

# 芥蓝不同器官主要营养成分分析

孙 勃, 方 莉, 刘 娜, 闫会转, 张雅君, 施倩倩, 汪俏梅\*

(浙江大学园艺系, 农业部园艺植物生长发育与生物技术重点开放实验室, 杭州 310029)

**摘 要:** 选择典型的芥蓝品种为材料, 分析不同器官可溶性固形物、还原糖、可溶性蛋白、叶绿素、类胡萝卜素、维生素 C 和总多酚含量, 以及抗氧化能力、芥子油苷组分和含量的差异。结果表明: 芥蓝不同器官间营养成分的含量差异显著, 总体上花序中的总多酚、维生素 C 和可溶性固形物含量显著高于其它器官; 叶片中的叶绿素、类胡萝卜素、可溶性蛋白和抗氧化能力均显著高于其它器官; 根系中的芥子油苷, 特别是苯乙基芥子油苷和 4-甲基硫丁基芥子油苷的含量均显著高于其它器官。芥蓝不同品种间产品器官花茎的营养价值差异显著, 如‘JL-02’的总多酚含量和抗氧化能力明显高于其它品种, ‘登峰中迟’的 4-甲基硫氧丁基芥子油苷和总芥子油苷含量明显高于其它品种。

**关键词:** 芥蓝; 品种; 器官; 营养成分; 芥子油苷

**中图分类号:** S 635

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2011) 03-0541-08

## Studies on Main Nutritional Components of Chinese Kale Among Different Organs

SUN Bo, FANG Li, LIU Na, YAN Hui-zhuan, ZHANG Ya-jun, SHI Qian-qian, and WANG Qiao-mei\*

(Department of Horticulture, Zhejiang University, Key Laboratory of Horticultural Plant Growth, Development and Quality Improvement, Ministry of Agriculture, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** The variation of the contents of soluble solids, reducing sugars, soluble proteins, chlorophyll, carotenoids, vitamin C, and total phenols, as well as antioxidant capacities and glucosinolate profiles among different organs were investigated using Chinese kale (*Brassica alboglabra* Bailey) of typical varieties as material. The results showed that the contents of nutrients exhibited remarkable differences among different organs. In general, the highest contents of total phenols, vitamin C and soluble solids were found in inflorescences, and the significant differences existed between inflorescences and other organs. The contents of chlorophyll, carotenoids, soluble proteins and antioxidant capacities in leaves were remarkably higher than those in other organs. The roots contained markedly higher concentrations of glucosinolates, especially gluconasturtiin and glucoerucin, than those in other organs. Great differences in the nutrition value of bolting stem, the edible part of Chinese kale were observed among different varieties. JL-02 had the highest amounts of total phenols and antioxidant capacities. The significantly higher level of glucoraphanin and total glucosinolates was found in Dengfengzhongchi.

**Key words:** Chinese kale; variety; organ; nutrient; glucosinolate

收稿日期: 2010-11-03; 修回日期: 2011-02-21

基金项目: 国家‘863’计划项目(2008AA10Z111); 国家自然科学基金项目(30370974); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-05-0516); 教育部霍英东基金优选资助课题(104034)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: qiaomeiw@zju.edu.cn)

芥蓝 (*Brassica albograbra* Bailey) 主要以花薹为产品器官, 在广东、福建等省广泛栽培 (张海峰, 2006)。芥蓝具有很高的营养价值, 含有丰富的维生素、矿物质和芥子油苷等, 特别是维生素 C 含量很高 (何洪巨 等, 2002; 张慎好 等, 2004; 张海峰, 2006)。目前对芥蓝花薹的营养品质已有初步研究, 但有些仅是对于单一品种的研究 (陈新娟 等, 2006; La et al., 2009), 有些则仅是对几个品种的常规营养成分的分析 (张慎好 等, 2004), 对与芥蓝的保健功效密切相关的因子, 如多酚, 抗氧化能力和芥子油苷等的研究较少, 对芥蓝产品器官花薹之外的其它器官的主要营养成分和芥子油苷等的分析尚未见报道。本试验中以在熟性和花色上具有典型性的 6 个芥蓝品种为材料, 研究食用器官花薹和其它器官中各种营养成分组分和含量的差异, 以期全面地了解芥蓝的营养价值, 从综合利用的角度, 为芥蓝生产中的废弃器官利用提供参考, 为芥蓝栽培中品种选择提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料处理

选取了在熟性、开花特性等农艺性状上具有典型性的 6 个芥蓝品种为试材, 分别为 JL-02 (早熟, 白花)、JL-07 (早熟, 白花)、JL-08 (早熟, 白花)、JL-16 (中熟, 白花)、JL-22 (晚熟, 黄花) 和 JL-25 (极晚熟, 白花)。其中 JL-16 是生产上主栽常规品种 ‘登峰中迟’, 其余 5 个品种都是本单位选育的自交系。所有品种于 2007 年 9 月 25 日在浙江大学蔬菜研究所播种育苗, 4 周后定植于塑料大棚, 每个品种种植 50 株, 行距 50 cm, 株距 40 cm。当花薹成熟, 即达到 “齐口花” 状态时, 每个品种各挑选生长健壮、成熟度一致、无病虫害及机械损伤的植株进行整株采收, 每 5 株作为一个重复, 共 3 个重复。将植株按照花序、花薹、叶片、叶柄和根 5 个器官进行分割, 清洗和取样。一部分材料作为鲜样直接用于测定含水量、可溶性固形物、叶绿素、类胡萝卜素和维生素 C, 另一部分真空冷冻干燥后粉碎,  $-80^{\circ}\text{C}$  保存以备用于其它指标测定。

