

青花菜不同器官生物活性物质和营养成分的研究

孙 勃¹, 许映君², 徐铁锋¹, 袁高峰¹, 郭容芳¹, 汪炳良¹, 汪俏梅^{1*}

(¹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; ²慈溪市农业技术推广中心, 浙江慈溪 315300)

摘 要: 分析了青花菜花球、茎、叶和根中生物活性物质和营养成分组分与含量的差异。结果发现, 花球中的总脂肪类、总吲哚类、总芥子油苷以及抗癌活性最强的 4-甲基硫氧丁基芥子油苷的含量均显著高于其它器官, 根系中苯乙基芥子油苷、4-甲基硫丁基芥子油苷和 4-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷含量显著高于其它器官; 花球中的可溶性蛋白、还原糖和可溶性固形物含量显著高于其它器官; 叶片中的多酚、维生素 C、叶绿素和类胡萝卜素含量以及抗氧化能力显著高于其它器官。叶片和根系生物活性物质含量丰富, 可加以综合利用。

关键词: 青花菜; 器官; 生物活性物质; 芥子油苷; 营养成分

中图分类号: S 635 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2010) 01-0059-06

Variation of Bioactive Compounds and Nutrients Among Different Organs of Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Planck)

SUN Bo¹, XU Ying-jun², XU Tie-feng¹, YUAN Gao-feng¹, GUO Rong-fang¹, WANG Bing-liang¹, and WANG Qiao-mei^{1*}

(¹Department of Horticulture, Zhejiang University, Key Laboratory of Horticultural Plant Growth, Development and Quality Improvement, Ministry of Agriculture, Hangzhou 310029, China; ²Cixi Agriculture Technology and Popularization Center, Cixi, Zhejiang 315300, China)

Abstract: The present study investigated the contents of bioactive compounds and nutrients, as well as antioxidant capacities in heads, stems, leaves and roots of mature broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Planck) plants. The results showed that the heads had the highest amounts of aliphatic glucosinolates, indole glucosinolates, total glucosinolates and glucoraphanin, which was one of the most potential anticarcinogenic glucosinolate identified thus far. The contents of gluconasturtiin, glucoerucin and 4-methoxyglucobrassicin in the roots were remarkably higher than those in the other organs. As for the nutrients, the broccoli heads contained markedly higher concentrations of soluble proteins, reducing sugars and soluble solids than those in the leaves, roots and stems. The highest contents of total phenols, L-ascorbic acid, chlorophyll and carotenoids, as well as antioxidant capacities were observed in leaves, and the significant differences existed between leaves and other organs. The leaves and roots of broccoli, which are rich sources of bioactive components, have great potential for producing health-promoting products and biological pesticides as raw materials.

Key words: broccoli; organ; bioactive compound; glucosinolate; nutrient

青花菜 (*Brassica oleracea* var. *italica* Planck) 具有很高的营养价值, 特别是含有芥子油苷 (Glu-

收稿日期: 2009-08-11; 修回日期: 2009-12-08

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); 教育部博士后科学基金项目 (20080441259)

* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: qiaomei@zju.edu.cn)

cosinolates) 和多酚 (Total phenols) 等多种生物活性物质。芥子油苷是一类含硫和氮的植物次生代谢产物, 其降解产物异硫代氰酸盐具有抗癌活性 (汪俏梅和曹家树, 2001)。植物多酚在抗诱变、抗肿瘤、抗病毒、抗微生物及抗衰老等方面具有显著的作用 (Chun et al, 2005; Volden et al, 2009), 除此以外, 青花菜还具有较强的抗氧化能力 (Leja et al, 2001; Bahorun et al, 2004)。

青花菜的营养品质和保健价值一直是蔬菜研究中的热点, (Leja et al, 2001; Bahorun et al, 2004; Chun et al, 2005; Xu et al, 2006; Jia et al, 2009), 但主要集中在产品器官花球上, 对其它器官的研究鲜有报道。本试验以青花菜的不同器官为研究对象, 从青花菜综合利用的角度, 研究不同器官中生物活性物质和营养成分的含量, 为青花菜叶和根的开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

