

大白菜中硫代葡萄糖苷的鉴定及含量分析

廖永翠^{1,2}, 宋明¹, 王辉², 徐东辉², 王晓武^{2,*}

(¹西南大学园艺园林学院, 重庆市蔬菜学重点实验室, 重庆 400716; ²中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081)

摘要: 以 129 份大白菜 [*Brassica campestris* L.ssp.*pekinensis* (Lour.) Olsson] DH 系为材料, 采用 HPLC 法, 对不同季节生长的大白菜叶片中硫苷的组分和含量进行了研究。在 129 份材料中均检测到 8 种硫苷成分, 包含 3 种脂肪族硫苷, 4 种吲哚族硫苷和 1 种芳香族硫苷。主成分分析表明脂肪族硫苷 3-丁烯基硫苷 (NAP)、4-戊烯基硫苷 (GBN) 和 2-羟基-3-丁烯基硫苷 (PRO) 是大白菜硫苷的主要组分, 占总硫苷含量的 60%。筛选出了 6 份高硫苷含量的材料。联合方差分析结果表明, 脂肪族硫苷 NAP、GBN 和 PRO 在不同品种间差异极显著; 某些吲哚族硫苷受环境影响较大, 在不同的季节间差异显著; 芳香族硫苷 2-苯乙基硫苷 (NAS) 的含量在季节和季节 × 品种间差异显著。不同硫苷间的积累存在相互影响, NAP 与 GBN、NAP 和 GBN 与总硫苷在两个年份中均呈极显著正相关。

关键词: 大白菜; 硫代葡萄糖苷; 高效液相色谱

中图分类号: S 635

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2011) 05-0963-07

Glucosinolate Profile and Accumulation in *Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*

LIAO Yong-cui^{1,2}, SONG Ming¹, WANG Hui², XU Dong-hui², and WANG Xiao-wu^{2,*}

(¹School of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing Key Laboratory of Olericulture, Chongqing 400716, China; ²Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The 129 *Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis* (Lour.) Olsson DH lines grown in different seasons were used to identify glucosinolate profile and accumulation in leaves by HPLC analysis. Eight main glucosinolates were detected in all the accessions including 3 aliphatic glucosinolates, 4 indolic glucosinolates and 1 aromatic glucosinolate. Principal component analysis showed Aliphatic glucosinolates, Gluconapin (NAP), Glucobrassicinapin (GBN) and Progoitrin (PRO) were the main glucosinolate profiles with the highest ratio of about 60.0% in Chinese cabbage, and 6 materials with a high content of glucosinolate were identified. Combined variance analysis showed that there were significant differences among varieties in aliphatic glucosinolates (NAP, GBN and PRO). The accumulation of several indolic glucosinolates was affected greatly by environment, and a significant variance was appeared in different seasons. The aromatic glucosinolate, Gluconasturtiin (NAS) concentration varied significantly between two different seasons and season × variety interaction.

收稿日期: 2010-11-23; **修回日期:** 2011-04-11

基金项目: 国家‘973’计划项目 (2007CB108803); 农业部园艺作物遗传改良重点开放实验室项目

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: wangxw@mail.caas.net.cn)

Correlations analysis between individual glucosinolates showed that the accumulation of different glucosinolates was affected by each other, and correlation between NAP and total glucosinolate content, GBN and total glucosinolate, NAP and GBN was all significant respectively in the two seasons.

Key words: *Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis* (Lour.) Olsson; glucosinolate; HPLC

硫代葡萄糖苷(简称硫苷, Glucosinolate)是广泛存在于十字花科植物根、茎、叶、种子中的一类含硫的阴离子次生代谢产物(Halkier & Gershenzon, 2006),尤其在芸薹属植物中含量较高。它是十字花科植物的主要活性成分,决定着植物的风味和营养品质。目前在十字花科植物中已发现至少120种硫苷(Fabey et al., 2001)。在过去的几十年中,人们陆续发现这类含氮和硫的植物次生代谢物质及其降解产物具有抗癌、植物保护以及生物杀菌的作用(Zhang et al., 1994; Mithen et al., 2003; Brader et al., 2006; Kim et al., 2008),其重要性越来越受到人们的重视。