### 1.2 测定方法

含水量用烘干减重法测定; 可溶性固形物用手持阿贝折射仪测定; 还原糖含量用 3,5 - 二硝基水杨酸比色法测定; 可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝法测定; 叶绿素和类胡萝卜素用分光光度法测定。

维生素 C 含量的测定: 参照 Nisperos-Carriedo 等 (1992) 的方法并加以改进: 称取 2 g 鲜样加入草酸溶液研磨, 残渣用草酸溶液洗涤, 合并滤液, 用草酸溶液定容到 25 mL, 离心, 吸取上清液用于 HPLC 分析, 通过标准曲线计算样品的维生素 C 含量。

总多酚含量的测定: 参照 Volden 等 (2009) 的方法并加以改进: 称取适量冻干粉加入乙醇, 水浴 1 h, 离心, 吸取上清作为多酚提取液。取提取液 0.3 mL 加入 Folin-Ciocalteu's 溶剂和碳酸钠溶液, 静置 2 h, 760 nm 波长测量吸光值。通过标准曲线计算样品的多酚含量。

抗氧化能力的测定: 参照 Benzie 和 Strain (1996) 的 FRAP 方法并加以改进: 称取适量冻干粉加入乙醇, 研磨后定容至 25 mL, 水浴 1 h, 离心, 吸取上清液作为提取液。提取液中加入 FRAP 工作液, 水浴 10 min, 593 nm 波长测吸光值, 通过标准曲线计算样品的抗氧化能力。

芥子油苷组分和含量的测定: 参照 Xu 等 (2006) 的方法并加以改进: 称取 0.1 g 冻干粉加入 5 mL ddH<sub>2</sub>O 沸水浴 10 min, 离心, 吸出上清液, 将提取液通过 DEAE-Sephadex 柱吸附, 洗脱, 得到纯化样品。将纯化样品过滤, 进行 HPLC 分析, 以 oNPG 为内标 (响应因子为 0.7), 以内标法计算芥子油苷的含量。HPLC 条件: C18 反相色谱柱, 检测波长为 226 nm, 流速为  $1.0\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

取 3 次重复的平均值, 均采用 Excel2003 和软件 dps 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 可溶性固形物、还原糖和可溶性蛋白含量

芥蓝各品种均以花序的可溶性固形物含量最高，其次是叶片和花薹，最低的是叶柄；晚熟品种‘JL-22’和极晚熟品种‘JL-25’的含量显著高于其它品种，‘JL-02’品种最低（表 1）。芥蓝花薹和叶柄的还原糖含量最高（‘JL-08’除外），其次是花序，最低的是叶片和根；‘JL-25’花薹的含量最高，为 337.26 mg·g<sup>-1</sup>DW，而含量最低的‘JL-07’根仅为 57.59 mg·g<sup>-1</sup>DW；早熟品种含量均较低。可溶性蛋白在芥蓝叶片和花序中的含量明显高于其它器官，各品种的试验结果均一致。

表 1 芥蓝含水量、可溶性固形物、还原糖和可溶性蛋白的含量  
Table 1 Contents of water content, soluble solids, reducing sugars and soluble proteins of Chinese kale

品种 Variety	器官 Organ	含水量/% Water content	可溶性固形物/% Soluble solids	还原糖/(mg·g <sup>-1</sup> DW) Reducing sugars	可溶性蛋白/(mg·g <sup>-1</sup> DW) Soluble proteins
JL-02	花序 Inflorescences	89.27 ij	12.3 d	168.09 ijk	50.67 f
	花薹 Bolting stems	93.02 d	5.0 l	207.42 g	27.37 ghi
	叶片 Leaves	90.44 efghi	6.2 ij	98.55 op	63.73 e
	叶柄 Petioles	94.65 ab	3.2 n	249.32 ef	20.03 ijk
	根 Roots	86.00 mno	-	74.45 pq	32.87 ghi
JL-07	花序 Inflorescences	87.05 lm	11.9 d	147.09 klm	48.53 f
	花薹 Bolting stems	91.04 ef	6.7 hi	234.35 f	17.37 jk
	叶片 Leaves	90.53 efgh	8.4 g	63.54 q	84.03 c
	叶柄 Petioles	94.27 abc	3.6 mn	177.92 hij	16.03 k
	根 Roots	85.61 no	-	57.59 q	25.40 ghij
JL-08	花序 Inflorescences	85.25 op	13.4 c	201.22 gh	94.77 ab
	花薹 Bolting stems	93.42 cd	5.9 jk	271.11 de	33.50 g
	叶片 Leaves	90.15 fghi	8.2 g	69.31 q	62.07 e
	叶柄 Petioles	94.88 a	3.9 m	161.71 jkl	16.33 k
	根 Roots	84.25 pq	-	67.33 q	18.53 jk
JL-16	花序 Inflorescences	87.63 kl	11.8 d	190.12 ghi	86.67 bc
	花薹 Bolting stems	93.64 bcd	6.3 ij	325.89 ab	24.13 hijk
	叶片 Leaves	91.02 efg	7.2 h	138.94 lmn	97.20 a
	叶柄 Petioles	94.84 a	3.6 mn	309.55 bc	15.93 k
	根 Roots	85.26 op	-	121.88 no	16.97 jk
JL-22	花序 Inflorescences	81.90 rs	14.1 b	183.54 ghij	78.07 cd
	花薹 Bolting stems	86.69 lmn	8.1 g	300.89 c	28.37 ghi
	叶片 Leaves	86.06 m-o	10.8 e	130.31 mn	83.33 c
	叶柄 Petioles	89.83 ghi	6.5 ij	285.27 cd	23.40 hijk
	根 Roots	80.97 s	-	133.53 mn	22.57 hijk
JL-25	花序 Inflorescences	84.01 q	15.8 a	180.04 hij	79.40 cd
	花薹 Bolting stems	89.69 hi	7.3 h	337.26 a	30.87 gh
	叶片 Leaves	88.27 jk	9.2 f	118.96 no	74.13 d
	叶柄 Petioles	91.53 e	5.4 kl	288.64 cd	16.53 k
	根 Roots	82.37 r	-	131.76 mn	23.17 hijk

