

3 种石斛药材中奇数碳脂肪酸组成差异

Difference of odd-carbon fatty acid composition in three *Dendrobium* species

冯诗琪¹ 陆安静² 杨 淼³ 冯迪娜⁴ 何芋岐² 薛 松¹

FENG Shi-qi¹ LU An-jing² YANG Miao³ FENG Di-na⁴ HE Yu-qi² XUE Song¹

(1. 大连理工大学生物工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 遵义医科大学药学院,

贵州 遵义 563000; 3. 辽宁师范大学生命科学学院, 辽宁 大连 116081;

4. 中冠生物科技[珲春]有限公司, 辽宁 大连 133300)

(1. School of Biological Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. College of Pharmacy, Zunyi Medical University, Zunyi, Guizhou 563000, China; 3. School of Life

Sciences, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116081, China; 4. Zhongguan Biotechnology

[Hunchun] Co., Ltd., Dalian, Liaoning 133300, China)

摘要:目的:研究 3 种石斛奇数碳脂肪酸(OCFA)成分及其含量。方法:采用气相色谱—质谱法(GC-MS)分析不同地区的金钗石斛、铁皮石斛、鼓槌石斛 3 种石斛的脂肪酸组成。结果:OCFA 占细胞中总脂肪酸的 8%, 占总脂肪酸的相对丰度百分比从高到低依次为 C_{15,0}、C_{17,0}、C_{23,0}、C_{19,0}、C_{21,0}。金钗石斛和铁皮石斛中 C_{15,0} 和 C_{17,0} 相对丰度的比值(C_{15,0}/C_{17,0})分别 < 1.6, > 1.8, 表明含有系列 OCFA 是兰科植物的共性。结论:植物中 OCFA 的存在可能与其药物活性具有相关性。

关键词:金钗石斛; 铁皮石斛; 鼓槌石斛; 奇数碳脂肪酸; 兰科植物

Abstract: Objective: The fatty acid composition and content of three kinds of *Dendrobium* were studied in order to provide reference for the development of dendrobium efficacy. **Methods:** The fatty acids compositions of *Dendrobium nobile*, *Dendrobium officinale* and *Dendrobium chrysotoxum* from different regions were systematically quantified by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and a series of Odd-carbon fatty acids (OCFA) containing 15 ~ 23 carbons were found in all dendrobiums. **Results:** The results showed that the OCFA accounted for more than 8% of the total fatty acids. The relative

abundances of OCFA from high to low were C_{15,0}, C_{17,0}, C_{23,0}, C_{19,0} and C_{21,0}. C_{15,0}/C_{17,0} (C_{15,0} and C_{17,0} relative abundance ratios) in *D. nobile* and *D. officinale* were less than 1.6 and more than 1.8, respectively. It was concluded that orchids contain a series of OCFA as one of the features in this family plants. **Conclusion:** The existence of OCFA in *Dendrobium* may be related to their drug activities.

Keywords: *Dendrobium nobile*; *Dendrobium officinale*; *Dendrobium chrysotoxum*; odd-carbon fatty acids; orchids

石斛(*Dendrobium*)为附生型多年生草本植物,是传统名贵药材,具有益胃生津、滋阴清热的功效^[1]。石斛内富含多种脂肪酸,使其成为一种补充人体营养物质的理想食品来源。

奇数碳脂肪酸(odd-carbon fatty acids, OCFA)是含有奇数个碳原子的脂肪酸,自然条件下产生的含量较低,通常在微生物中合成^[2-3]。破囊壶菌中奇数碳脂肪酸含量达 27%^[4]。高等动物脂类中奇数碳脂肪酸约占总脂肪酸的 1%~5%^[5-6]。海产动物一般比陆生动物含有更多的奇数碳脂肪酸,可能与其直接或间接食用微生物有关。大多数植物的奇数碳脂肪酸相对丰度 < 10%, 如桐花树叶、椴树籽、棉籽油等^[7-9]。相对于偶数碳脂肪酸,奇数碳脂肪酸尤其是饱和奇数碳脂肪酸更有益于人体健康^[10]。例如,奇数碳脂肪酸具有抗癌活性、抗炎、抗菌和非细胞毒免疫抑制作用等。C_{15,0}、C_{17,0}、C_{19,0}对乳腺癌、肺癌和白血病等癌细胞有抑制作用^[11-13]。

