。不同品种间欧李果实多酚含量差异较大。一般来说,果皮、果肉颜色越深,多酚含量越高。例如红皮红肉、红皮

黄肉和黄皮黄肉3种欧李果实中,红皮红肉欧李果实中的总酚和总黄酮含量最高,红皮黄肉的次之,黄皮黄肉的最底^[15]。同样,紫红色、红色、黄色、浅红色4种颜色欧李种质果实中的多酚含量由高到低顺序为紫红色>红色>黄色>浅红色^[16]。此外,同一品种在不同地区种植也会对其多酚含量产生显著影响,这可能与气候和水土营养条件有关。

在所含多酚的种类方面,对16种不同种质欧李成熟果实多酚类化合物组成的分析结果表明,矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、表儿茶素、儿茶素、原花青素B₁、原花青素B₂、根皮苷、根皮素-2',4'-二葡萄糖苷等是欧李酚类化合物的主要成分,其中矢车菊素-3-O-葡萄糖苷是含量最高的花色苷类物质,原花青素B₁在原花青素中占比最高(表2)。此外,不同颜色和品种的欧李果实中还含有一些特有的酚类物质。对来自北京西山试验林场中红色、橙色和黄色3种不同颜色的欧李果实中的多酚物质进行检测表明,芦丁为红色果实特有的酚类物质,而香豆酸-葡萄糖苷和蜂香草苷为橙色果实特有的酚类物质^[18]。欧李果实多酚类物质丰富,其含量和组成因品种、颜色和地域而异,可根据需求选择合适品种进行研究利用。

1.3 果胶

果胶是一种广泛存在于果实果皮和细胞壁中的复杂多糖,可作为增稠剂、稳定剂使用,同时作为一种可溶性膳食纤维,在调节血糖、降低胆固醇和改善肠道健康等方面也具有一定功效^[19]。利用酸提醇沉的方法从欧李中提取纯化获得的果胶多糖RPCF中RG-I区的含量为74.46%。进一步结构表征表明,RPCF为高甲氧基乙酰化果胶大分子,甲氧基化程度为53.41%,具有丰富的阿拉伯糖和半乳糖侧链。在性能方面,RPCF的乳化性能优于柑橘果胶,且表现出的良好抗氧化能力可以防止脂质氧化。此外,与普通商业高甲氧基化果胶的凝胶体系不同,RPCF还可以形成无糖凝胶体系,表明欧李果胶RPCF可以作为新型的食品多糖乳化剂和流变改性剂^[20]。不同提取方法获得的欧李果胶性质差别较大。Zhang等^[21]对欧李冻干粉进行乙醇和丙酮预处理后,依次提取获得了水溶性(WSF)、螯合剂可溶性(CSF)和碳酸钠可溶性(NSF)果胶。与RPCF果胶不同,上述3种果胶均为支链低甲氧基果胶,具有无定形或部分纳米晶性质,HG区的含量在99%以上,RG-I区含量不足1%,但3种果胶仍具有良好的流变学、热学、乳化、吸附和抗氧化特性,可作为食品添加剂、食品配料或膳食补充剂使用。

1.4 欧李种仁中的营养及药用成分

欧李果实除果肉部分外,其种仁也具有较高的营养价值。欧李种仁含有丰富的蛋白质、脂肪和多糖等成分,其中蛋白质和脂肪含量远高于杏仁和核桃仁等果仁。以欧李种仁为原料榨取的欧李仁油中不饱和脂肪酸含量在

表 1 不同欧李品种主要矿物质元素含量[†]