注：同一列数据中字母不同者表示差异达 5%显著水平。-：未检测。下同。  
Note: Different letters within the same column indicate significant difference at 5% level. -：Not detect. The same below.

2.2 叶绿素和类胡萝卜素含量

表 2 表明，各品种的叶片中都含有丰富的叶绿素和类胡萝卜素，其含量显著高于其它器官，其次是花序，而花薹和叶柄含量最低。从类型上看，早熟品种均具有较高的含量；从品种上看，‘JL-02’

各器官的叶绿素含量均最高（花序除外），而‘JL-22’各器官的含量均最低（叶柄除外）。

表 2 芥蓝叶绿素、类胡萝卜素、维生素 C、总多酚和抗氧化能力的含量  
Table 2 Contents of chlorophyll, carotenoids, vitamin C, total phenols and antioxidant capacities of Chinese kale

品种 Variety	器官 Organ	叶绿素/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Chlorophyll	类胡萝卜素/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Carotenoids	维生素 C/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Vitamin C	总多酚/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ DW) Total phenols	抗氧化能力/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ DW) Antioxidant capacities
JL-02	花序 Inflorescences	449.8 f	86.5 c	1496.8 a	8.09 bcd	115.64 a
	花薹 Bolting stems	127.4 h	9.6 d	929.3 fg	6.86 gh	89.82 de
	叶片 Leaves	2123.3 a	339.3 a	1190.1 e	7.44 ef	99.80 bc
	叶柄 Petioles	117.3 h	18.2 d	420.5 kl	6.82 h	76.39 h
	根 Roots	—	—	—	5.07 mno	45.61 l
JL-07	花序 Inflorescences	473.5 f	86.7 c	1558.2 a	8.79 a	103.97 b
	花薹 Bolting stems	106.3 h	2.3 d	830.0 h	4.91 no	59.40 jk
	叶片 Leaves	1556.9 cd	258.7 b	1190.6 e	7.28 fg	122.18 a
	叶柄 Petioles	99.5 h	14.2 d	508.7 jk	6.50 hij	105.69 b
	根 Roots	—	—	—	4.85 no	64.19 ij
JL-08	花序 Inflorescences	388.4 fg	81.2 c	1364.0 bc	8.21 bc	87.25 def
	花薹 Bolting stems	64.4 h	8.0 d	823.1 h	6.64 hi	58.03 jk
	叶片 Leaves	1613.4 c	289.9 b	997.8 f	7.94 bcd	103.23 b
	叶柄 Petioles	104.3 h	12.8 d	399.7 l	7.69 def	91.58 de
	根 Roots	—	—	—	6.22 ij	53.28 k
JL-16	花序 Inflorescences	378.7 fg	74.0 c	1227.7 de	7.77 cde	84.80 efg
	花薹 Bolting stems	98.4 h	16.6 d	898.7 gh	5.73 kl	66.65 i
	叶片 Leaves	1985.4 b	284.1 b	1176.9 e	6.82 h	94.40 cd
	叶柄 Petioles	48.5 h	9.5 d	534.3 j	6.07 jk	81.77 fgh
	根 Roots	—	—	—	4.72 op	55.57 k
JL-22	花序 Inflorescences	285.9 g	87.9 c	1538.9 a	7.88 cde	117.42 a
	花薹 Bolting stems	57.2 h	5.7 d	943.6 fg	3.75 q	28.54 m
	叶片 Leaves	1393.1 e	267.3 b	1213.2 e	8.14 bcd	116.47 a
	叶柄 Petioles	62.0 h	9.7 d	646.2 i	5.21 mn	44.13 l
	根 Roots	—	—	—	4.33 p	33.33 m
JL-25	花序 Inflorescences	302.8 g	103.0 c	1405.3 b	7.84 cde	91.16 de
	花薹 Bolting stems	84.5 h	6.2 d	897.7 gh	5.45 lm	41.63 l
	叶片 Leaves	1422.1 de	264.2 b	1311.3 cd	8.34 ab	92.37 d
	叶柄 Petioles	50.7 h	6.7 d	643.5 i	8.16 bc	78.25 gh
	根 Roots	—	—	—	6.56 hi	55.82 k