研究拟采用高效转酯化、GC-MS 定性及 GC 定量方法对不同产地的金钗石斛(*Dendrobium nobile*, *D.*

基金项目:吉林省科技发展计划项目(编号:20200708050YY); 贵州省科技支撑计划项目(编号:黔科合支撑[2019]2953, 黔科合支撑[2019]2961)

作者简介:冯诗琪,女,大连理工大学在读硕士研究生。

通信作者:薛松(1972—),女,大连理工大学教授,博士。

E-mail: xuesong@dlut.edu.cn

收稿日期:2022-08-25 **改回日期:**2023-01-03

nobile)、铁皮石斛(*Dendrobium officinale*, *D. officinale*)和鼓槌石斛(*Dendrobium chrysotoxum*, *D. chrysotoxum*)的脂肪酸进行分析,比较其含量特征与石斛种类和产地,并进一步比较兰科植物的奇数碳脂肪酸含量,旨在为探究 OCFA 是兰科植物的特征物质。

1 材料与方法

1.1 药材、试剂及仪器

金钗石斛:产自贵州、福建、海南、云南;

铁皮石斛:产自安徽、福建、广西、贵州、云南、浙江;

鼓槌石斛:产自云南;

正己烷:色谱级,美国 Spectrum 公司;

甲醇、硫酸:分析级,天津科密欧化学试剂有限公司;

37 种混合标准品、十七烷酸甲酯(C_{17} -ME)、三油酸甘油酯(C_{17} -TAG):美国 Sigma-Aldrich 公司;

质谱仪:5975 型,美国安捷伦公司;

气相色谱仪:8860 型,美国安捷伦公司;

分析天平:QUINTIX124-1CN 型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

漩涡混合器:VORTEX-5 型,海门市其林贝尔仪器制造有限公司;

水浴锅:SY-1220 型,美国 Spectrum 公司。

1.2 试验方法

参照 Liu 等^[14]的方法对所有石斛样品进行转酯化,将加热回流改为密闭加热,转酯化时间优化至 30 min。脂肪酸甲酯(FAME)分析采用火焰离子化检测器(FID)和 DB-23 毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm)。电子轰击离子源,离子源温度 230 ℃,四极杆温度 150 ℃,电子倍增器电压 1 345 V,电子能量 70 eV,发射电流 34.6 μA,接口温度 230 ℃,质量扫描范围 20~500(m/z)。

1.3 数据分析

通过保留时间和质谱信息来确定脂肪酸甲酯的结构。采用峰面积归一化法及 C_{17} 脂肪酸甲酯外标法对 FAME 定量,脂肪酸占总脂肪酸的百分比为相对丰度。采用统计学 SPSS 23.0 软件进行数据处理,采取 t 检验, $P < 0.05$ 为有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 石斛脂肪酸的定性

37 种 FAME 混合标准品总离子流图见图 1,石斛脂肪酸总离子流图见图 2。根据质谱信息确定石斛脂肪酸组成为 $C_{12:0}$ 、 $C_{14:0}$ 、 $C_{15:0}$ 、 $C_{16:0}$ 、 $C_{17:0}$ 、 $C_{18:0}$ 、 $C_{18:1n9}$ 、 $C_{18:1n7}$ 、 $C_{18:2n6}$ 、 $C_{19:0}$ 、 $C_{18:3n3}$ 、 $C_{20:0}$ 、 $C_{21:0}$ 、 $C_{22:0}$ 、 $C_{23:0}$ 、 $C_{24:0}$ 。

2.2 石斛奇数碳脂肪酸定量分析

由表 1~表 3 可知,3 种石斛中均存在碳原子数为 $2n+1$ 的奇数碳脂肪酸($n=7\sim 11$),且相对丰度占总脂肪酸的 8% 以上。奇数碳脂肪酸相对丰度从高到低依次

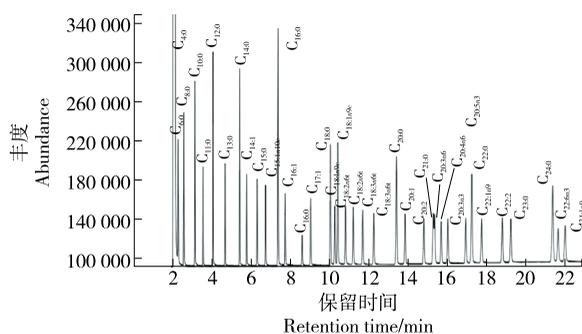


图 1 37 种 FAME 混合标准品总离子流图

Figure 1 37 standard mixtures of fatty acid methyl esters of total ion chromatogram