供试青花菜 (*Brassica oleracea* var. *italica* Planck) 品种为‘优秀’。2008年8月10日在浙江省慈溪市播种育苗, 1个月后定植于露地, 11月底至12月初产品器官成熟, 12月5日采收。挑选生长健壮, 花球成熟度一致, 无病虫害及机械损伤的植株15株, 每5株为1个重复, 共3个重复。整株采收, 根部带有一定量的土壤, 放进铺有冰的泡沫箱中, 迅速运回实验室。

将整株按照花球、茎、叶和根4个器官分割, 清洗, 叶片取植株中部健壮的成熟叶片, 重复间取相同叶位。一部分材料用于测定含水量、维生素C、叶绿素、类胡萝卜素和可溶性固形物, 另一部分冷冻干燥 (Vir Tis, USA) 72 h, 粉碎成粉, -80℃保存备用。

1.2 测定方法

1.2.1 含水量、可溶性固形物、叶绿素、类胡萝卜素、还原糖和可溶性蛋白含量的测定

将不同器官取样, 洗净, 105℃杀青2 h, 70℃下烘干至恒重, 测定其含水量; 可溶性固形物用手持阿贝折射仪测定; 叶绿素和类胡萝卜素用乙醇提取, 分光光度法测定; 还原糖含量用DNS比色法测定; 可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝G-250染色法测定。

1.2.2 维生素C含量的测定

参照 Nisperos-Carriedo等 (1992) 的方法并加以改进。准确称取鲜样3 g于研钵中, 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, 过滤, 用于HPLC分析。通过标准曲线计算不同器官中的维生素C含量。

1.2.3 芥子油苷组分和含量的分析

参照 Xu等 (2006)、Jia等 (2009) 的方法。5 mL ddH₂O加适量不同器官冻干粉置于离心管中, 沸水浴10 min, 离心, 将提取液吸出, 再加入5 mL ddH₂O, 沸水浴10 min, 合并提取液, 于-20℃冰箱保存。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 (Waters, USA) 分析, 以 α NPG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: 检测波长为226 nm, 流速为1.0 mL·min⁻¹, 色谱柱为C₁₈反相色谱柱。

1.2.4 总多酚含量的分析

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, 吸取上清液作为多酚提取液。取提取液0.3 mL分别加入Folin-Ciocalteu's试剂和碳酸钠溶液, 静置2 h, 在760 nm下测量吸光值, 用乙醇作为对照。根据标准曲线计算样品中多酚的含量。

1.2.5 FRAP法测定抗氧化能力

参照 Benzie和 Strain (1996) 的方法。称取适量冻干粉于研钵中, 加入乙醇, 充分研磨后定容至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, 在FRAP工作液中加入乙醇用作对照。根据标准曲线计算样品的抗氧化能力。

1.3 数据分析

本试验数据为 3 次重复的平均值 \pm 标准差，试验数据均采用 Excel 2003 软件进行处理，用 DPS 软件进行数据统计和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 青花菜不同器官的芥子油苷组分与含量

由表 1 可见，在青花菜中共检测到 11 种芥子油苷，其中 6 种脂肪类芥子油苷，4 种吲哚类芥子油苷和 1 种芳香类芥子油苷。花球中主要为 4-甲基硫氧丁基芥子油苷，吲哚-3-甲基芥子油苷和 1-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷；茎中主要为 4-甲基硫氧丁基芥子油苷，吲哚-3-甲基芥子油苷，4-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷和 1-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷；叶片中主要为吲哚-3-甲基芥子油苷和 1-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷；根系中主要为 1-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷，4-甲基硫丁基芥子油苷，苯乙基芥子油苷和 4-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷。

花球中总芥子油苷含量最高，达到 $27.67 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ ，其中脂肪类占 37.93%，吲哚类占 61.56%，芳香类占 0.51%；茎中总芥子油苷含量最低，仅为 $2.94 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ ，其中脂肪类占 47.87%，吲哚类占 49.09%，芳香类占 3.04%；叶片中总芥子油苷含量为 $6.89 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ ，其中脂肪类占 11.46%，吲哚类占 88.54%；根系中总芥子油苷含量为 $22.49 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ ，其中脂肪类占 21.79%，吲哚类占 58.16%，芳香类占 20.05%。