欧李品种/ 基因型	P	K	Mn	Mg	Fe	Cu	Zn	参考文献
A-4-4-2	296	1 692	2.07	ND	11.49	0.60	2.99	[4]
B-4-5-1	208	1 188	0.62	ND	5.11	0.41	2.49	[4]
E-10-2-1	222	1 258	1.46	ND	5.95	0.50	1.84	[4]
E-20-2-2	149	806	0.95	ND	7.31	0.41	4.86	[4]
A-9-1-1	140	1 095	1.20	ND	7.17	0.40	1.81	[4]
C-8-1-6	241	1 496	2.11	ND	5.00	0.53	1.88	[4]
C-13-1-2	222	1 082	0.87	ND	5.33	0.35	2.10	[4]
B-3-3-1	140	1 024	1.20	ND	7.78	0.42	1.76	[4]
D-17-4-1	193	773	0.85	ND	5.38	0.36	1.87	[4]
I-12-5-3	168	898	1.07	ND	11.85	0.38	2.48	[4]
B-8-1-6	144	827	1.13	ND	16.92	0.35	2.55	[4]
D-17-2-2	188	699	1.05	ND	3.60	0.36	2.02	[4]
E-10-3-2	174	848	1.46	ND	7.06	0.38	2.48	[4]
F-3-3-1	176	875	0.70	ND	6.21	0.34	1.75	[4]
B-8-1-1	98	799	0.75	ND	3.58	0.39	1.28	[4]
C-12-5-7	237	1 175	1.40	ND	12.33	0.44	1.98	[4]
C-12-1-1	182	945	1.17	ND	5.95	0.55	3.53	[4]
H-9-1-1	212	1 043	1.33	ND	10.78	0.51	3.31	[4]
E-20-2-3	166	531	0.77	ND	6.05	0.82	3.23	[4]
C-11-1-1	170	912	0.86	ND	6.08	0.51	2.09	[4]
E-9-4-9	146	763	1.38	ND	5.92	0.58	2.72	[4]
B-6-6-4	235	936	1.13	ND	7.93	0.54	1.41	[4]
N3	336	1 451	1.62	ND	9.41	0.46	1.45	[4]
N4	314	1 342	1.80	ND	10.53	0.57	2.38	[4]
N5	196	801	0.84	ND	4.74	0.70	1.48	[4]
I-10-5-3	224	1 074	1.23	ND	12.25	0.53	1.50	[4]
A-9-1-3	171	844	1.40	ND	24.02	0.35	3.69	[4]
农大 3 号	ND	ND	1.00	76	ND	ND	ND	[13]
农大 4 号	ND	ND	0.80	63	ND	ND	ND	[13]
农大 5 号	ND	ND	1.00	65	ND	ND	ND	[13]
农大 6 号	ND	ND	1.00	71	ND	ND	ND	[13]
农大 7 号	ND	ND	1.10	68	ND	ND	ND	[13]
农大 9 号	ND	ND	1.10	123	ND	ND	ND	[13]
农优 I	ND	ND	1.20	78	ND	ND	ND	[13]
农优 II	ND	ND	0.90	67	ND	ND	ND	[13]
农优 II	ND	ND	1.20	99	ND	ND	ND	[13]
农优 IV	ND	ND	1.10	61	ND	ND	ND	[13]
农优 V	ND	ND	0.80	52	ND	ND	ND	[13]
平均值	198	1 007	1.14	75	8.36	0.47	2.33	

[†] ND 表示未检测。

表2 不同品种欧李果实中多酚类化合物组成^[17]