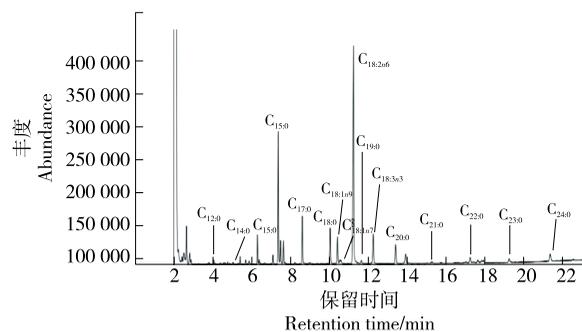


图 2 石斛总离子流图

Figure 2 Total ion chromatogram of fatty acyl groups in *Dendrobium*

为 $C_{15:0} > C_{17:0} > C_{23:0} > C_{19:0} > C_{21:0}$ 。金钗石斛中,贵州 4、福建、云南的 $C_{15:0}$ 与 $C_{17:0}$ 的总相对丰度占总奇数碳脂肪酸(TOCFA)的比例 $> 10\%$,作为奇数碳脂肪酸的主要成分,其相对丰度占 TOCFA 的 81% 以上。其他地区的金钗石斛 $C_{15:0}$ 、 $C_{17:0}$ 、 $C_{23:0}$ 作为奇数碳脂肪酸的主要成分,其总相对丰度占总奇数碳脂肪酸的 74% 以上。 $C_{15:0}$ 、 $C_{17:0}$ 、 $C_{23:0}$ 的 TOCFA 占比分别为 42%~50%,31%~36%,9%~15%。不同地区金钗石斛的 $C_{15:0}$ 和 $C_{17:0}$ 相对丰度比值均 < 1.6 ,奇数碳脂肪酸在细胞中的含量(C_{TOCFA})为 0.56~0.92 mg/g。贵州地区 TOCFA 相对丰度为 8%~9%,而漳州等非贵州地区碳原子数为 $2n+1$ 的相对丰度为 11%~13%。铁皮石斛中, $C_{15:0}$ 、 $C_{17:0}$ 和 $C_{23:0}$ 为奇数碳脂肪酸的主要成分,总相对丰度占 TOCFA 的 91% 以上。 $C_{15:0}$ 、 $C_{17:0}$ 、 $C_{23:0}$ 的 TOCFA 占比分别为 49%~52%,22%~27%,13%~20%。不同地区铁皮石斛的 $C_{15:0}$ 和 $C_{17:0}$ 相对丰度的比值 > 1.8 , C_{TOCFA} 为 0.42~0.59 mg/g,说明不同地区铁皮石斛的奇数碳脂肪酸相对丰度并无明显差异。

铁皮石斛与金钗石斛两者的 $C_{15:0}$ 水平相差较小,由于铁皮石斛中 $C_{17:0}$ 占比减少而导致 $C_{15:0}$ 和 $C_{17:0}$ 相对丰度比值增大。与金钗石斛相比,铁皮石斛中 $C_{23:0}$ 占比明显增多,成为奇数碳脂肪酸的主成分。云南鼓槌石斛中,

表 1 不同地区金钗石斛的奇数碳脂肪酸组成[†]
Table 1 OCFA profiles of four regions of *D. nobile* %

地区	C _{15,0}	C _{17,0}	C _{19,0}	C _{21,0}	C _{23,0}	TOCFA	C _{15,0} /C _{17,0}	C _{TOCFA}
贵州 1	3.62±0.1	2.63±0.1	0.72±0.0	0.27±0.0	1.14±0.1	8.38±0.2*	1.38±0.04	0.62±0.06
贵州 2	3.78±0.7	3.08±0.6	0.67±0.1	0.25±0.1	1.16±0.3	8.94±0.8*	1.23±0.06	0.56±0.05
贵州 3	3.84±0.4	2.95±0.3	0.58±0.1	0.23±0.0	0.85±0.0	8.45±0.6*	1.30±0.11	0.76±0.11
贵州 4	4.21±0.1	2.94±0.2	0.60±0.0	0.22±0.0	0.83±0.0	8.79±0.2*	1.43±0.04	0.83±0.11
福建	6.24±0.2	4.07±0.2	0.73±0.1	0.20±0.0	1.21±0.1	12.45±0.2**	1.54±0.11	0.95±0.07
海南 1	6.02±0.8	4.35±1.1	0.78±0.2	0.26±0.1	1.42±0.1	12.83±2.1**	1.42±0.25	0.86±0.22
海南 2	5.87±0.3	4.29±0.2	0.85±0.1	0.25±0.1	1.40±0.3	12.66±1.0**	1.37±0.03	0.88±0.09
海南 3	5.46±0.3	4.38±0.1	0.79±0.2	0.21±0.1	1.27±0.2	12.12±0.3**	1.25±0.04	0.92±0.06
海南 4	5.66±0.0	4.23±0.1	0.84±0.0	0.32±0.0	1.84±0.2	12.89±0.3**	1.34±0.04	0.72±0.02
云南	5.73±0.1	3.98±0.0	0.82±0.0	0.27±0.0	1.15±0.1	11.95±0.1**	1.44±0.02	0.78±0.01

