

萝卜 (*Raphanus sativus* L.) 种质 菜菔子素含量分析与评价

华贝贝, 邱 杨, 段韞丹, 崔 娜, 张晓辉, 沈 镒, 宋江萍, 李锡香

(中国农业科学院蔬菜花卉研究所/农业部蔬菜作物基因资源与种质创制北京科学观测实验站, 北京 100081)

摘要: 菜菔子素是由萝卜中萝卜甙水解形成的一种异硫氰酸酯类物质, 在植物抗性和人类抗癌方面具有重要作用。本试验利用已优化的 HPLC 检测方法测定了 93 份萝卜种质肉质根的菜菔子素含量, 分析了不同来源地和不同类型萝卜种质菜菔子素含量分布。试验发现不同萝卜种质菜菔子素含量存在显著差异, 其含量分布范围为 34.445 ~ 1446.9 mg/kg · DW, 最高含量约是最低含量的 42 倍; 红皮白肉和绿皮白肉类型的萝卜种质菜菔子素平均含量较高, 华东地区的萝卜种质菜菔子素平均含量显著高于其他来源地的萝卜种质。试验初步获得菜菔子素含量较高的萝卜种质 2 份, 为进一步试验研究提供了良好的材料。

关键词: 萝卜种质; HPLC; 菜菔子素

Analysis and Evaluation Sulforaphene Content in Radish (*Raphanus sativus* L.) Germplasm Resources

HUA Bei-bei, QIU Yang, DUAN Yun-dan, CUI Na, ZHANG Xiao-hui, SHEN Di, SONG Jiang-ping, LI Xi-xiang

(Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Ministry of Agriculture and Research Station
of Vegetable Crop Gene Resource and Germplasm Enhancement, Beijing 100081)

Abstract: Sulforaphene, an isothiocyanate, converted from glucoraphenin in radish, and plays an important role as plant defensive compounds and cancer-preventing agents for humans. In this study, the optimized HPLC method was used to detect the sulforaphene content of fleshy roots among 93 accessions of radish germplasm, and the distribution of sulforaphene content in different origins and different types of radish germplasm was analyzed. The results indicated that the content of sulforaphene among the germplasm was significantly different. The content of sulforaphene ranged from 34.445 mg/kg · DW to 1446.9 mg/kg · DW. The highest content is almost 42 times more than the lowest one. The average content of the red skin white flesh and green skin green flesh radish germplasm was high. The average sulforaphene content of the radish germplasm in the eastern China was higher than those in other regions. Two radish germplasm of high sulforaphene content were screened out, which are good materials for further studies.

Key words: Radish (*Raphanus sativus* L.) germplasm; HPLC; sulforaphene

我国是萝卜的起源演化中心之一, 品种资源十分丰富。萝卜是我国重要的蔬菜作物之一, 栽培面积和总产量均位于各类蔬菜的前 3 位(中国农业统计资料, 2010 年)。萝卜中含有一类重要的次生代

谢物质硫代葡萄糖苷 (glucosinolates, 简称硫甙), 其中萝卜甙 (glucoraphenin) 是萝卜中主要的硫甙^[1-2], 在十字花科蔬菜中, 仅在萝卜中检测到此种硫甙。研究发现, 萝卜甙在黑芥子酶的催化下酶解产生菜

收稿日期: 2013-05-02 修回日期: 2013-06-08 网络出版日期: 2013-10-22

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20131022.1547.028.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑项目 (2013BAD01B04-1); 国家高技术研究发展计划项目 (2012AA021801-4); 农业部保种项目 (NB2012-2130135-28); 农业部园艺作物生物学与种质创制重点实验室

第一作者研究方向为蔬菜种质资源学。E-mail: huabeibei2006@126.com

通信作者: 李锡香, 研究方向为蔬菜种质资源学。E-mail: lixx0612@163.com

菔子素 (sulforaphene, 4-甲基亚磺酰基-3-丁烯基异硫氰酸酯), 莱菔子素具有重要的生物活性, 在抗氧化、抗细胞突变、抗癌以及植物抗菌除草等方面起重要作用^[3-9]。因此, 研究萝卜种质资源中莱菔子素含量及其变化规律、筛选具有高莱菔子素含量的萝卜种质, 对于开展萝卜品质育种和开发萝卜功能性产品研究具有重要意义。