表 1 青花菜不同器官中芥子油苷的组分和含量

Table 1 The composition and content of glucosinolates among different organs of broccoli / ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$)

芥子油苷 Glucosinolate	花球 Head	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root
脂肪类 Aliphatic glucosinolates				
3-甲基硫氧丙基芥子油苷 Glucoiberin	0.79 \pm 0.20 a	0.12 \pm 0.03 b	0.15 \pm 0.07 b	0.11 \pm 0.04 b
2-羟基-3-丁烯基芥子油苷 Progoitrin	2.90 \pm 0.26 a	0.18 \pm 0.03 c	0.05 \pm 0.01 c	0.47 \pm 0.05 b
烯丙基芥子油苷 Sinigrin	0.60 \pm 0.05 a	0.10 \pm 0.02 c	0.08 \pm 0.01 c	0.32 \pm 0.02 b
4-甲基硫氧丁基芥子油苷 Glucoraphanin	5.54 \pm 0.33 a	0.61 \pm 0.12 b	0.52 \pm 0.15 b	0.31 \pm 0.09 b
3-丁烯基芥子油苷 Gluconapin	0.53 \pm 0.13 a	0.14 \pm 0.00 b	-	0.20 \pm 0.03 b
4-甲基硫丁基芥子油苷 Glucoerucin	0.14 \pm 0.05 c	0.27 \pm 0.06 b	-	3.48 \pm 0.03 a
总脂肪类芥子油苷 Total aliphatic glucosinolates	10.50 \pm 0.97 a	1.41 \pm 0.15 c	0.80 \pm 0.24 c	4.89 \pm 0.17 b
吲哚类 Indole glucosinolates				
4-羟基-吲哚-3-甲基芥子油苷 4-Hydroxyglucobrassicin	0.41 \pm 0.04 a	0.07 \pm 0.00 c	-	0.16 \pm 0.01 b
吲哚-3-甲基芥子油苷 Glucobrassicin	7.95 \pm 0.34 a	0.41 \pm 0.05 d	3.79 \pm 0.17 b	2.05 \pm 0.09 c
4-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷 4-Methoxyglucobrassicin	1.37 \pm 0.12 b	0.41 \pm 0.01 d	0.70 \pm 0.07 c	4.46 \pm 0.12 a
1-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷 Neoglucobrassicin	7.29 \pm 0.30 a	0.55 \pm 0.04 d	1.60 \pm 0.05 c	6.41 \pm 0.27 b
总吲哚类芥子油苷 Total indole glucosinolates	17.02 \pm 0.77 a	1.44 \pm 0.06 d	6.09 \pm 0.18 c	13.08 \pm 0.46 b
芳香类 Aromatic glucosinolate				
苯乙基芥子油苷 Gluconasturtiin	0.14 \pm 0.01 b	0.09 \pm 0.02 b	-	4.52 \pm 0.46 a
总芳香类芥子油苷 Total aromatic glucosinolates	0.14 \pm 0.01 b	0.09 \pm 0.02 b	-	4.52 \pm 0.46 a
总芥子油苷 Total glucosinolates	27.67 \pm 1.38 a	2.94 \pm 0.23 d	6.89 \pm 0.41 c	22.49 \pm 0.74 b

注：表中数据为平均值 \pm 标准差，同一行数据中不同字母表示差异达 5% 显著水平。-：未检测到。

Note: Values are means \pm SE. Different letters within the same row indicate significant difference at 5% level. -: Not detected.