† ** 表示该数值与带有 * 的数值差异显著 ($T = -18.664, P < 0.01$)。

表 2 铁皮石斛与鼓槌石斛的奇数碳脂肪酸组成[†]
Table 2 OCFA profiles of *D. officinale* and *D. chrysotoxum* %

石斛	产地	C _{15,0}	C _{17,0}	C _{19,0}	C _{21,0}	C _{23,0}	TOCFA	C _{15,0} /C _{17,0}	C _{TOCFA}
铁皮石斛	安徽	5.34±0.70	2.54±0.13	0.47±0.07	0.43±0.09	2.08±0.20	10.86±0.84*	2.09±0.17	0.51±0.04
	福建	5.38±0.46	2.94±0.13	0.55±0.07	0.33±0.13	1.66±0.70	10.86±1.23*	1.83±0.13	0.49±0.12
	广西	5.49±0.72	2.86±0.09	0.54±0.22	0.28±0.06	1.41±0.45	10.58±0.52*	1.93±0.32	0.42±0.04
	贵州	5.67±0.88	2.62±0.15	0.51±0.13	0.46±0.12	2.27±0.60	11.52±0.36*	2.16±0.30	0.47±0.04
	云南	4.94±0.49	2.57±0.16	0.43±0.07	0.35±0.11	1.78±0.16	10.07±0.85*	1.92±0.17	0.59±0.08
	浙江	5.27±0.80	2.43±0.26	0.45±0.09	0.37±0.09	2.13±0.41	10.65±1.22*	2.17±0.22	0.43±0.07
鼓槌石斛	云南	5.07±0.04	2.30±0.01	0.46±0.01	0.13±0.01	1.16±0.05	9.13±0.04*	2.20±0.01	0.63±0.01

† * 表示同行数值无显著性差异 ($T = 0.708, P > 0.05$)。

表 3 3 种石斛奇数碳脂肪酸在 TOCFA 的占比
Table 3 The proportion of OCFA in TOCFA of three *Dendrobium* %

石斛	产地	C _{15,0}	C _{17,0}	C _{19,0}	C _{21,0}	C _{23,0}
金钗石斛	贵州 1	43.17	31.40	8.56	3.27	13.60
	贵州 2	42.32	34.46	7.51	2.77	12.94
	贵州 3	45.50	34.95	6.83	2.72	10.00
	贵州 4	47.85	33.39	6.81	2.53	9.42
	福建	50.13	32.69	5.88	1.60	9.71
	海南 1	46.91	33.93	6.10	2.02	11.03
	海南 2	46.36	33.85	6.74	1.96	11.09
	海南 3	45.06	36.16	6.54	1.73	10.51
	海南 4	43.94	32.80	6.53	2.48	14.26
铁皮石斛	安徽	49.18	23.42	4.29	3.92	19.18
	福建	49.60	27.05	5.07	3.04	15.25
	广西	51.90	26.99	5.11	2.69	13.32
	贵州	49.19	22.74	4.44	3.95	19.67
	云南	49.00	25.53	4.30	3.52	17.66
鼓槌石斛	云南	55.53	25.24	5.07	1.47	12.69

C_{15,0}、C_{17,0}、C_{23,0} 为奇数碳脂肪酸的主要成分, C_{15,0} 和 C_{17,0} 相对丰度的比值 > 2.2, 且 TOCFA 与 C_{TOCFA} 水平介于贵州金钗石斛与铁皮石斛之间。综上, 不同地区的石斛均存在系列奇数碳脂肪酸, 说明石斛中可能存在奇数碳脂肪酸的合成途径。