目前关于萝卜中莱菔子素提取和检测已有初步报道^[10-11], 但对于萝卜种质资源中莱菔子素含量及其变化规律的研究较少。本试验对已报道的莱菔子素提取和检测方法加以优化, 并评价不同来源地和类型的萝卜种质莱菔子素含量的分布状况, 以期筛选出优异的萝卜资源, 为萝卜品质育种以及莱菔子素代谢组学研究提供材料。

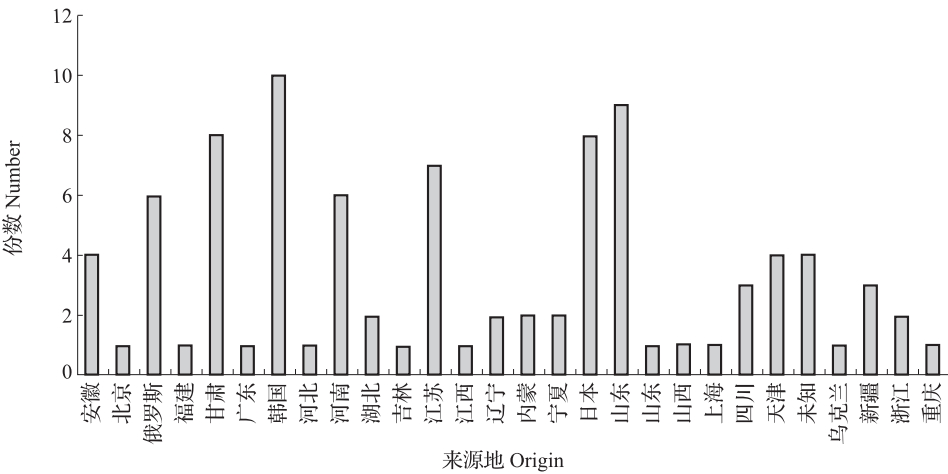


图 1 93 份萝卜种质资源来源地分布

Fig. 1 Origin distribution of 93 accessions of radish

1.2 莱菔子素的提取方法

准确称取每份萝卜种质的冻干粉末 0.2000 g, 重复 2 次, 按照优化的提取方法, 加入 3 mL pH = 5 磷酸缓冲液混合均匀, 酶解 1 h; 然后加入 30 mL 乙酸乙酯萃取 30 min, 6000r/min 离心 3 min, 取上清有机相, 重复萃取 2 次; 合并萃取液, 利用旋转蒸发仪, 在 35℃ 温度下浓缩蒸干, 提取物利用甲醇溶出, 并按甲醇: 水 = 7: 3 (V/V) 的溶液定容至 2 mL, 提取液过 0.22 μm 滤膜, 利用 HPLC 分析其含量。

1.3 HPLC 检测方法

1.3.1 色谱条件 利用岛津 LC-10AT 高效液相色谱仪, 反相 C18 (250 mm × 2 mm, 5 μm) 色谱柱, SPD-10A_{VP} 紫外检测器, 以甲醇: 水 = 3: 7 混合液为流动相进行洗脱, 柱温 40℃, 流速 0.3 mL/min, 进样量 4 μL, 紫外检测波长为 245 nm。

1 材料与方法

1.1 试验材料

从国家蔬菜种质资源中期库收集保存的萝卜种质资源中挑选不同来源和类型的萝卜种质, 经过自交获得低代自交系 93 份。其中 64 份来源于我国山东、江苏、甘肃、河南等 23 个省、市、自治区, 25 份来源于韩国、日本、俄罗斯和乌克兰 4 个国家 (图 1)。从图 1 可以看出, 所选材料来源地分布广泛、代表性较强。2011 年秋将所有材料直播于中国农业科学院廊坊试验基地, 每份材料种植 10 株, 成熟后每个品种选取 3 个肉质根, 利用四分法混合取样, 将肉质根切片后真空冷冻干燥, 粉碎成粉末后冷藏保存, 用于莱菔子素含量的分析。

1.3.2 标准曲线的绘制 将 10 mg 莱菔子素标准品溶于 10 mL 甲醇中, 配制成 1000 μg/g 的标准储备液, 放于 -20℃ 的冰箱备用。分别配置 5 μg/g、10 μg/g、25 μg/g、50 μg/g、75 μg/g、100 μg/g、150 μg/g、200 μg/g 标准溶液, 用 HPLC 检测分析, 以目标峰峰面积和浓度制作莱菔子素的标准曲线。根据标准曲线求出样品中莱菔子素的浓度并计算其含量。