欧李品种/ 基因型	矢车菊素- 3-O-葡萄 糖苷	儿茶素	表儿 茶素	原花青 素 B ₁	原花青 素 B ₂	根皮素-2'- 木糖葡萄 糖苷	根皮素-2', 根皮苷	4'-二葡萄 糖苷	异槲 皮苷	槲皮素- 7-O-葡萄 糖苷	槲皮素-7- O-乙酰葡 萄糖苷	槲皮素-3- 阿拉伯 糖苷	杨梅素	槲皮苷
农大3号	3.33	4.40	7.94	36.03	12.69	0.81	14.47	16.09	0.00	2.37	1.14	0.41	0.09	0.24
农大4号	7.92	5.89	1.09	40.90	6.55	0.84	15.97	16.81	0.96	1.26	1.03	0.54	0.12	0.13
农大5号	0.00	6.10	1.78	34.83	4.75	0.00	0.00	46.45	0.00	2.00	4.07	0.00	0.00	0.03
农大6号	7.58	3.11	13.42	24.54	15.84	1.92	9.86	17.97	0.55	3.09	0.88	0.92	0.20	0.13
农大7号	5.77	7.50	1.23	35.42	12.94	5.43	13.26	5.63	1.55	5.07	2.63	2.89	0.62	0.05
DG-1	5.75	8.41	2.95	48.79	11.07	2.94	8.54	4.79	0.81	2.42	1.64	1.55	0.34	0.01
Y03-09	5.32	4.39	4.92	28.80	4.90	4.06	6.89	31.00	1.09	2.71	2.31	2.31	1.24	0.06
Y04-26	16.40	5.74	8.79	38.19	15.71	0.00	0.00	11.03	0.60	0.66	1.69	0.94	0.21	0.03
Y09-14	3.09	5.30	3.32	45.82	8.42	0.00	6.29	25.03	0.27	0.93	0.96	0.42	0.09	0.07
Y23-04	6.66	6.07	4.30	31.34	15.29	0.00	15.31	10.04	1.19	4.23	2.17	2.62	0.56	0.20
S-D	5.40	3.53	1.97	32.48	7.91	3.00	7.48	31.03	0.69	1.68	2.67	1.76	0.38	0.03
Wenfeli	12.25	5.48	3.11	26.82	20.35	5.65	10.51	7.06	0.93	3.59	1.41	2.23	0.49	0.13
W-3	0.00	3.90	2.43	36.77	5.85	0.76	10.72	34.46	0.09	2.05	1.62	0.86	0.18	0.31
02-16	8.44	7.68	1.24	51.74	10.72	0.00	5.32	7.43	0.69	2.25	1.75	2.25	0.37	0.12
03-32	6.11	6.34	2.72	38.16	12.49	17.75	2.79	4.67	1.04	1.44	2.89	2.94	0.63	0.02
10-32	12.23	8.39	3.20	40.73	15.98	2.22	9.13	3.07	0.56	1.85	1.74	0.72	0.16	0.02

94.42%左右,包括油酸、亚油酸、棕榈酸和硬脂酸等成分。其中油酸和亚油酸是最主要的不饱和脂肪酸,分别约占不饱和脂肪酸含量的63%和30%^[22]。此外,欧李种仁还具有一定的药用价值,干燥的欧李、郁李或长柄扁桃种仁又称“郁李仁”,为常用中药,收载于中国药典2005版一部份中,具有润燥滑肠、下气、利尿等作用,其中主要的活性组分为郁李仁苷A、苦杏仁苷、阿福豆苷等^[23]。郁李仁苷A具有强烈的泻下作用,为郁李仁特效成分,具有润肠通便、利尿消肿等活性;苦杏仁苷是一种存在于许多植物种子中的氰苷类化合物,具有抗肿瘤、抗炎、免疫调节等活性;阿福豆苷是一种异黄酮类化合物,在抗炎、抗氧化、心血管保护等方面具有一定活性。不同产地欧李果仁制备的郁李仁中郁李仁A含量最高为384.3 μg/g(吉林产),阿福豆苷含量最高为101.7 μg/g(哈尔滨产),而苦杏仁苷含量最高为48.2 μg/g(吉林产)^[24-25],可为欧李中郁李仁的人药使用提供参考。

2 欧李果实中的挥发性风味物质

欧李果实在发育过程中不同阶段的挥发物组成有所不同。幼果期至着色期内主要以青香型挥发性成分为主;自商熟期开始果香型挥发物逐渐增加,花香型挥发物在完熟期内显著增加,形成典型果实香气。例如“燕山1号”欧李果实幼果期挥发物种类显著高于其他时期,成分复杂,以酯、萜类为主,果实香气的主要贡献成分为丙酸

己酯、芳樟醇、癸醛、反-2-壬烯醛和异戊酸己酯等,总体表现出青香、木香、花香特征;幼果期至绿熟期香型特征较为一致,着色期开始果香特征逐渐增加,完熟期果香特征增至与花香相当,同时像顺式-玫瑰醚、乙酸香叶酯等具有玫瑰、铃兰和薰衣草香气特征的挥发性物质香气强度值有所增加,花香更为浓郁复杂^[26]。刘俊英等^[27]对处于成熟期不同阶段的“京欧2号”欧李果实的挥发性组分进行检测,发现粉红色期的主要挥发性成分为酯类,例如乙酸丁酯、辛酸正丁酯等成分,呈现出生梨、香蕉香气;大红色时期的主要成分以酯类为主,醛类和酸类成分含量较少,香味浓郁,具有典型的玫瑰香气,并伴有一定的青草香;在紫红时期,挥发性成分以酯类和醇类为主,醛类和酸类的含量有所升高,呈现出甜香、脂香特征。其中,大红色时期的果实各类挥发性成分的含量相对较高。