2.3 与其他兰科植物比较

石斛属于兰科树兰亚科石斛兰族。据统计^[15-16], 中国兰科植物分属 89 属, 1 677 种。Holman 等^[17] 研究表明, 除石斛属外的兰科植物中也有奇数碳脂肪酸存在。

由表 4、表 5 可知, 蓝布正、白芨、柔毛淫羊藿、盘龙参、蝴蝶兰穗和卡特兰假鳞茎中含量最高的奇数碳脂肪酸为 C_{17,0}, 而石斛及其他兰科植物中含量最高的奇数碳脂肪酸为 C_{15,0}。除卡特兰叶子和蓝布正的叶子外, 其他兰科植物中的 C_{15,0}、C_{17,0} 和 C_{23,0} 占 TOCFA 的比例 > 10%, 为奇数碳脂肪酸的主要成分, 总相对丰度占 TOCFA 的 85% 以上。兰科植物中, C_{15,0}、C_{17,0} 和 C_{23,0} 都有可能成为主要奇数碳脂肪酸。石斛茎中的奇数碳脂肪酸含量高于表 4 中大部分兰科植物的, 其中绞股蓝奇数碳脂肪酸的含量最低为 0.5%。

除兰科植物外, 其他少数植物也存在奇数碳脂肪

酸^[18-20]。由表 6 可知,各植物中奇数碳脂肪酸的相对丰度 < 5%,与石斛相比含量较少。其他植物的 C_{15:0} 和 C_{17:0} 的 TOCFA 占比分别为 6%~43%,14%~67%,而石斛的 C_{15:0} 和 C_{17:0} 的 TOCFA 占比分别为 42%~56%,22%~36%。C_{17:0} 在其他植物中含量最高,石斛中含量最高的为 C_{15:0}。光茎栓果菊中主要奇数碳脂肪酸为 C_{19:0},占 TOCFA 的 63%。综上,植物中含有一定量的奇数碳脂肪酸。

除 C_{15:0}、C_{17:0}、C_{19:0} 的抗癌作用外,血浆中奇数链饱和脂肪酸可以在细胞膜中发挥结构作用来降低冠心病和糖尿病的发生风险^[21-22]。Santaren 等^[23] 研究表明,在多种族队列中,血清 C_{15:0} 的含量作为生物标志物与 2 型糖

尿病风险呈负相关。Khaw 等^[24] 研究表明,饱和血浆磷脂脂肪酸(C_{15:0} 和 C_{17:0}) 血浆浓度与冠心病风险呈显著负相关。此外,肥胖症与血清中奇数碳脂肪酸浓度的降低有关^[25]。基于石斛属植物清肝明目、活血化痰、增强机体免疫力、抗肿瘤等药用价值^[26-28],植物中奇数碳脂肪酸的存在也许与其药物活性具有相关性。

3 结论

比较分析了 3 种石斛奇数碳脂肪酸成分及含量。结果表明,石斛中含有系列饱和奇数碳脂肪酸(碳数 7~11),其中 C_{15:0} 含量最多。与其他兰科植物中脂肪酸成分对比发现,含有系列饱和奇数碳脂肪酸是兰科植物的特

表 4 5 种兰科植物奇数碳脂肪酸在 TOCFA 的占比[†]

Table 4 The proportion of OCFA in TOCFA of five orchid species %

植物	TOCFA	C _{15:0} /C _{17:0}	C _{15:0}	C _{17:0}	C _{19:0}	C _{21:0}	C _{23:0}
蓝布正(茎)	2.62	0.26	12.97	48.99	6.98	—	31.06
蓝布正(叶)	2.25	0.16	8.18	50.00	6.13	8.36	27.33
绞股蓝	0.50	1.45	30.68	21.12	—	13.35	34.86
白芨	2.99	0.75	29.77	39.83	4.72	3.41	22.27
柔毛淫羊藿	2.07	0.21	10.97	51.76	—	—	37.26
盘龙参	4.14	0.82	28.72	35.22	1.93	4.42	29.71