1.4 方法重复性试验

准确称取同一份肉质根样品粉末 6 份, 按上述 1.2 中的提取方法提取莱菔子素, 并利用 HPLC 测定莱菔子素的含量, 检验提取和检测方法的重复性和稳定性。

1.5 统计分析

利用 SAS9.1 软件分析萝卜种质莱菔子素含量, 并进行方差分析; 利用 DPS 软件根据莱菔子素含量进行种质的聚类分析。

2 结果与分析

2.1 HPLC 检测方法的确定

2.1.1 分析方法的适应性及目标峰的确定 利用优化的提取和检测方法获得质量较好的莱菔子素色

谱图(图 2),由图 2 可见莱菔子素的保留时间为 10.409 min,样品中莱菔子素的色谱峰与标准品的色谱峰符合度良好,且目标峰与其他峰分离度良好,附近没有杂质峰干扰。

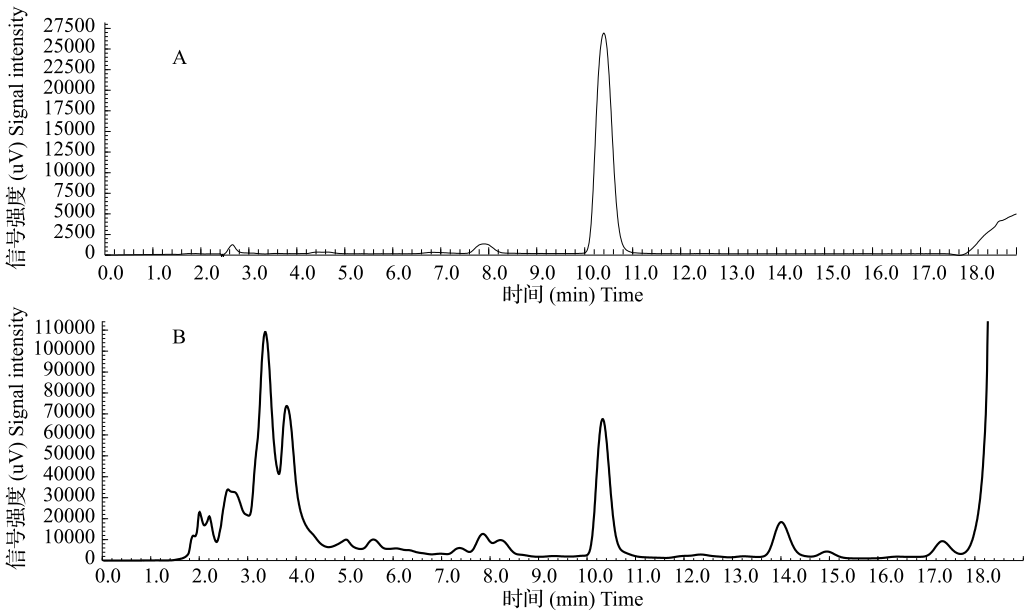


图 2 标准品(A)及样品(B)中莱菔子素的 HPLC 色谱图

Fig. 2 Chromatograms of sulforaphene standard (A) and radish fleshy root (B)

2.1.2 标准曲线的绘制 以峰面积为横坐标,莱菔子素浓度为纵坐标,制作莱菔子素定量分析的标准曲线(图 3)。得回归方程 $y = 1.242317e - 0.04X + 8.814415e - 0.02$ ($R^2 = 0.9996$)。说明莱菔子素浓度在 5 ~ 200 $\mu\text{g/mL}$ 内线性关系良好。

2.2 方法的重复性

同一份萝卜样品重复提取 6 次,其含量的相对标准偏差为 2.037%,说明分析方法的重复性和稳定性良好,适宜于萝卜种质莱菔子素的提取和检测。

2.3 93 份萝卜种质莱菔子素含量分析

93 份萝卜种质的莱菔子素含量分布为 34.445 ~

1446.9 $\text{mg/kg} \cdot \text{DW}$,平均含量为 315.546 $\text{mg/kg} \cdot \text{DW}$,变异系数为 77.7%。方差分析显示不同种质间莱菔子素含量差异显著,最高含量是最低含量的 42 倍(表 1)。在 93 份萝卜种质中,莱菔子素含量呈偏态分布,在 69.694 ~ 191.109 $\text{mg/kg} \cdot \text{DW}$ 含量区段内的萝卜种质数量分布较多,占总测定份数的 37.63%,而含量较高的材料较少(图 4)。93 份资源中,红皮白肉萝卜 L11Q - 658 和绿皮绿肉萝卜 LX11Q - 35 的莱菔子素含量较高。其中红皮白肉萝卜 L11Q - 658 含量最高,为 1446.9 $\text{mg/kg} \cdot \text{DW}$,比平均含量高出近 4 倍。