除果实成熟期外,品种对于欧李果实的风味也具有重要影响。“京欧1号”的主要挥发性物质以酯类为主,带有强烈的果香和酒香特征;“京欧2号”的主要挥发性物质以萜类为主,总体呈现青草和玫瑰香气;“京欧3号”的主要挥发性物质除里那醇、月桂烯、 α -罗勒烯、香叶醇、己酸丁酯、乙酸己酯、乙酸香叶酯、橙花醇等酯类和萜类外,同时还含有苯甲醇、苯甲醛、壬醛、壬醇、苯乙醇等醇类,碳水化合物等挥发性物质,呈现出清甜的樱桃、甜橙等水果香气,香气强烈复杂^[28-31]。韩轩轩^[32]根据87份欧李种质

商熟期果实的香气化合物组成将其聚类分为低香类(0.842 8~47.471 0 mg/kg)、中香类(56.921 4~127.702 4 mg/kg)、中高香类(163.519 0~221.040 4 mg/kg)和高香类(251.581 3~295.765 2 mg/kg)。

3 欧李果实的生物活性

3.1 抗炎、抗氧化活性

欧李中含有丰富的多酚、黄酮等活性成分,具有良好的体外抗炎和抗氧化活性。Liu等^[33]研究发现,欧李汁可以有效改善高脂饮食诱导的肥胖小鼠的氧化应激,提高血清和结肠中超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和过氧化氢酶(CAT)的活性,增强Nrf2/HO-1信号传导和下游抗氧化因子表达,提高抗氧化能力。同样,欧李发酵液也能调节溃疡性结肠炎小鼠模型中血清和结肠中的氧化应激指标,显著降低髓过氧化物酶(MPO)活性和一氧化氮水平,提高SOD活性,下调体内肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-1 β 和白细胞介素-6促炎细胞因子水平,并且可以缓解由溃疡性结肠炎引起的 *Alistipes* 和 *Oribacterium* 等有害细菌富集,增加 *Parasturtella*、*Bacteroides*、*Roseburia* 和 *Blautia* 等有益细菌的丰度,提高肠道中短链脂肪酸水平,促进肠道中乙酸和分泌性免疫球蛋白A的产生,对溃疡性结肠炎起到一定的缓解作用^[34]。

3.2 调节血脂活性

欧李叶和欧李果实在调节血脂方面也表现出一定的活性。雷晨^[35]研究发现,欧李叶茶水提取物可以降低小鼠血清中甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)、低密度脂蛋白(LDL-C)含量以及肝脏指数,控制小鼠体重增长,具有一定的调节血脂和预防肥胖发生的作用。灌胃欧李发酵液也可使高脂血症大鼠血清中的TC、TG和LDL-C降低到正常水平,同时具有减少氧化应激和促炎细胞因子、减轻脂质积累等活性^[36-37]。欧李多酚同样可以降低肥胖小鼠血清中的TG、TC和LDL-C水平,提高高密度脂蛋白(HDL-C)水平,除此之外,欧李多酚可通过下调miR-122、Srebp1c和Cpt1a等PPAR γ 通路相关蛋白的表达、抑制脂肪细胞分化等方式减少肝脏脂质沉积,表现出良好的降脂功效^[33]。

3.3 抑菌活性

欧李中的多肽、苦杏仁苷等多种组分还具有一定的抑菌活性。研究^[38]发现,欧李仁多肽对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、志贺氏菌、单核细胞增生李斯特菌、伤寒杆菌、沙门氏菌等多种病原菌均具有一定的抑制作用,其中对金黄色葡萄球菌和单核细胞增生李斯特菌可达60.73%和52.63%抑菌率。此外,欧李仁苦杏仁苷提取物对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌也均有不同程度的抑制作用,但对青霉未表现出抑制效果^[39]。采用水蒸气蒸馏法制备得到

欧李纯露对空气中存在的杂菌具有一定的抑制活性,且农大4号、农大7号、99-02、10-01、农大5号和09-01欧李纯露对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好的抑制效果^[40]。