† —表示未检出。

表 5 3 种兰科植物奇数碳脂肪酸在 TOFA 的占比^{[18]†}

Table 5 The proportion of OCFA in TOCFA of three orchid species %

植物	部位	TOCFA	C _{15:0} /C _{17:0}	C _{15:0}	C _{17:0}	C _{19:0}	C _{21:0}	C _{23:0}
蝴蝶兰	叶子	4.9	1.3	49.0	38.8	—	—	12.2
	根	9.9	2.2	49.5	22.2	9.1	5.1	14.1
	穗	5.3	0.8	37.7	47.2	—	—	15.1
卡特兰	叶子	4.1	1.0	43.9	43.9	7.3	—	4.9
	根	9.1	1.3	37.4	28.6	11.0	9.9	13.2
	假鳞茎	5.7	0.9	35.1	38.6	8.8	5.3	12.3
兰花	叶和鳞茎	5.0	1.1	42.0	40.0	—	6.0	12.0
	根	7.3	1.3	43.8	34.3	4.1	4.1	13.7

† —表示未检出。

表 6 其他植物奇数碳脂肪酸在 TOCFA 中的占比[†]

Table 6 The proportion of OCFA in TOCFA of other plants %

植物	部位	TOCFA	C _{13:0}	C _{15:0}	C _{17:0}	C _{19:0}	C _{21:0}	C _{23:0}	C _{25:0}
<i>Achillea schischkinii</i> ^[22]	种子	2.68	—	43.28	42.91	—	13.81	—	—
<i>Achillea lycanica</i> ^[22]	种子	1.91	—	26.18	63.87	—	9.95	—	—
<i>Achillea magnifica</i> ^[22]	种子	1.93	—	23.32	66.32	—	10.36	—	—
锯齿叶水丝草 ^[23]	叶子	1.22	—	29.51	37.70	—	5.74	22.13	0.06
光茎栓果菊 ^[24]	全草	3.64	—	6.32	14.84	63.19	6.59	9.07	—
桐花树 ^[9]	叶片	2.18	23.39	38.99	37.61	—	—	—	—