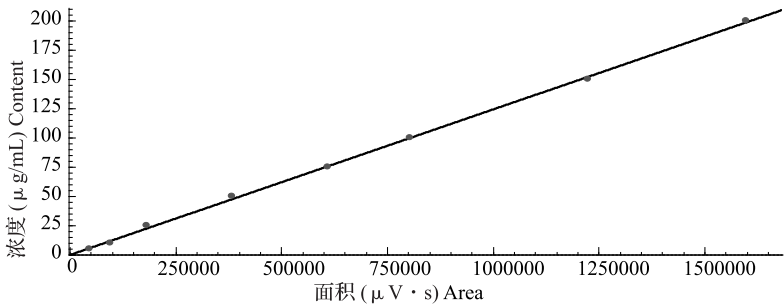


图 3 标准曲线

Fig. 3 Linearity quotation of standards

表 1 93 份萝卜种质莱菔子素含量

Table 1 Sulforaphene content of 93 accessions of radish freshy roots

田间编号	含量 (mg/kg · DW)	类型	来源	行政分区	田间编号	含量 (mg/kg · DW)	类型	来源	行政分区
Accession	Content	Type	Origin	Region	Accession	Content	Type	Origin	Region
11Q0049	213. 95	白皮白肉	浙江	华中	L11Q - 558	168. 2	白皮白肉	辽宁	东北
11Q0052	131. 465	绿皮绿肉	天津	华北	L11Q - 572	327. 575	白皮白肉	甘肃	西北
11Q0061	293. 3	白皮白肉	上海	华东	L11Q - 598	445. 175	白皮白肉	山东	华东
11Q0062	324. 815	紫皮白肉	江苏	华东	L11Q - 648	441. 95	红皮白肉	安徽	华东
11Q0075	226. 05	白皮白肉	四川	西南	L11Q - 658	1446. 9	红皮白肉	安徽	华东
11Q0122	482. 4	白皮白肉	湖北	华中	L11Q - 678	607. 9	绿皮白肉	河南	华中
11Q0125	187. 485	紫皮白肉	福建	华东	L11Q - 709	728. 7	绿皮白肉	河南	华中
11Q0137	121. 6	白皮白肉	四川	西南	L11Q - 716	91. 3	绿皮白肉	河南	华中
11Q0160	283. 335	紫皮白肉	甘肃	西北	L11Q - 723	122. 65	绿皮白肉	河南	华中
11Q0183	185. 84	绿皮绿肉	吉林	东北	L11Q - 735	474. 5	绿皮红肉	甘肃	西北
11Q0186	142. 28	紫皮白肉	江苏	华东	L11Q - 743	677. 4	绿皮白肉	陕西	西北
11Q0261	130. 73	绿皮绿肉	甘肃	西北	L11Q - 769	463. 8	红皮白肉	宁夏	西北
11Q0264	82. 67	紫皮白肉	甘肃	西北	L11Q - 778	111. 5	红皮白肉	四川	西南
11Q0320	611. 9	绿皮白肉	河南	华中	L11Q - 804	176. 15	白皮白肉	山东	华东
11Q0390	543. 75	白皮白肉	江苏	华东	L11Q - 842	369. 92	红皮白肉	北京	华北
11Q0443	638. 105	绿皮白肉	山东	华东	L11Q - 87	143. 6	白皮白肉	韩国	
11Q0531	130. 3	白皮白肉	浙江	华中	L11Q - 905	104. 68	红皮白肉	未知	
11Q0549	437. 35	白皮白肉	江苏	华东	L11Q - 932	139. 88	白皮白肉	未知	
11Q0571	125. 4	白皮白肉	广东	华南	L11Q - 948	253. 3	绿皮绿肉	山东	华东
11Q0590	177. 4	绿皮白肉	新疆	西北	LX11Q - 124	115. 15	绿皮绿肉	河南	华中
11Q0666	280. 05	红皮白肉	辽宁	东北	LX11Q - 131	96. 55	绿皮绿肉	山东	华东
11Q0777	149. 175	绿皮绿肉	江苏	华东	LX11Q - 142	414. 2	绿皮绿肉	山东	华东