4 总结与展望

欧李作为第三代水果的典型代表,含有丰富的矿物质元素、多酚等营养活性成分,展现出独特的花香型风味特征,具有抗炎、抗氧化、血脂调节和抑菌等生物活性,是食品、保健品开发的优质原料。目前,欧李在河北、内蒙古地区已有部分规模化种植,但所种植品种多样,果实品质参差不齐,营养功效成分及风味差异显著,而在育种方面的研究则主要集中于改进果实成熟期、着果率和可食用率方面,因此未来在进一步扩大规模化种植的基础上,可利用园艺、育种等手段,以提高欧李果实中有效成分含量及风味改善为目标进行品质优化。在加工方面,目前以欧李为原料制备的产品主要以初级加工食品和简单工艺制品为主,包括果汁、果脯、果酒、果醋等常规水果加工品,规模较小,附加值和商业化程度有待提高,未来可从欧李保健功能和药用价值角度考虑,探索其在保健品、药品等领域的深层次产品开发。在健康功效及作用机制方面,现有报道多聚焦于欧李全汁或混合提取物的活性,而具体功效成分、量效关系及协同机制不明,缺乏深入研究,未来可对其活性成分进行细化分类,探讨其具体分子机制,推动欧李的精细化和高值化利用。

参考文献

- [1] 丁新泉, 刘敏超, 闫翠香. 我国第三代水果产业现状与发展战略[J]. 广东农业科学, 2013, 40(19): 206-209.
DING X Q, LIU M C, YAN C X. Study on the status of the third generation fruit industry and developing strategy[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(19): 206-209.
- [2] REN J, SUN L, ZHANG Q Y, et al. Drought tolerance is correlated with the activity of antioxidant enzymes in *Cerasus humilis* seedlings[J]. BioMed Research International, 2016, 2016: 9851095.
- [3] 师建华, 曹军合, 徐立军. 欧李果实营养成分分析与评价[J]. 河北林业科技, 2021(2): 23-26.
SHI J H, CAO J H, XU L J. Evaluation and analysis of yield and nutritional content in *Census humilis*[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2021(2): 23-26.
- [4] LI W D, LI O, MO C, et al. Mineral element composition of 27 Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis* (Bge.) Sok.) genotypes collected in China[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2014, 89(6): 674-678.
- [5] 刘俊英, 辛秀兰, 兰蓉. 同位素内标法测定欧李果原汁氨基酸[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(8): 140-143.
LIU J Y, XIN X L, LAN R. Study on detection of amino acids