† —表示未检出。

征。后续将系统研究兰科各属植物的奇数碳脂肪酸含量,为奇数碳脂肪酸与兰科植物活性的关联性提供基础数据。

参考文献

- [1] 刘雪. 石斛内生菌的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(14): 166-168.
LIU X. Research progress of endophytic bacteria in dendrobium[J]. China Food Safety Magazine, 2022(14): 166-168.
- [2] AKINWOLE P O, LEFEVRE E, POWELL M J, et al. Unique odd-chain polyenoic phospholipid fatty acids present in chytrid fungi[J]. Lipids, 2014, 49(9): 933-942.
- [3] BHATIA S K, BHATIA R K, YANG Y H. An overview of microdiesel: A sustainable future source of renewable energy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 1 078-1 090.
- [4] CHANG K J L, MANSOUR M P, DUNSTAN G A, et al. Odd-chain polyunsaturated fatty acids in thraustochytrids[J]. Phytochemistry, 2011, 72(11/12): 1 460-1 465.
- [5] 王静, 钟伟, 施佐. 獾油、貂油、貉油的脂肪酸组成及其抗氧化、抑菌性能研究[J]. 中国油脂, 2021, 46(2): 67-71.
WANG J, ZHONG W, SHI Z. Fatty acid composition, antioxidant and antibacterial properties of Meles meles oil, mink oil and raccoon dog oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(2): 67-71.
- [6] BAUMANN E, CHOUINARD P Y, LEBEUF Y, et al. Effect of lipid supplementation on milk odd- and branched-chain fatty acids in dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(8): 6 311-6 323.
- [7] 黄飘平, 崔志民, 唐以杰, 等. 珠海淇澳岛几种红树植物叶片脂肪酸组成比较分析[J]. 现代农业科技, 2019, 15: 137-140.
HUANG P P, CUI Z M, TANG Y J, et al. Comparative analysis on leaf fatty acid composition of several mangrove plants in Qi'ao island of Zhuhai[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, 15: 137-140.
- [8] DOWD M K, FARVE M C. Fatty acid composition of *Tilia* spp. seed oils[J]. Grasas Aceites, 2013, 64(3): 243-249.
- [9] DOWD M K. Identification of the unsaturated heptadecyl fatty acids in the seed oils of *Thespesia populnea* and *Gossypium hirsutum*[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2012, 89(9): 1 599-1 609.
- [10] JENKINS B, WEST J, KOULMAN A. A review of odd-chain fatty acid metabolism and the role of pentadecanoic acid ($C_{15:0}$) and heptadecanoic acid ($C_{17:0}$) in health and disease[J]. Molecules, 2015, 20(2): 2 425-2 444.
- [11] TO N B, NGUYEN Y T, MOON J Y, et al. Pentadecanoic acid, an odd-chain fatty acid, suppresses the stemness of MCF-7/SC human breast cancer stem-like cells through JAK2/STAT3 signaling[J]. Nutrients, 2020, 12(6): 1 663.
- [12] XU C Z, WU P F, GAO J J, et al. Heptadecanoic acid inhibits cell proliferation in PC-9 non-small-cell lung cancer cells with acquired gefitinib resistance[J]. Oncology Reports, 2019, 41(6): 3 499-3 507.
- [13] GAO P, HIRANO T, CHEN Z Q, et al. Isolation and identification of C_{19} fatty acids with anti-tumor activity from the spores of *Ganoderma lucidum* (reishi mushroom)[J]. Fitoterapia, 2012, 83(3): 490-499.
- [14] LIU J, LIU Y A, WANG H T, et al. Direct transesterification of fresh microalgal cells[J]. Bioresource Technology, 2015, 176: 284-287.
- [15] 杨红旗, 李磊, 董薇, 等. 我国石斛植物资源分布及其新品种选育[J]. 中国种业, 2021(12): 14-21.
YANG H Q, LI L, DONG W, et al. Resource distribution and new variety selection of *Dendrobium* in China[J]. China Seed Industry, 2021(12): 14-21.
- [16] DU C, LIAO S, BOUFORD D E, et al. Twenty years of Chinese vascular plant novelties, 2000 through 2019[J]. Plant Diversity, 2020, 42(5): 393-398.
- [17] HOLMAN R T, NICHOLS P C. Characterization of the lipids of some orchids[J]. Phytochemistry, 1972, 11(1): 333-337.
- [18] ZONUZ N, AKPINAR A E, AKPINAR N, et al. Fatty acids of the seed oils of three achillea species[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2020, 56(1): 115-118.
- [19] GILLAN F T, HOGG R W, DREW E A. The sterol and fatty acid compositions of seven tropical seagrasses from North Queensland, Australia[J]. Phytochemistry, 1984, 23(12): 2 817-2 821.
- [20] 张颖, 张赞赞, 巫凯, 等. 广西特色药材光茎栓果菊中脂溶性成分的 GC-MS 分析[J]. 中南药学, 2021, 19(5): 967-969.
ZHANG Y, ZHANG Y Y, WU K, et al. GC-MS analysis of liposoluble components of Guangxi characteristic medicinal materials *Launaea acaulis*[J]. Central South Pharmacy, 2021, 19(5): 967-969.
- [21] HODSON L, SKEAFF C M, FIELDING B A. Fatty acid composition of adipose tissue and blood in humans and its use as a biomarker of dietary intake[J]. Progress in Lipid Research, 2008, 47(5): 348-380.
- [22] WEITKUNAT K, SCHUMANN S, NICKEL D, et al. Odd-chain fatty acids as a biomarker for dietary fiber intake: A novel pathway for endogenous production from propionate[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2017, 105(6): 1 544-1 551.
- [23] SANTAREN I D, WATKINS S M, LIESE A D, et al. Serumpentadecanoic acid ($C_{15:0}$), a short-term marker of dairy food intake, is inversely associated with incident type 2 diabetes and its underlying disorders[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2014, 100(6): 1 532-1 540.
- [24] KHAW K T, FRIESEN M D, RIBOLI E, et al. Plasma phospholipid fatty acid concentration and incident coronary heart disease in men and women: The EPIC-Norfolk prospective study[J]. PLoS Medicine, 2012, 9(7): e1001255.
- [25] AGLAGO E K, BIESSY C, TORRES-MEJA G, et al. Association between serum phospholipid fatty acid levels and adiposity in Mexican women[J]. Journal of Lipid Research, 2017, 58(7): 1 462-1 470.

(下转第 169 页)