芸薹属植物积累甲硫氨酸来源的脂肪族硫苷、色氨酸来源的吲哚族硫苷和苯丙氨酸来源的芳香族硫苷。目前国内外学者对多种芸薹属植物,芜菁、花椰菜、薹菜、甘蓝等(Kushad et al., 1999; Mithen et al., 2000; Branca et al., 2002; Brown et al., 2002; 何洪巨等, 2002; Vallejo et al., 2002; Kim et al., 2003; Charron et al., 2005; Xu et al., 2006a, 2006b; Padilla et al., 2007; 宋廷宇等, 2008; Ludwig-Müller, 2009; Jia et al., 2009; Sun et al., 2011)的硫苷构成及其含量等做了不少研究。然而,关于中国大白菜中硫苷种类和含量的相关报道较少。

某些异硫氰酸酯(硫苷主要降解产物)与降低人类某些癌症发生率相关(Fahey et al., 2002; Shen et al., 2007)。因此,对大白菜中硫苷组分的鉴定具有重要的意义。本研究中以大白菜[*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis* (Lour.) Olsson]为试材,对不同季节(秋季与春季)不同材料的硫苷成分和含量进行研究,以期为大白菜种质资源利用以及硫苷相关育种提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

2006年春选择了72份大白菜DH系材料(57个品种,15个F₁),2008年秋收集104份大白菜DH系材料(64个品种,40个F₁),以上材料均来源于我国大白菜优良的一代杂种品种或地方品种,其中两年收集到的重复材料为47份(36个品种,11个F₁),分别种植于中国农业科学院蔬菜花卉研究所日光温室内,每品系种3盆,随机排列,3次重复,播种45d后对叶片分别取样,样品用液氮迅速冷冻,真空冷冻干燥研磨成粉末备用。

1.2 硫苷的提取及HPLC分析

硫苷的提取参考何洪巨等(2002)的方法,并做适当的修改。准确称取0.2g冷冻干燥样品于15mL塑料管中,迅速加入5mL煮沸的甲醇(100%)和100μL内标物(苯甲基硫苷),83℃恒温水浴20min,每隔4~5min涡旋1次。离心(3000r·min⁻¹,10min),上清液导入另一塑料管中,冰浴保存。沉淀物再用5mL70%的甲醇重复上述过程两次,合并上清液,即得到样品液。取2mL上清液经DEAE离子交换柱,然后用2mL浓度为0.02mol·L⁻¹醋酸钠溶液冲洗柱子。把柱子转移至另一试管并加入75μL硫酸酯酶(Helix Pomatia Type H-1, Sigma company),在室温下封口过夜。次日,用0.5mL双蒸水清洗柱子3次,洗出液经0.45μm滤膜过滤后用于HPLC分析。HPLC分析系统同何洪巨等(2002)的报道。

对每一样品的硫苷含量进行了方差分析。以品种为固定因子, 不同季节为随机因子, 进行了品种和季节间的联合方差分析。数据采用 SPSS 13.0、SAS 8.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 大白菜中硫苷的组分及含量

大白菜中检测到 8 种主要的硫苷 (表 1), 包含 3 种脂肪族硫苷 (3-丁烯基硫苷 NAP, 4-戊烯基硫苷 GBN 和 2-羟基-3-丁烯基硫苷 PRO), 4 种吲哚族硫苷 (3-吲哚基-甲基硫苷 GBC, 1-甲氧基-3-吲哚基甲基硫苷 NEO, 4-羟基-3-吲哚基甲基硫苷 4OH 和 4-甲氧基-3-吲哚基甲基硫苷 4ME) 和 1 种芳香族硫苷 (2-苯乙基硫苷 NAS)。大白菜中各硫苷的整体含量较低, 脂肪族硫苷的平均含量最高。NAP 和 GBN 的含量相对较高, 分别为 $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ 和 $0.719 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ (2006 年), 分别占总硫苷的 23% 和 22%。3 种类型的硫苷中, 脂肪族硫苷的含量占总硫苷的百分比最大为 60%, 吲哚族次之为 31%, 芳香族最小为 9%。除此之外, 各硫苷的变异范围较广泛, 如 NAP 的变异范围 $0.003 \sim 6.582$, 最大值与最小值间相差 2 194 倍。总硫苷含量也存在较大差异 (图 1), 两年的最高含量为 $12.08 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ (2006 年春) 和 $8.01 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ (2008 年秋); 最低含量 $0.83 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ (2006 年春) 和 $1.17 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ (2008 年秋)。