11Q0835	542. 65	紫皮白肉	安徽	华东	LX11Q - 147	213. 6	绿皮绿肉	天津	华北
11Q1084	376. 75	绿皮红肉	江苏	华东	LX11Q - 17	416. 105	绿皮绿肉	河北	华北
11Q1229	713. 855	白皮白肉	湖北	华中	LX11Q - 27	281. 4	绿皮绿肉	天津	华北
CG11Q - 183	772. 18	绿皮红肉	山东	华东	LX11Q - 33	691. 79	绿皮绿肉	天津	华北
HX11Q - 14	250. 54	绿皮红肉	山东	华东	LX11Q - 35	998. 5	绿皮绿肉	安徽	华东
HX11Q - 29	710. 5	绿皮红肉	山东	华东	YS11Q - 79	234. 06	野生根	日本	
HX11Q - 70	246. 51	紫皮紫肉	重庆	西南	YT11Q - 102	114. 27	樱桃	乌克兰	
HX11Q - 84	111. 005	绿皮红肉	未知		YT11Q - 107	115. 21	樱桃	俄罗斯	
HX11Q - 86	179. 925	绿皮红肉	未知		YT11Q - 109	66. 195	樱桃	新疆	西北
HX11Q - 89	334. 08	紫皮紫肉	甘肃	西北	YT11Q - 115	60. 98	樱桃	新疆	西北
HX11Q - 90	232. 06	紫皮紫肉	甘肃	西北	YT11Q - 12	238. 905	樱桃	江苏	华东
KN11Q - 15	360. 9	白皮白肉	江西	华中	YT11Q - 162	34. 445	樱桃	俄罗斯	
L11Q - 143	161. 515	白皮白肉	韩国		YT11Q - 19	569. 46	樱桃	甘肃	西北
L11Q - 17	189. 25	白皮白肉	韩国		YT11Q - 5	94. 47	樱桃	俄罗斯	
L11Q - 171	235. 905	白皮白肉	日本		YT11Q - 7	103. 065	樱桃	俄罗斯	
L11Q - 181	501. 585	绿皮白肉	内蒙	华北	YT11Q - 84	828. 29	樱桃	俄罗斯	
L11Q - 192	341. 305	绿皮白肉	内蒙	华北	YT11Q - 86	165. 54	樱桃	俄罗斯	
L11Q - 230	319. 705	白皮白肉	韩国		YT11Q - 93	667. 57	樱桃	宁夏	西北
L11Q - 320	145. 225	白皮白肉	韩国		ZP11Q - 100	203. 2	樱桃	日本	
L11Q - 334	326. 9	白皮白肉	韩国		ZP11Q - 102	196	樱桃	日本	
L11Q - 378	624. 185	白皮白肉	韩国		ZP11Q - 120	174. 1	黑萝卜	日本	
L11Q - 411	369. 14	白皮白肉	韩国		ZP11Q - 68	67. 21	黑萝卜	日本	
L11Q - 423	126. 365	白皮白肉	韩国		ZP11Q - 71	59. 05	黑萝卜	日本	
L11Q - 434	158. 33	白皮白肉	韩国		ZP11Q - 75	110. 15	黑萝卜	日本	
L11Q - 494	210. 375	绿皮白肉	山西	华北					

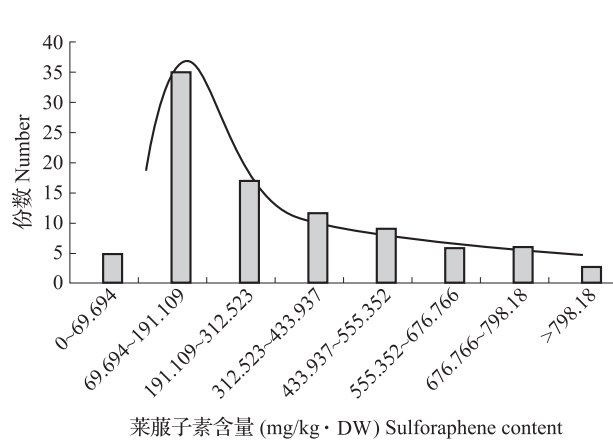


图 4 不同区段莱菔子素含量的萝卜种质频次分布图

Fig. 4 The distribution histogram of radish germplasm accession with certain sulforaphene content