### 2.3 维生素 C、总多酚含量和抗氧化能力

芥蓝中含有丰富的维生素 C，其产品器官花薹的维生素 C 含量均较高，品种之间差异不明显。从器官上看，维生素 C 含量最高的为花序，其次是叶片和花薹，叶柄最低。维生素 C 含量最高的为‘JL-07’花序，达到  $1\,558.2\ \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ，含量最低的‘JL-08’叶柄也达到  $399.7\ \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ （表 2）。

芥蓝的产品器官花薹的总多酚含量和抗氧化能力因品种而异，以‘JL-02’的总多酚含量最高，抗氧化能力最强。在不同器官之间，以花序和叶片的总多酚含量最高，其次是叶柄和花薹，根含量最低（‘JL-25’除外），但与其它品种不同，‘JL-25’叶柄的总多酚含量仅次于叶片，且高于花序。

芥蓝各品种中，抗氧化能力以叶片最强（‘JL-02’除外），其次是花序和叶柄，花薹和根最弱。‘JL-02’的花序、‘JL-07’的叶片，以及‘JL-22’的花序和叶片的抗氧化能力最强。

## 2.4 芥子油苷组分与含量

在芥蓝中共检测出 13 种芥子油苷, 其中脂肪类芥子油苷 8 种 (表 3), 吲哚类芥子油苷和芳香类芥子油苷分别为 4 种和 1 种 (表 4)。芥蓝不同品种不同器官中脂肪类芥子油苷是含量最高、所占比例最大的一类芥子油苷, 其中 3-丁烯基芥子油苷是含量最高的芥子油苷, 除此之外, 烯丙基芥子油苷和吲哚-3-甲基芥子油苷含量也较高。

在不同器官中, 以根和花序的总芥子油苷含量最高, 其次是花薹, 叶片和叶柄中的含量最低。与其它器官相比, 根中含有特别丰富的苯乙基芥子油苷和 4-甲基硫丁基芥子油苷, 其中‘登峰中迟’的根含有特别高的 4-甲基硫丁基芥子油苷, ‘JL-22’的根中含有最高的苯乙基芥子油苷。花序中也含有丰富的芥子油苷, 几乎所有品种花序的总芥子油苷含量均显著高于花薹, 尤以 3-丁烯基芥子油苷、吲哚-3-甲基芥子油苷和 4-甲基硫氧丁基芥子油苷在花序中的含量较高。

表 3 芥蓝脂肪类芥子油苷的组分和含量  
Table 3 The composition and content of aliphatic glucosinolates of Chinese kale /( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  DW)