表 1 47 份大白菜中硫苷成分的构成及含量
Table 1 GS composition and content in 47 genotypes of Chinese cabbage / ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$)

硫苷类别 GS group	2006 年春 Spring in 2006		2008 年秋 Autumn in 2008	
	平均值 Mean	含量范围 Range	平均值 Mean	含量范围 Range
3-丁烯基硫苷 Gluconapin (NAP)	1.000	0.023 ~ 7.007	0.677	0.003 ~ 6.582
4-戊烯基硫苷 Glucobrassicinapin (GBN)	0.719	0.005 ~ 4.540	0.884	0.010 ~ 5.432
2-羟基-3-丁烯基硫苷 Progoitrin (PRO)	0.556	0.068 ~ 2.285	0.518	0.011 ~ 2.979
3-吲哚基-甲基硫苷 Glucobrassicin (GBC)	0.280	0.025 ~ 1.213	0.382	0.029 ~ 1.945
1-甲氧基-3-吲哚基甲基硫苷 Neoglucobrassicin (NEO)	0.290	0.020 ~ 1.480	0.290	0.002 ~ 5.474
4-羟基-3-吲哚基甲基硫苷 4-hydroxyglucobrassicin (4OH)	0.058	0.006 ~ 0.452	0.029	0.001 ~ 0.377
4-甲氧基-3-吲哚基甲基硫苷 4-methoxyglucobrassicin (4ME)	0.487	0.016 ~ 2.120	0.402	0.034 ~ 1.078
2-苯乙基硫苷 Gluconasturtin (NAS)	0.245	0.031 ~ 1.722	0.394	0.041 ~ 2.440

注: Glucosinolate 简称 GS。下同。

Note: GS is short for glucosinolate. The same below.

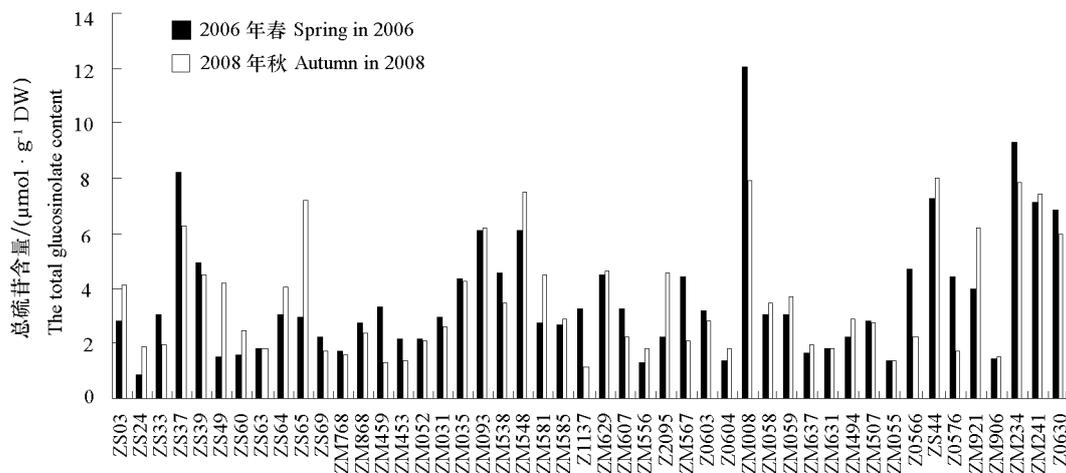


图 1 不同年份和季节 47 份大白菜总硫苷含量

Fig. 1 Total GS content in the 47 varieties of Chinese cabbage sampled in different years

2.2 大白菜中硫苷的主成分分析

将 47 份大白菜中的 8 种硫苷组分进行主成分分析, 结果 (图 2, A) 表明, 第一特征根的方差贡献率为 71.75%, 第二特征根的方差贡献率为 12.10%, 两个特征根的累积贡献率达 83.85%, 第三特征根的方差贡献率为 7.9%, 前 3 个特征根的累积贡献率达到 91.75%。只保留前两个主成分即可代表原始数据的大部分信息。