- in Chinese dwarf cherry juice with isotope internal standard method[J]. Food Research and Development, 2010, 31(8): 140-143.
- [6] 郭炳成, 李晓艳, 张薇, 等. 蒙原欧李果实发育过程中钙与果胶含量变化及相关性分析[J]. 北方园艺, 2024(4): 28-36.
GUO B C, LI X Y, ZHANG W, et al. Changes and correlation between calcium and pectin contents during fruit development of Mengyuan types of *Cerasus humilis*[J]. Northern Horticulture, 2024(4): 28-36.
- [7] 杜艳丰, 梁海清, 朱妍梅, 等. 欧李钙、铁、锌、硒含量测定分析及生态适应性观察[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(12): 2 202-2 207.
DU Y F, LIANG H Q, ZHU Y M, et al. The determination analysis of calcium, iron, zinc and selenium content in fruits and the ecological adaptability of Chinese dwarf cherry in Xinjiang [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(12): 2 202-2 207.
- [8] 张薇, 邵郅胜, 郭金丽. 不同资源类型欧李果实钙素营养特征研究[J]. 北方园艺, 2023(13): 21-27.
ZHANG W, SHAO Z S, GUO J L. Study on the nutritional characteristics of calcium in *Cerasus humilis* of different resource types[J]. Northern Horticulture, 2023(13): 21-27.
- [9] 马建军, 张立彬, 于凤鸣, 等. 野生欧李果实中不同形态钙的含量及分布[J]. 园艺学报, 2007(3): 755-759.
MA J J, ZHANG L B, YU F M, et al. Contents and distribution of different forms of calcium in *Prunus humilis*[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007(3): 755-759.
- [10] 张薇. 欧李果实发育成熟过程中钙素营养积累规律及机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023: 12-14.
ZHANG W. Study on the regularity and mechanism of calcium nutrient accumulation during the development and ripening in the fruit of *Cerasus humilis*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023: 12-14.
- [11] 张莉, 张薇, 郭金丽. 欧李果实发育过程中钙与有机酸含量的变化及相关性分析[J]. 果树学报, 2024, 41(3): 494-504.
ZHANG L, ZHANG W, GUO J L. Analysis of changes and correlations between calciums and organic acids in fruits of *Cerasus humilis* during different development stages[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(3): 494-504.
- [12] 中国疾病预防控制中心营养与健康所. 中国食物成分表(标准版): 第一册[M]. 6版. 北京: 北京大学医学出版社, 2018: 95-114.
Chinese Center for Disease Control and Prevention. China food composition tables (standard edition): volume one[M]. 6th ed. Beijing: Peking University Medical Press, 2018: 95-114.
- [13] 王培琳. 几种欧李品系生物学特征与营养成分比较[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2021: 11-38.
WANG P L. Comparison of biological characteristics and nutritional components from *Cerasus humilis*[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2021: 11-38.
- [14] BRAVO L. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance[J]. Nutr Rev, 1998, 56(11): 317-333.
- [15] 李树青. 不同欧李资源果实和叶片酚类物质含量及抗氧化活性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022: 5-34.
LI S Q. Study on phenolic content and antioxidant activity in fruits and leaves of different *Cerasus humilis* resources[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022: 5-34.
- [16] 李宗朔, 吴大勇, 顾金瑞, 等. 中国特有植物欧李不同种质果肉中多酚含量和总抗氧化活性差异及其聚类分析[J]. 中国野生植物资源, 2018, 37(5): 10-15.
LI Z S, WU D Y, GU J R, et al. Differences of polyphenols content and total antioxidant activity as well as their cluster analysis in flesh of Chinese dwarf cherry germplasm endemic plant in China[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2018, 37(5): 10-15.
- [17] WANG P F, MU X P, DU J J, et al. Flavonoid content and radical scavenging activity in fruits of Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis*) genotypes[J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(1): 55-63.
- [18] 莫愁. 基于糖酸和酚类物质的欧李种质资源果实品质评价研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2015: 40-43.
MO C. Evaluation of fruit quality of *Cerasus humilis* germplasm resources based on sugar-acid and phenolic substances[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2015: 40-43.
- [19] 杨旭东, 郭绰, 袁凯, 等. 低酯果胶凝胶特性研究进展及应用[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 299-308.
YANG X D, GUO C, YUAN K, et al. Recent progress on gelation mechanism of low methoxyl pectin and its application in the food industry[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 299-308.
- [20] ZHANG S K, HE Z Y, CHENG Y, et al. Physicochemical characterization and emulsifying properties evaluation of RG-I enriched pectic polysaccharides from *Cerasus humilis*[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 260: 117824.
- [21] ZHANG S K, WATERHOUSE G I N, CUI T T, et al. Pectin fractions extracted sequentially from *Cerasus humilis*: their compositions, structures, functional properties and antioxidant activities[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 564-574.
- [22] 穆霄鹏, 杜俊杰, 杜俊民. 钙果种仁油的提取及成分分析[J]. 食品科技, 2012, 37(12): 140-143.
MU X P, DU J J, DU J M. Extraction and composition analysis on the fatty acids in the kernel of Chinese dwarf cherry[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(12): 140-143.
- [23] 李卫东, 顾金瑞. 果药兼用型欧李的保健功能与药理作用研究进展[J]. 中国现代中药, 2017, 19(9): 1 336-1 340.
LI W D, GU J R. Research progress on healthy function and