品种 Variety	器官 Organ	A	B	C	D	E	F	G	H	I
JL-02	花序 Inflorescences	0.07 ij	0.59 fg	0.99 gh	1.47 d	0.18 cde	16.44 de	0.19 fg	0.04 ghi	19.99 d
	花薹 Bolting stems	0.03 ijk	0.14 jkl	0.25 klmno	0.23 klmn	0.04 i	3.58 klm	0.19 fg	0.03 hijklm	4.50 klm
	叶片 Leaves	0.02 jk	0.10 jkl	0.22 klmno	0.08 n	0.04 i	2.26 mn	0.00 g	0.03 ghijk	2.76 lm
	叶柄 Petioles	0.03 ijk	0.11 jkl	0.21 klmno	0.26 klmn	0.04 i	2.25 mn	0.01 g	0.03 hijkl	2.96 lm
	根 Roots	0.04 ijk	0.93 e	0.58 ij	0.72 fg	0.21 bcd	10.60 fg	7.54 a	0.11 bcd	20.72 d
JL-07	花序 Inflorescences	0.40 c	0.64 f	5.58 a	1.46 d	0.23 bc	28.17 b	0.29 fg	0.09 e	36.85 b
	花薹 Bolting stems	0.17 ef	0.27 hijk	2.28 d	0.60 ghi	0.05 ghi	7.21 hij	0.42 fg	0.04 ghij	11.04 fgh
	叶片 Leaves	0.01 jk	0.03 l	0.47 ijk	0.04 n	0.05 hi	1.86 mn	0.01 g	0.03 hijkl	2.50 lm
	叶柄 Petioles	0.04 ijk	0.08 jkl	0.44 ijkl	0.11 n	0.05 hi	1.63 mn	0.05 fg	0.02 lmnop	2.40 lm
	根 Roots	0.15 fgh	2.11 ab	2.22 d	0.47 ghijk	0.18 cde	19.89 c	4.92 c	0.11 cd	30.04 c
JL-08	花序 Inflorescences	0.64 a	2.33 a	5.13 b	1.81 c	0.25 b	17.57 d	0.23 fg	0.05 fg	28.01 c
	花薹 Bolting stems	0.20 def	0.65 f	1.24 fg	0.56 ghij	0.03 i	2.26 mn	0.37 fg	0.02 jklmnop	5.33 jkl
	叶片 Leaves	0.09 hi	0.15 jkl	0.62 ij	0.20 lmn	0.02 i	2.50 lmn	0.01 g	0.02 klmnop	3.61 lm
	叶柄 Petioles	0.06 ijk	0.11 jkl	0.38 ijklm	0.14 mn	0.05 ghi	0.99 n	0.03 g	0.03 hijklmn	1.79 m
	根 Roots	0.16 fg	1.39 d	1.82 e	0.68 fgh	0.19 bcde	11.58 fg	6.79 b	0.15 a	22.76 d
JL-16	花序 Inflorescences	0.01 jk	1.98 bc	0.20 klmno	2.70 b	0.42 a	34.79 a	0.57 f	0.13 b	40.79 a
	花薹 Bolting stems	0.01 jk	0.49 fgh	0.10 mno	1.12 e	0.11 fg	9.38 gh	1.20 e	0.07 f	12.47 f
	叶片 Leaves	0.00 k	0.23 ijkl	0.04 no	0.71 fg	0.11 fg	7.53 hi	0.06 fg	0.02 jklmno	8.71 hi
	叶柄 Petioles	0.01 jk	0.30 hij	0.03 o	0.73 fg	0.10 fgh	5.78 ijk	0.30 fg	0.04 ghj	7.29 ijk
	根 Roots	0.00 k	1.87 c	0.13 lmno	0.92 ef	0.19 bcde	11.62 f	7.92 a	0.11 bc	22.77 d
JL-22	花序 Inflorescences	0.40 c	1.00 e	3.88 c	0.44 hijkl	0.37 a	14.65 e	0.16 fg	0.05 gh	20.95 d
	花薹 Bolting stems	0.14 fgh	0.39 ghi	1.36 f	0.23 klmn	0.04 i	5.31 jk	0.21 fg	0.03 ijklmno	7.71 ij
	叶片 Leaves	0.02 jk	0.11 jkl	0.67 hi	0.04 n	0.07 ghi	2.99 lmn	0.03 g	0.04 ghij	3.98 lm
	叶柄 Petioles	0.03 ijk	0.10 jkl	0.30 jklmno	0.05 n	0.03 i	1.56 mn	0.04 fg	0.01 nop	2.12 m
	根 Roots	0.10 ghi	1.06 e	1.75 e	0.39 ijklm	0.06 ghi	10.34 fg	6.46 b	0.10 de	20.24 d
JL-25	花序 Inflorescences	0.54 b	0.23 ijkl	2.20 d	2.97 a	0.15 ef	10.19 fg	0.51 fg	0.03 ijklmno	16.81 e
	花薹 Bolting stems	0.24 de	0.09 jkl	0.66 i	0.88 ef	0.07 ghi	7.31 hij	0.16 fg	0.01 op	9.41 ghi
	叶片 Leaves	0.07 ij	0.01 l	0.24 klmno	0.29 jklmn	0.04 hi	1.60 mn	0.04 fg	0.01 mnop	2.31 m
	叶柄 Petioles	0.25 d	0.05 kl	0.35 ijklmn	1.06 e	0.04 i	1.54 mn	0.10 fg	0.01 p	3.40 lm
	根 Roots	0.36 c	0.69 f	1.39 f	1.05 e	0.16 def	4.57 kl	4.16 d	0.04 ghijk	12.41 fg

A: 3-甲基硫氧丙基芥子油苷; B: 2-羟基-3-丁烯基芥子油苷; C: 烯丙基芥子油苷; D: 4-甲基硫氧丁基芥子油苷; E: 5-甲基硫氧戊基芥子油苷; F: 3-丁烯基芥子油苷; G: 4-甲基硫丁基芥子油苷; H: 2-羟基-4-戊烯基芥子油苷; I: 总脂肪类芥子油苷。

A: Glucoiberin; B: Progoitrin; C: Sinigrin; D: Glucoraphanin; E: Glucoalysyn; F: Gluconapin; G: Glucoerucin; H: Gluconapolelferin; I: Total aliphatic glucosinolates.

表 4 芥蓝吲哚类和芳香类芥子油苷的组分和含量

Table 4 The composition and content of indole and aromatic glucosinolates of Chinese kale /( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ )

品种 Variety	器官 Organ	吲哚类芥子油苷 Indole glucosinolates					芳香类芥子油苷 Aromatic glucosinolate		总芥子油苷 Total glucosinolates
		J	K	L	M	N	O	P	
JL-02	花序 Inflorescences	0.12 ef	2.57 d	0.11 hijk	0.24 jklm	3.05 f	0.00 f	0.00 f	23.04 f
	花薹 Bolting stems	0.06 fgh	0.76 ghijl	0.17 efgh	0.41 hij	1.40 ijklm	0.00 f	0.00 f	5.91 klmn
	叶片 Leaves	0.01 h	0.44 klm	0.06 jk	0.15 klm	0.65 mn	0.00 f	0.00 f	3.41 mn
	叶柄 Petioles	0.01 h	0.55 jklm	0.14 efghij	0.09 lm	0.79 lmn	0.00 f	0.00 f	3.74 mn
	根 Roots	0.15 e	1.26 efg	0.57 c	0.70 efg	2.68 fg	10.96 d	10.96 d	34.36 c
JL-07	花序 Inflorescences	0.13 e	2.76 d	0.17 efghi	0.23 jklm	3.30 ef	0.06 f	0.06 f	40.20 b
	花薹 Bolting stems	0.09 efg	0.75 ghijklm	0.33 d	0.51 ghi	1.69 hijk	0.04 f	0.04 f	12.76 gh
	叶片 Leaves	0.01 h	0.22 m	0.07 jk	0.03 m	0.32 n	0.01 f	0.01 f	2.83 n
	叶柄 Petioles	0.01 h	0.30 lm	0.14 efghij	0.29 ijkl	0.74 lmn	0.01 f	0.01 f	3.15 mn
	根 Roots	0.62 ab	0.64 hijklm	0.94 b	2.55 b	4.75 d	14.81 c	14.81 c	49.60 a
JL-08	花序 Inflorescences	0.32 c	4.58 c	0.19 efgh	0.48 hi	5.57 c	0.15 f	0.15 f	33.72 cd
	花薹 Bolting stems	0.14 e	0.94 fghijk	0.21 efg	0.59 fgh	1.89 hij	0.07 f	0.07 f	7.29 jklm
	叶片 Leaves	0.01 h	0.88 fghijk	0.05 k	0.03 m	0.97 klmn	0.03 f	0.03 f	4.62 lmn
	叶柄 Petioles	0.00 h	0.64 hijklm	0.12 ghijk	0.24 jklm	1.01 klmn	0.11 f	0.11 f	2.91 n
	根 Roots	0.59 b	1.05 efghij	0.89 b	2.05 c	4.57 d	20.04 b	20.04 b	47.38 a
JL-16	花序 Inflorescences	0.13 e	4.11 c	0.22 e	3.01 a	7.48 b	0.35 f	0.35 f	48.62 a
	花薹 Bolting stems	0.05 gh	0.46 klm	0.37 d	0.90 e	1.78 hij	0.16 f	0.16 f	14.41 g
	叶片 Leaves	0.00 h	1.14 efgh	0.08 ijk	0.12 klm	1.35 ijklm	0.03 f	0.03 f	10.09 hij
	叶柄 Petioles	0.02 h	0.43 klm	0.22 ef	0.59 fgh	1.25 jklm	0.03 f	0.03 f	8.56 ijkl
	根 Roots	0.02 h	0.46 klm	0.53 c	2.40 b	3.41 ef	7.48 e	7.48 e	33.66 cd
JL-22	花序 Inflorescences	0.36 c	3.05 d	0.18 efgh	0.45 hij	4.04 de	0.15 f	0.15 f	25.13 f
	花薹 Bolting stems	0.22 d	0.91 fghijk	0.36 d	0.34 ijk	1.83 hij	0.18 f	0.18 f	9.72 hijk
	叶片 Leaves	0.01 h	1.57 e	0.19 efgh	0.03 m	1.80 hij	0.06 f	0.06 f	5.84 klmn
	叶柄 Petioles	0.00 h	1.09 efghi	0.17 efghi	0.15 klm	1.41 ijkl	0.12 f	0.12 f	3.66 mn
	根 Roots	0.66 a	0.55 ijklm	1.39 a	1.73 d	4.33 d	26.08 a	26.08 a	50.65 a
JL-25	花序 Inflorescences	0.02 h	8.54 a	0.18 efgh	1.53 d	10.27 a	0.10 f	0.10 f	27.18 ef
	花薹 Bolting stems	0.01 h	1.30 ef	0.14 efghijk	0.75 ef	2.19 gh	0.25 f	0.25 f	11.85 ghi
	叶片 Leaves	0.02 h	5.31 b	0.11 hijk	0.48 ghi	5.92 c	0.02 f	0.02 f	8.25 ijkl
	叶柄 Petioles	0.01 h	1.32 ef	0.13 fijk	0.59 fgh	2.05 ghi	0.01 f	0.01 f	5.46 lmn
	根 Roots	0.24 d	2.75 d	0.96 b	2.12 c	6.07 c	11.52 d	11.52 d	30.00 de

J: 4-羟基-吲哚-3-甲基芥子油苷; K: 吲哚-3-甲基芥子油苷; L: 4-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷; M: 1-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷; N: 总吲哚类芥子油苷; O: 苯乙基芥子油苷; P: 总芳香类芥子油苷。

J: 4-Hydroxyglucobrassicin; K: Glucobrassicin; L: 4-Methoxyglucobrassicin; M: Neoglucobrassicin; N: Total indole glucosinolates; O: Gluconasturtiin; P: Total aromatic glucosinolates.