以 93 份萝卜种质莱菔子素含量为基础,通过 DPS 软件进行聚类分析,在距离 0.77 附近,可将供试资源分为 5 个类群(图 5)。第 I 类群莱菔子素含量偏低,含量在 34.445 ~ 376.75 mg/kg · DW 之间,包含 67 份资源。第 II 和 III 类群莱菔子素含量较高,含量分别为 414.2 ~ 501.585 mg/kg · DW、542.65 ~ 828.29 mg/kg · DW,分别包含 9、15 份资源。第 IV 类和第 V 类群含量偏高,各包含 1 份种质,其莱菔子素含量分别为 998.5 mg/kg · DW 和 1446.9 mg/kg · DW。

2.4 不同来源地萝卜种质莱菔子素含量分布

按照不同来源地,将 93 份萝卜种质划分为国内种质和国外种质 2 大类。大多数国外萝卜种质莱菔子素含量相对较低,但也有少数含量较高的种质,而且来源于东欧俄罗斯和乌克兰的种质含量变异幅度高于东亚日本和韩国的种质。依据行政区划,将来源地区明确的 63 份国内种质划分为东北、华东、华中、华北、西南及西北 6 大类。分析结果表明,华东和华中地区来源的萝卜种质莱菔子素平均含量明显高于其他来源地的萝卜种质;华东萝卜种质的莱菔子素含量极差最大,由变异系数和标准差反映的变异程度最高,尤其是在来源于安徽和山东的萝卜种质中出现高含量种质的频率较高。华北和西北地区种质的含量相对较高,但是就含量变异幅度而言,华中和西北地区种质的含量变幅高于华北。东北和西南地区地区的萝卜种质莱菔子素含量及其变幅较低。

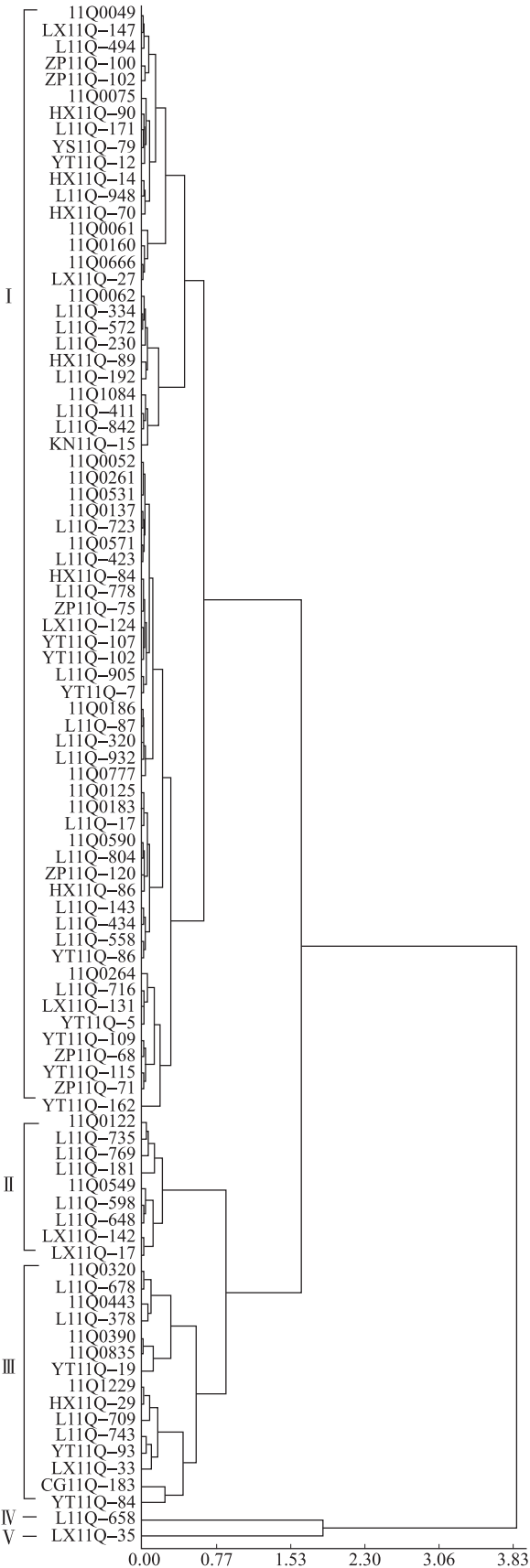


图 5 93 份萝卜资源莱菔子素含量聚类图

Fig. 5 Cluster tree diagram based on sulforaphene content of 93 accessions of radish germplasm