- pharmacological effect in *Cerasus humilis* of fruit medicine dual-purpose type[J]. Modern Chinese Medicine, 2017, 19(9): 1 336-1 340.
- [24] 霍琳, 陈晓辉, 曹阳, 等. RP-HPLC 法测定郁李仁中郁李仁苷 A 和阿福豆苷含量[J]. 药物分析杂志, 2010, 30(5): 831-833.
HUO L, CHEN X H, CAO Y, et al. RP-HPLC determination of prunuside A and afzelin in semen pruni[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2010, 30(5): 831-833.
- [25] 霍琳, 陈晓辉, 王鹏, 等. RP-HPLC 法测定郁李仁中苦杏仁苷含量[J]. 药物分析杂志, 2009, 29(12): 2 055-2 057.
HUO L, CHEN X H, WANG P, et al. RP-HPLC determination of amygdalin in semen pruni[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2009, 29(12): 2 055-2 057.
- [26] 李晓颖, 武军凯, 王海静, 等. 欧李果实发育期挥发性成分变化特征[J]. 中国农业科学, 2021, 54(9): 1 964-1 980.
LI X Y, WU J K, WANG H J, et al. Characterization of volatiles changes in Chinese dwarf cherry fruit during its development[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(9): 1 964-1 980.
- [27] 刘俊英, 李双石, 闫征, 等. GC-MS 法研究成熟度对欧李果香气成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(14): 148-152.
LIU J Y, LI S S, YAN Z, et al. Effect of harvest maturity on aroma components of Chinese dwarf cherry with GC-MS[J]. Food Research and Development, 2018, 39(14): 148-152.
- [28] 陈臣, 牟德华, 张哲琦, 等. 溶剂萃取与顶空固相微萃取检测欧李果酒中香气成分的研究[J]. 酿酒科技, 2013(12): 89-93.
CHEN C, MOU D H, ZHANG Z Q, et al. Comparison of the detection of flavoring compounds in *Prunus humilis* fermenting wine by solvent extraction and by headspace solid-phase microextraction coupled with GC-FID[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2013(12): 89-93.
- [29] 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: 29-49.
YE L Q. Study on the characteristics of aroma constituents, germplasm and geographical differences, and dynamic changes in the pulp of Chinese dwarf cherry[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2017: 29-49.
- [30] CUI Q Y, YE L Q, GUO C, et al. Assessing volatiles in three Chinese dwarf cherry cultivars during veraison and maturation using headspace-solid phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry[J]. ACS Omega, 2020, 5(49): 31 744-31 752.
- [31] HOU C Y, CHEN L L, YANG L Z, et al. An insight into anti-inflammatory effects of natural polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 248-255.
- [32] 韩轩轩. 欧李种质果实香气评价及影响因子的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019: 9-116.
HAN X X. Fruit aroma evaluation and its influencing factors of different Chinese dwarf cherry germplasms[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019: 9-116.
- [33] LIU S W, CHANG X D, YU J C, et al. *Cerasus humilis* cherry polyphenol reduces high-fat diet-induced obesity in C57BL/6 mice by mitigating fat deposition, inflammation, and oxidation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(15): 4 424-4 436.
- [34] RAN B B, GUO C, ZHANG Y S, et al. Preventive effect of Chinese dwarf cherry [*Cerasus humilis* (Bge.) Sok.] fermentation juice on dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis rats through the regulation of IgA and the intestinal immune barrier[J]. Food & Function, 2022, 13(10): 5 766-5 781.
- [35] 雷晨. 欧李叶茶的主要成分分析及降糖降脂功能验证[D]. 晋中: 山西农业大学, 2023: 23-29.
LEI C. Analysis of main components of Chinese dwarf cherry leaf tea and verification of its function of hypoglycemia and hypolipidemia[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2023: 23-29.
- [36] WANG Y, HAN C, CHENG J H, et al. Fermented *Cerasus humilis* fruits protect against high-fat diet induced hyperlipidemia which is associated with alteration of gut microbiota[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(5): 2 554-2 563.
- [37] 成婧荷, 陈佳佳, 郭嫦娥, 等. 欧李发酵液对高脂血症 SD 大鼠血脂的调控及对肝脏的保护作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 311-316.
CHENG J H, CHEN J J, GUO C E, et al. Effects of *Cerasus humilis* fermentation juice: regulating serum lipids and protecting liver in hyperlipidemia SD rats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 311-316.
- [38] 王钊. 欧李仁多肽的制备及其生物活性的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2014: 23-30.
WANG Z. Preparation of *Cerasus humilis* kernel peptide and biological activity investigation[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2014: 23-30.
- [39] 李瑞玲. 欧李仁苦杏仁苷的提取及生物活性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019: 7-25.
LI R L. Extraction and biological activity of amygdalin from *Prunus humilis*[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019: 7-25.
- [40] 田欣玥. 欧李纯露的提取及功能活性研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022: 15-38.
TIAN X Y. Extraction and functional activity study of *Cerasus humilis* hydrosol[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022: 15-38.