2.2 青花菜不同器官的总多酚含量和抗氧化能力

由表 2 可见，青花菜不同器官中总多酚含量（GAE）差异显著，叶片中含量最高，达到 893.8

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 其次是花球和根系, 含量分别为 648.0 和 $607.8 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 茎中的含量最低, 仅为 $321.7 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 不足叶片中含量的 40%。青花菜不同器官的抗氧化能力差异显著。叶片的抗氧化能力 (Fe^{2+}) 最强, 达到 $18.49 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 根和花球其次, 分别为 11.21 和 $9.48 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 茎最低, 仅为 $6.09 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 叶片的抗氧化能力为茎的 3.03 倍。

表 2 青花菜不同器官中总多酚含量和抗氧化能力

Table 2 The content of total phenols and antioxidant capacity among different organs of broccoli

器官 Organ	总多酚 / ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Total phenols	抗氧化能力 / ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Antioxidant capacity
花球 Head	$648.0 \pm 8.7 \text{ b}$	$9.48 \pm 0.17 \text{ c}$
茎 Stem	$321.7 \pm 21.8 \text{ d}$	$6.09 \pm 0.53 \text{ d}$
叶 Leaf	$893.8 \pm 10.9 \text{ a}$	$18.49 \pm 0.91 \text{ a}$
根 Root	$607.8 \pm 7.5 \text{ c}$	$11.21 \pm 0.28 \text{ b}$

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差, 同一列数据中字母不同者表示差异达 5% 显著水平。

Note: Values are means \pm SE. Different letters within the same column indicate significant difference at 5% level.

2.3 青花菜不同器官的维生素 C、叶绿素和类胡萝卜素含量

维生素 C、叶绿素和类胡萝卜素是青花菜重要的营养成分。表 3 结果表明叶片中的维生素 C 含量最高, 达到 $1361.7 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 茎中含量最低, 仅为 $644.5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 不足叶片中的 50%。叶片、花球和茎中的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均差异显著, 叶片中的含量最高, 花球次之, 茎中含量最低。叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素的含量分别为花球中的 3.78 倍、4.53 倍、3.94 倍和 3.44 倍, 为茎中的 92.98 倍、305.21 倍、112.65 倍和 17.53 倍。

表 3 青花菜不同器官中维生素 C、叶绿素和类胡萝卜素的含量

Table 3 The vitamin C, chlorophyll and carotenoids among different organs of broccoli / ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW)

器官 Organ	维生素 C Vitamin C	叶绿素 a Chl. a	叶绿素 b Chl. b	总叶绿素 Chl. (a + b)	类胡萝卜素 Carotenoid
花球 Head	$1163.1 \pm 26.9 \text{ b}$	$457.9 \pm 46.4 \text{ b}$	$128.0 \pm 11.3 \text{ b}$	$585.9 \pm 35.9 \text{ b}$	$120.9 \pm 9.5 \text{ b}$
茎 Stem	$644.5 \pm 59.9 \text{ c}$	$18.6 \pm 2.0 \text{ c}$	$1.9 \pm 0.2 \text{ c}$	$20.5 \pm 2.2 \text{ c}$	$23.7 \pm 0.5 \text{ c}$
叶 Leaf	$1361.7 \pm 65.1 \text{ a}$	$1729.4 \pm 38.0 \text{ a}$	$579.9 \pm 18.7 \text{ a}$	$2309.3 \pm 56.7 \text{ a}$	$415.5 \pm 9.2 \text{ a}$

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差, 同一列数据中字母不同者表示差异达 5% 显著水平。

Note: Values are means \pm SE. Different letters within the same column indicate significant difference at 5% level.

2.4 青花菜不同器官的可溶性蛋白、还原糖、可溶性固形物含量和含水量

从表 4 可见, 青花菜花球中的可溶性蛋白含量最高, 叶片中含量也比较高, 根和茎中的含量最低。还原糖在花球和茎中含量高, 叶片中含量最低。可溶性固形物也是花球中的最高, 其次是叶, 茎中的最低。叶片和茎中的含水量最高, 其次是花球, 根系含水量最低。

表 4 青花菜不同器官中可溶性蛋白、还原糖、可溶性固形物含量和含水量

Table 4 The soluble proteins, reducing sugars, soluble solids and water content among different organs of broccoli