表 2 不同来源地萝卜资源莱菔子素含量的分布

Table 2 Sulforaphene content distribution of radish germplasm from different origins

来源地	份数	平均值	最高值	最低值	极差	变异系数	标准差
Origin	Number	(mg/kg · DW)	(mg/kg · DW)	(mg/kg · DW)	(mg/kg · DW)	CV	SD
		Average	Max.	Min.	Pole		
东北	3	211. 363	280. 050	168. 200	111. 850	28. 451	60. 135
华北	9	350. 838	691. 790	131. 460	560. 330	48. 873	171. 464
华东	25	423. 426	1446. 900	96. 550	1350. 350	72. 975	308. 995
西北	14	324. 840	677. 400	60. 980	616. 420	66. 592	216. 318
华中	8	434. 232	728. 700	91. 300	637. 400	64. 284	279. 143
西南	4	176. 415	246. 510	111. 500	135. 010	39. 538	69. 751
俄罗斯和乌克兰	7	207. 899	828. 290	34. 445	793. 845	132. 891	276. 279
韩国和日本	18	213. 549	624. 185	59. 050	565. 135	62. 137	132. 693

2.5 不同类型萝卜种质莱菔子素分布

供试材料分属大萝卜 (*Raphanus sativus* L. var. *longipinnatus* Bailey)、樱桃萝卜 (*Raphanus sativus* L. var. *radiculus* Pers.) 和黑萝卜 (*Raphanus sativus* L. var. *niger* J. Kern) 3 个变种。根据肉质根皮色和肉色将参试大萝卜种质分为 8 类(表 3)。由表 3 可以看出,极端高含量的种质仅在红皮白肉和绿皮绿肉类型的萝卜种质中出现。含量最高的红皮白肉萝卜种质的出现,使得红皮白肉类型的萝卜莱菔子素平均含量最高,为 459. 829 mg/kg · DW。在绿皮白肉萝卜和

绿皮红肉萝卜种质中第Ⅲ及以上类群种质所占比例较高,所以平均含量较高,分别为 428. 056 mg/kg · DW 和 410. 771 mg/kg · DW。绿皮绿肉种质中虽然出现少数较高含量的第Ⅳ类群种质,但因在第Ⅰ、Ⅱ类群中所占比例较大,其平均含量并不高,仅为 313. 677 mg/kg · DW。在白皮白肉、紫皮白肉和樱桃萝卜种质中第Ⅰ类群种质较多,因此其平均含量较低。另外,紫皮紫肉萝卜和黑萝卜仅分布于第Ⅰ类群中,其莱菔子素含量亦较低,尤其是黑萝卜的莱菔子素平均含量最低,仅为 102. 628 mg/kg · DW。

表 3 不同类型萝卜种质莱菔子素含量的分布

Table 3 Sulforaphene content distribution of different types of radish germplasm

类型	平均含量	Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类群比例	第Ⅰ类群	第Ⅱ类群	第Ⅲ类群	第Ⅳ类群	第Ⅴ类群	总份数
Type	(mg/kg · DW)	(%) Percentage	Group I	Group II	Group III	Group IV	Group V	Total
	Average contain	of group Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ						
白皮白肉	285. 406	11. 1	21	3	3	0	0	27
红皮白肉	459. 829	12. 5	5	2	0	0	1	8
绿皮白肉	428. 056	45. 5	5	1	5	0	0	11
绿皮红肉	410. 771	28. 6	4	1	2	0	0	7
绿皮绿肉	313. 677	15. 4	9	2	1	1	0	13
紫皮白肉	260. 539	16. 7	5	0	1	0	0	6
紫皮紫肉	270. 883	0	3	0	0	0	0	3
黑萝卜	102. 628	0	4	0	0	0	0	4
樱桃萝卜	246. 971	21. 5	11	0	3	0	0	14
总计	312. 523	18. 3	67	9	15	1	1	93

3 讨论

因 HPLC 检测费用较高,本试验对每份种质的分析仅设了 2 次重复。但是,本研究利用已优化的莱菔子素提取和检测方法,基于样品和标准莱菔子素进行了稳定性试验,发现该方法的稳定性和可重

复性良好,说明本研究结果是可靠的。此方法适宜于萝卜种质莱菔子素准确定量。

本试验首次对萝卜种质资源莱菔子素含量进行了大规模的评价,不同萝卜种质的莱菔子素含量分布范围广泛,差异显著。尽管莱菔子素含量低的萝卜资源所占比例较多,但也出现了少数含量较高的