3 讨论

脂肪类芥子油苷中的 4-甲基硫氧丁基芥子油苷 (Glucoraphanin) 具有很强的抗癌活性, 其降解产物萝卜硫素 (Sulforaphane) 是迄今为止发现的抗癌活性最强的一种天然植物化学物质 (Zhang et al., 1992)。除 4-甲基硫氧丁基芥子油苷外, 吲哚-3-甲基芥子油苷、烯丙基芥子油苷和苯乙基芥子油苷等均有一定的抗癌作用 (Tawfiq et al., 1995)。芥蓝产品器官花薹中的抗癌芥子油苷的含量随品种的不同而不同, ‘登峰中迟’ 的 4-甲基硫氧丁基芥子油苷含量最高, ‘JL-25’ 的吲哚-3-甲基芥子油苷含量最高, ‘JL-07’ 的烯丙基芥子油苷含量也很高。而抗癌芥子油苷在不同器官中的分

布也各有差异,如苯乙基芥子油苷在地上部器官中含量极低,但在根中很高。在大部分品种的花序中含有较多的 4-甲基硫氧丁基芥子油苷(‘JL-22’除外)和吲哚-3-甲基芥子油苷,针对不同抗癌类芥子油苷在不同器官中的分布特点,可以将其用于分离纯化和开发。

甘蓝类蔬菜不同器官间营养成分的分布具有明显差异。Nishikawa 等(2003)报道,青花菜花球中的维生素 C 含量显著高于茎中,两器官中维生素 C 相关基因的表达也有明显差异。模式植物拟南芥莲座叶、花序、根系和种子等器官中芥子油苷组分和含量均有较大差异,而且这种差异随着植物发育时期的变化而变化(Brown et al., 2003)。芝麻菜的根系和种子中以 4-甲基硫丁基芥子油苷为主,而叶片中的主要成分却是二聚-4-巯基丁基芥子油苷(Kim & Ishii, 2006)。与前人的研究一致,本试验结果表明,芥蓝不同器官的芥子油苷在组分和含量上均差异很大。相对于其它器官,根中含有高含量的苯乙基芥子油苷和 4-甲基硫丁基芥子油苷,这两种芥子油苷可能与植物对土壤中病原菌的抗性有关(Brader et al., 2006; 陈亚州和闫秀峰, 2007)。花序中含有较高含量的可溶性固形物、可溶性蛋白、维生素 C、总多酚和芥子油苷等成分,这很可能与植物的生长发育规律有关,当植物从营养生长阶段过渡到生殖生长阶段,植物中的营养成分开始由营养器官逐步向生殖器官中转移,随着种子的逐渐形成,最终储存在种子中,为植物的繁衍提供物质基础。

不同品种间的营养成分其组分和含量也存在显著差异。Vallejo 等(2002)的研究发现,青花菜不同品种其维生素 C、多酚等生物活性物质含量各有不同。花椰菜不同品种芥子油苷、维生素 C、多酚、抗氧化能力等成分含量也存在明显差异(Volden et al., 2009)。青花菜、花椰菜、甘蓝、羽衣甘蓝和抱子甘蓝等多种甘蓝类蔬菜,其芥子油苷的组分和含量随品种的不同而不同(Kushad et al., 1999; Schonhof et al., 2004)。与众多前人的研究结果一致,本试验采用的 6 个芥蓝品种,其芥子油苷、总多酚、维生素 C 和还原糖等多项营养成分均存在明显差异。但各营养成分与其品种类型间的相关性却表现不一,早熟品种具有较低含量的还原糖和较高含量的叶绿素和类胡萝卜素,而晚熟、极晚熟品种具有较高含量的可溶性固形物,其它成分,特别是具有保健价值的维生素 C、多酚和芥子油苷等成分的分布和类型并无明显相关性。研究者对于蔬菜品质的关注已经逐渐从产量、外观品质和常规营养品质逐步转移到一些具有特殊生物学功能的生物活性物质上,这些生物活性物质往往具有抗氧化、抗衰老和抗癌等功效(Bahorun et al., 2004; Chun et al., 2005; Volden et al., 2009)。本试验结果表明,芥蓝具有很高的营养价值,含有丰富的维生素 C、类胡萝卜素和总多酚等多种抗氧化成分以及具有抗癌功能的芥子油苷,是一种很有发展前景的蔬菜。

实际生产中,随着产品器官花薹的采收,其它器官即被废弃,既造成了大量的浪费,也对环境造成一定的影响,所以可以根据废弃器官的营养成分特性,进行有针对性的开发利用,以解决芥蓝生产中的废弃物利用问题。供试的 6 个品种,其产品器官花薹的营养成分差异显著,如‘JL-02’的总多酚含量和抗氧化能力明显高于其它品种,‘登峰中迟’的 4-甲基硫氧丁基芥子油苷和总芥子油苷含量明显高于其它品种,该结果可为栽培中的品种选择提供一定的理论依据。

## References

- Bahorun T, Amitabye L R, Crozier A, Aruoma I O. 2004. Total phenol, favonoid, proanthocyanidin and vitamin C levels and antioxidant activities of Mauritian vegetables. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 84: 1553 - 1561.
- Benzie I F, Strain J J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239: 70 - 76.
- Brader G, Mikkelsen M D, Halkier B A, Palva E T. 2006. Altering glucosinolate profiles modulates disease resistance in plants. *The Plant Journal*, 46: 758 - 767.
- Brown P D, Tokuhisa J G, Reichelt M, Gershenzon J. 2003. Variation of glucosinolate accumulation among different organs and developmental