器官 Organ	可溶性蛋白 / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Soluble protein	还原糖 / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Reducing sugar	可溶性固形物 / % Soluble solid	含水量 / % Water content
花球 Head	$16.25 \pm 0.69 \text{ a}$	$32.30 \pm 0.99 \text{ a}$	$16.4 \pm 0.8 \text{ a}$	$86.87 \pm 0.34 \text{ b}$
茎 Stem	$5.36 \pm 0.46 \text{ c}$	$29.31 \pm 0.59 \text{ b}$	$6.6 \pm 0.6 \text{ b}$	$88.97 \pm 1.77 \text{ a}$
叶 Leaf	$13.80 \pm 0.39 \text{ b}$	$9.81 \pm 0.60 \text{ d}$	$11.0 \pm 0.0 \text{ c}$	$88.94 \pm 0.51 \text{ a}$
根 Root	$6.05 \pm 0.25 \text{ c}$	$12.40 \pm 1.32 \text{ c}$	-	$80.04 \pm 0.88 \text{ c}$

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差, 同一列数据中字母不同者表示差异达 5% 显著水平。- : 未检测。

Note: Values are means \pm SE. Different letters within the same column indicate significant difference at 5% level. - : Not detected.

3 讨论

3.1 芥子油苷

芥子油苷作为一类重要的次生代谢物质, 是评价青花菜品质的重要指标之一 (袁晶, 2006)。本试验在青花菜的花球中检测到芥子油苷的含量为 $27.67 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$, 其中 4-甲基硫氧丁基芥子油苷的含量为 $5.54 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$, 与文献中报道 (Xu et al, 2006; Jia et al, 2009; Verkerk et al, 2009) 的基本吻合。在不同器官、不同组织及不同发育时期, 芥子油苷的组分和含量均有明显差异 (Brown et al, 2003)。本试验结果表明, 青花菜不同器官中的芥子油苷组分和含量差异显著, 与 Brown 等 (2003) 的结论一致。本试验中青花菜花球中 4-甲基硫氧丁基芥子油苷的含量显著高于其它器官, 这种芥子油苷是迄今为止发现的抗癌活性最强的芥子油苷 (Zhang et al, 1994), 许多研究都表明, 它在青花菜中的含量和比例都是比较高的 (Xu et al, 2006; Jia et al, 2009; Verkerk et al, 2009)。叶片中吲哚类芥子油苷的相对含量很高, 这可能与吲哚类芥子油苷参与植物对昆虫和病原菌的抗性有关 (Agerbirk et al, 2009)。另外, 还有一些研究表明, 吲哚-3-甲基芥子油苷的降解产物吲哚-3-甲醇可强烈诱导肝、肠酶的活性, 具有一定的抗癌活性 (Rosa & Heaney, 1993)。Brader 等 (2006) 研究表明, 某些芳香类芥子油苷和植物的抗病性具有密切关系。本研究表明, 在青花菜根系中芳香类芥子油苷的含量显著高于其它器官, 因此我们推测芳香类芥子油苷在青花菜根系中的分布很可能与根系对土壤中病原菌的抗性有关。有研究表明, 4-甲基硫丁基芥子油苷的降解产物可以抑制畸雌腐霉和立枯丝核菌等病原体生长, 具有一定的抗菌功能 (陈亚州和闫秀峰, 2007)。作者发现根系中 4-甲基硫氧丁基芥子油苷的含量不高, 但是其修饰前体 4-甲基硫丁基芥子油苷的含量显著高于其它器官, 这很可能是经过长期的进化与环境选择, 根系中由 4-甲基硫丁基芥子油苷转化为 4-甲基硫氧丁基芥子油苷的过程受到抑制, 导致 4-甲基硫丁基芥子油苷在根系中大量累积, 而 4-甲基硫氧丁基芥子油苷含量却不高。还有研究表明, 4-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷和植物的广谱抗病性密切相关 (Clay et al, 2009), 本试验中发现根系中这种芥子油苷的含量显著高于其它器官, 这也表明植物体内芥子油苷的分布与植物对环境的适应性密切相关。