稀有种质,为进一步开展萝卜功能性组分研究和萝卜种质创新提供了优异材料。

从来源地看,在现有分析的材料中,我国高莱菔子素含量种质较多,华东、华中、西北和华北地区是我国萝卜品种类型比较丰富的地区,这些地区萝卜种质不仅莱菔子素的平均含量较高,而且变异幅度较大。环境条件是影响植物中硫甙含量的一个重要因素,温度、日照长短及强度、土壤条件都会引起植物中硫甙含量的变化^[12-14]。同时莱菔子素作为一种异硫氰酸酯类物质,是影响萝卜口感的重要成分^[15],因此,人们对于萝卜口感的偏好性也可能导致不同地区萝卜种质莱菔子素含量的差异。就类型而言,在本研究中,紫皮紫肉和黑皮白肉类型萝卜莱菔子素含量较低,其他类型的萝卜种质含量较高。这些信息为优质萝卜种质的筛选提供了指导,但是,不同来源地和不同类型萝卜种质莱菔子素含量的变异规律有待于在更广泛的萝卜种质资源中进行分析验证。

参考文献

[1] 李秋云,戴绍军,陈思学,等. 萝卜芥子油苷组分及含量的分析[J]. 园艺学报,2008,35(8):1205-1208

[2] Malik M S,Riley M B,Norsworthy J K,et al. Variation of Glucosinolates in Wild Radish(*Raphanus raphanistrum*) Accessions[J]. J Agric Food Chem,2010,58(22):11626-11632

[3] Shishu,Kaur I P. Inhibition of cooked food-induced mutagenesis by dietary constituents;Comparison of two natural isothiocyanates[J]. Food Chem,2009,112(4):977-981

[4] O'Hare T J,Wong L S,Force L E. Glucosinolate Composition and Anti-Cancer Potential of Daikon and Radish Sprouts[J]. Inter Soc

Hort Sci,2008,237-243

[5] O'Hare T J,Williams D J,Zhang B,et al. Radish sprouts versus broccoli sprouts;A comparison of anti-cancer potential based on glucosinolate breakdown products[J]. Acta Hort,2009,841:187-192

[6] Martinez-Villaluenga C,Peñas E,Ciska E,et al. Time dependence of bioactive compounds and antioxidant capacity during germination of different cultivars of broccoli and radish seeds[J]. Food Chem,2010,120:710-716

[7] Malik M S,Norsworthy J K,Culpepper A S,et al. Use of wild radish(*Raphanus raphanistrum*) and rye cover crops for weed suppression in sweet corn[J]. Weed Sci,2008,56:588-595

[8] 王楠,沈莲清. 蔬菜种子中 5 种异硫代氰酸酯类化合物对人肺癌细胞抑制作用的研究[J]. 中国食品学报,2010,10(4):67-72

[9] 赵功玲,郝睿,由宏,等. 8 种萝卜籽油的组成与抗氧化活性[J]. 中国油脂,2011,36(12):73-76

[10] 沈莲清,王楠,王奎武. 响应面分析法优化萝卜种子中硫代葡萄糖苷的酶解条件[J]. 中国食品,2010(10):110-115

[11] Kuang P,Song D,Yuan Q,et al. Separation and purification of sulforaphene from radish seeds using macroporous resin and preparative high-performance liquid chromatography[J]. Food Chem,2013,136(2):342-347

[12] Pérez-Balibrea S,Moreno D A,García-Viguera C. Influence of light on health-promoting phytochemicals of broccoli sprouts[J]. J Sci Food Agr,2008,88(5):904-910

[13] Charron C S,Sams C E. Glucosinolate content and myrosinase activity in rapidecycling *Brassica oleracea* grown in a controlled environment[J]. J Am Soc Hort Sci,2004,129:321-330

[14] Pereira F M V,Rosa E,Fahey J W,et al. Influence of temperature and ontogeny on the levels of glucosinolates in broccoli(*Brassica oleracea* var. *italica*) sprouts and their effect on the induction of mammalian phase 2 enzymes[J]. J Agric Food Chem,2002,50(21):6239-6244

[15] Coogan R C,Wills R B H,Nguyen V Q. Pungency levels of white radish(*Raphanus sativus* L.) grown in different seasons in Australia[J]. Food Chem,2001,72(1):1-3