- resulted products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021(7): 216-222.
- [13] 叶沁. 鳄鱼里脊抗氧化肽的制备及其生物学功能研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019: 19.
- YE Q. Studies on the preparation and biological functions of antioxidant peptides from crocodile tenderloin [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019: 19.
- [14] LI X. Comparative Study of 1,1-Diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical (DPPH) scavenging capacity of the antioxidant Xanthenes family [J]. Chemistry Select, 2018, 3(46): 13 081-13 086.
- [15] XIE Z J, HUANG J R, XU X M, et al. Antioxidative activity of peptides isolated from alfalfa leaf protein hydrolysate[J]. Food Chemistry, 2008, 111(2): 370-376.
- [16] 干建松. 超声辅助酶解海带蛋白制备抗氧化肽及其活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(5): 64-72.
- GAN J S. Study on preparation of antioxidant peptides from kelp protein by ultrasonic assisted enzymatic hydrolysis and its activity [J]. China Food Additives, 2022, 33(5): 64-72.
- [17] 吴明泽, 王笑, 胡祥昊, 等. 中华圆田螺肉抗氧化肽的分离纯化及小鼠体内外活性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 151-157.
- WU M Z, WANG X, HU X H, et al. Purification of antioxidant peptides from the meat of *Oncomelania sinensis* and its in vivo and in vitro of mice activity[J]. Food & Machinery, 2019, 35(12): 151-157.
- [18] 于智慧, 郭艳, 周丽媛, 等. 双酶酶解驴骨泥工艺优化及酶解液抗氧化性、氨基酸含量分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 60-66.
- YU Z H, GUO Y, ZHOU L Y, et al. The process optimization of Donkey bone mud with double enzyme and analysis of antioxidant activity and amino acid content of the enzymatic hydrolysis solution[J]. Food Research and Development, 2021, 42(11): 60-66.
- [19] 戴妍. 鸡肉寡肽的抗氧化、抗疲劳功能活性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019: 18-19.
- DAI Y. Antioxidant and anti-fatigue functional activities of chicken oligopeptides[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019: 18-19.
- [20] NIELSEN P M, PETERSEN D, DAMMANN C. Improved method for determining food protein degree of hydrolysis [J]. Journal of Food Science, 2001, 66(5): 642-646.
- [21] 史晋源. 甲鱼肽的抗氧化活性与抗疲劳作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 18.
- SHI J Y. Study on the antioxidant activity and anti-fatigue effect of soft-shelled turtle peptides [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 18.
- [22] LIANG J, DENG B, LIU T, et al. Preparation of antioxidant peptides from *Porphyrha haitanensis* via response surface optimization[J]. Food Research and Development, 2020, 41(5): 1-6.
- (上接第 31 页)
- [18] 郑越, 段涛, 宋丹, 等. 六株植物乳杆菌的益生特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10): 119-125.
- ZHENG Y, DUAN T, SONG D, et al. Study on the probiotic characteristics of six strains of *Lactobacillus plantarum*[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(10): 119-125.
- [19] 谢晓娜, 张元秋, 杨郑州, 等. 一株降胆固醇菌株的筛选鉴定及安全性评价[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(3): 19-23, 56.
- XIE X N, ZHANG Y Q, YANG Z Z, et al. Screening, identification and safety evaluation of a cholesterol-lowering strain [J]. China Dairy Industry, 2021, 49(3): 19-23, 56.
- [20] 何宇星, 其其日力格, 刘玮, 等. 潜在益生作用乳酸菌的筛选鉴定及其生物学特性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 50-57, 67.
- HE Y X, QIQRILIGE, LIU W, et al. Screening and identification of potential probiotic lactic acid bacteria and their biological characteristics[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 50-57, 67.
- [21] 王炜哲, 翟征远, 郝彦玲. 市售酸奶中发酵剂乳酸菌的耐药性及耐药基因研究进展[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(2): 34-37.
- WANG W Z, ZHAI Z Y, HAO Y L. Research progress on drug resistance and drug resistance genes of lactic acid bacteria used as starter in commercial yogurt[J]. China Dairy Industry, 2022, 50(2): 34-37.
- (上接第 134 页)
- [26] 赵菊润, 王艺涵, 金艳, 等. 石斛属植物化学成分及药理活性研究进展[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(9): 2 358-2 372.
- ZHAO J R, WANG Y H, JIN Y, et al. Research advances in chemical constituents and pharmacological activities of *Dendrobium* plants[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(9): 2 358-2 372.
- [27] 林君, 黄友琴. 铁皮石斛生物活性成分及产品加工的研究进展[J]. 轻工科技, 2022, 38(2): 21-23, 56.
- LIN J, HUANG Y Q. Research progress on bioactive constituents and product processing of *Dendrobium officinale* [J]. Light Industry Science and Technology, 2022, 38(2): 21-23, 56.
- [28] 唐文文, 夏俊丽, 陈垣. 铁皮石斛茎、叶、花功能性成分、抗氧化活性及其相关性[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 45-50.
- TANG W W, XIA J L, CHEN H. Analysis of functional composition, antioxidant activity and their correlation in stem, leaf and flower from *Dendrobium officinale* [J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 45-50.