3.2 其它生物活性物质和营养成分

除了含有丰富的芥子油苷外, 青花菜中的维生素 C、类胡萝卜素和多酚的含量及其抗氧化能力也备受关注。本试验发现, 叶片中维生素 C、类胡萝卜素和多酚的含量及其抗氧化能力最高, 都显著超过了其它器官, 花球中这些成分的含量也较高, 检测到的含量也与文献中报道的一致 (Leja et al, 2001; Baharun et al, 2004; Chun et al, 2005; 袁晶, 2006)。花球中可溶性蛋白、还原糖和可溶性固形物的含量均显著高于其它器官, 这也说明青花菜产品器官营养丰富, 非常适合人类日常消费。

3.3 青花菜的综合利用

试验结果表明, 青花菜的茎、叶片和根系作为农业生产中的废弃物具有潜在开发价值。随着青花菜生产规模的不断扩大, 具备了规模化生产生物饲料的条件, 可以以茎和叶片为原料, 生产奶牛、羊和兔等动物的饲料。根系和叶片中含有丰富的吲哚类芥子油苷、4-甲基硫丁基芥子油苷和苯乙基芥子油苷, 它们具有天然的抗虫和抗菌功能, 可用于研发安全无毒的生物农药。另外叶片中含有丰富的维生素 C、类胡萝卜素和多酚类物质, 并且有很强的抗氧化能力, 可用于功能食品的开发。

References

- Agerbirk N, Vos M D, Kim J H, Jander G. 2009. Indole glucosinolate breakdown and its biological effects. *Phytochemistry Reviews*, 8: 101 - 120.
- Baharun T, Amitabye L R, Crozier A, Aruoma IO. 2004. Total phenol, flavonoid, proanthocyanidin and vitamin C levels and antioxidant activi-

- ties 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 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.
- Clay N K, Adio A M, Denoux C, Jander G, Ausubel F M. 2009. Glucosinolate metabolites required for an *Arabidopsis* innate immune response. *Science*, 323: 95 - 101.
- Jia C G, Xu C J, Wei J, Yuan J, Yuan G F, Wang B L, Wang Q M. 2009. Effect of modified atmosphere packaging on visual quality and glucosinolates of broccoli florets. *Food Chemistry*, 114: 28 - 37.
- Leja M, Mareczek A, Starzynska A, Rozek S. 2001. Antioxidant ability of broccoli flower buds during short-term storage. *Food Chemistry*, 72: 219 - 222.
- Nisperos-Carriedo M O, Buslig B S, Shaw P E. 1992. Simultaneous detection of dehydroascorbic, ascorbic, and some organic acids in fruit and vegetables by HPLC. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40: 1127 - 1130.
- Rosa E A S, Heaney P K. 1993. Glucosinolates in crop plants. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 62: 259 - 265.
- Verkerk R, Schreiner M, Krumbein A, Ciska E, Holst B, Rowland A, Schrijver R D, Hansen M, Gerh user C, Mithen R, Dekker M. 2009. Glucosinolates in *Brassica vegetables*: The influence of the food supply chain on intake, bioavailability and human health. *Molecular Nutrition & Food Research*, 53: 1 - 47.
- 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.
- Wang Qiao-mei, Cao Jia-shu. 2001. Progress of studies on glucosinolates and its application on the breeding vegetable crops. *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (Supplement): 669 - 675. (in Chinese)
- 汪俏梅, 曹家树. 2001. 芥子油苷研究进展及其在蔬菜育种上的应用前景. *园艺学报*, 28 (增刊): 669 - 675.
- Xu C J, Guo D P, Yuan J, Yuan G F, Wang Q M. 2006. Changes in glucoraphanin content and quinone reductase activity in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) florets during cooling and controlled atmosphere storage. *Postharvest Biology and Technology*, 42 (2): 176 - 184.
- Yuan Jing. 2006. Studies on effect of different storage and cooking methods on quality of broccoli [M. D. Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University. (in Chinese)
- 袁 晶. 2006. 不同贮藏和烹饪方法对青花菜品质的影响 [硕士论文]. 杭州: 浙江大学.
- Zhang Y, Kensler T W, Cho C G, Posner G H, Talalay P. 1994. Anticarcinogenic activities of sulforaphane and structurally related synthetic norbomyl isothiocyanates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91: 3147 - 3150.