- stages of *Arabidopsis thaliana*. *Phytochemistry*, 62: 471 – 481.
- Chen Xin-juan, Zhu Zhu-jun, Yang Jing, Liu Yong-hua. 2006. Composition and content of glucosinolates in leaves and bolting stems of Chinese kale quantified by HPLC. *Acta Horticulturae Sinica*, 33 (4): 741 – 744. (in Chinese)
- 陈新娟, 朱祝军, 杨 静, 刘永华. 2006. 芥蓝叶和薹的硫代葡萄糖苷组分及含量. *园艺学报*, 33 (4): 741 – 744.
- Chen Ya-zhou, Yan Xiu-feng. 2007. The role of glucosinolates in plant-biotic environment interactions. *Acta Ecologica Sinica*, 27: 2584 – 2593. (in Chinese)
- 陈亚州, 闫秀峰. 2007. 芥子油苷在植物—生物环境关系中的作用. *生态学报*, 27: 2584 – 2593.
- Chun O K, Kim D O, Smith N, Schroeder D, Han J T, Lee C Y. 2005. Daily consumption of phenolics and total antioxidant capacity from fruit and vegetables in the American diet. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 85: 1715 – 1724.
- He Hong-ju, Chen Hang, Schnitzler W H. 2002. Glucosinolate composition and contents in *Brassica* vegetables. *Scientia Agricultura Sinica*, 35 (2): 192 – 197. (in Chinese)
- 何洪巨, 陈 杭, Schnitzler W H. 2002. 芸薹属蔬菜中硫代葡萄糖苷鉴定与含量分析. *中国农业科学*, 35 (2): 192 – 197.
- Kim S J, Ishii G. 2006. Glucosinolate profiles in the seeds, leaves and roots of rocket salad (*Eruca sativa* Mill.) and anti-oxidative activities of intact plant powder and purified 4-methoxyglucobrassicin. *Soil Science and Plant Nutrition*, 52: 394 – 400.
- Kushad M M, Brown A F, Kurilich A C, Juvik J A, Klein B P, Wallig M A, Jeffery E H. 1999. Variation of glucosinolates in vegetable crops of *Brassica oleracea*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47: 1541 – 1548.
- La G X, Fang P, Teng Y B, Li Y J, Lin X Y. 2009. Effect of CO<sub>2</sub> enrichment on the glucosinolate contents under different nitrogen levels in bolting stem of Chinese kale (*Brassica alboglabra* L.). *Journal of Zhejiang University Science B*, 10 (6): 454 – 464.
- Nishikawa F, Kato M, Hyodo H, Ikoma Y, Sugiura M, Yano M. 2003. Ascorbate metabolism in harvested broccoli. *Journal of Experimental Botany*, 54 (392): 2439 – 2448.
- Nisperos-Carriedo M O, Buslig B S, Shaw P E. 1992. Simultaneous detection of dehydroascorbic, ascorbic, and some organic acids in fruits and vegetables by HPLC. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40: 1127 – 1130.
- Schonhof I, Krumbein A, Br  chner B. 2004. Genotypic effects on glucosinolates and sensory properties of broccoli and cauliflower. *Food*, 48 (1): 25 – 33.
- Tawfiq N, Heaney R K, Plumb J A, Fenwick G R, Musk S R R, Williamson G. 1995. Dietary glucosinolates as blocking agents against carcinogenesis: Glucosinolate breakdown products assessed by induction of quinine reductase activity in murine hepalc7 cells. *Carcinogenesis*, 16 (5): 1191 – 1194.
- Vallejo F, Tomás-Barber  n F, García-Viguera C. 2002. Potential bioactive compounds in health promotion from broccoli cultivars grown in Spain. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 82: 1293 – 1297.
- Volden J, Bengtsson G B, Wicklund T. 2009. Glucosinolates, L-ascorbic acid, total phenols, anthocyanins, antioxidant capacities and colour in cauliflower (*Brassica oleracea* L. ssp. *botrytis*): effects of long-term freezer storage. *Food Chemistry*, 112: 967 – 976.
- Xu C J, Guo D P, Yuan J, Yuan G F, Wang Q M. 2006. Changes in glucoraphanin content and quinine reductase activity in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) florets during cooling and controlled atmosphere storage. *Postharvest Biology and Technology*, 42 (2): 176 – 184.
- Zhang Hai-feng. 2006. Studies on glucosinolate profile quinine reductase induction activity and insect resistance of Chinese kale [M. D. Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University. (in Chinese)
- 张海峰. 2006. 芥蓝芥子油苷组分及其醌还原酶诱导活性和抗虫性分析[硕士论文]. 杭州: 浙江大学.
- Zhang Shen-hao, Wang Xue-dong, Xuan Xing-shuan, Shang Yu-feng, He Hong-ju. 2004. The nutritive value of different strains of cabbage mustard. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 18 (2): 58 – 61. (in Chinese)
- 张慎好, 王学东, 轩兴栓, 尚玉峰, 何洪巨. 2004. 芥蓝不同品种营养成分含量评价. *河北科技师范学院学报*, 18 (2): 58 – 61.
- Zhang Y S, Talalay P, Cho C G, Posner G H. 1992. A major inducer of anticarcinogenic protective enzymes from broccoli: Isolation and elucidation of structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 89: 2399 – 2403.