利用第 1 和第 2 个特征根所对应的特征向量可以构成变量的结构式:

$$Z1 = 0.0084x1 + 0.8483x2 + 0.0057x3 + 0.5270x4 - 0.0224x5 + 0.0120x6 - 0.0353x7 + 0.0253x8;$$

$$Z2 = 0.5285x1 - 0.4417x2 + 0.0171x3 + 0.6989x4 + 0.0429x5 + 0.0500x6 + 0.0587x7 + 0.1703x8。$$

在结构式 Z1 中, x2 的系数为 NAP 的特征向量且最大, 即当 NAP 含量较高时, 第一主成分的得分最高, 因此可以称第一主成分为 NAP 含量因子; 同样, Z2 中 x1、x4 的系数分别为 PRO 和 GBN 的特征向量, 因此可以称第二主成分为 PRO 和 GBN 的含量因子。

以各硫苷在主成分 1 中的得分为横坐标, 在主成分 2 中的得分为纵坐标, 对大白菜中硫苷组分进行分析。脂肪族硫苷 NAP、GBN 和 PRO 在主成分 1、主成分 2 中的得分值最高, 表明大白菜中硫苷组分以脂肪族硫苷为主 (图 2, A)。

同时根据 47 份大白菜材料在主成分 1、主成分 2 中的得分 (图 2, B), 筛选出编号为 32、46、45、41、19 和 47 的 6 份硫苷含量较高的材料。

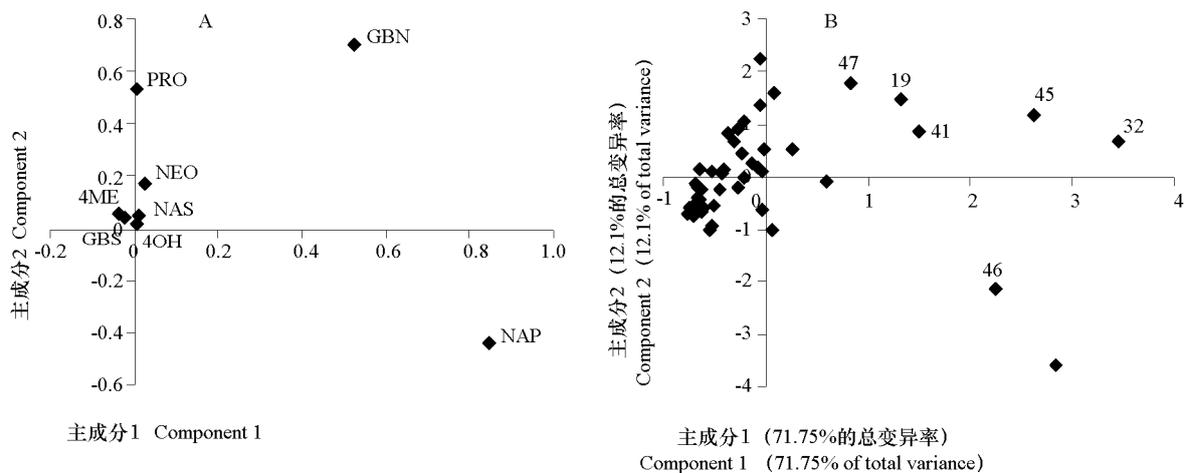


图 2 大白菜中硫苷的主成分分析

A: 大白菜中 8 种硫苷在主成分 1、主成分 2 中的得分; B: 47 份大白菜中硫苷含量在主成分 1、主成分 2 中的得分。

Fig. 2 Principal component analysis on Chinese cabbage

A: Scores for individual GS; B: Scores of principal components 1 and 2 of the GS in 47 Chinese cabbage varieties.

2.3 大白菜各硫苷含量的方差分析

硫苷的合成主要受遗传因素的影响, 同时也受环境条件的影响。对两个季节间各硫苷的含量进行了方差分析, 结果 (表 2) 表明脂肪族硫苷总硫苷含量在不同品种间差异显著。品种与季节间的联合方差分析表明, 不同品种间总硫苷含量差异显著, 3 种类型的脂肪族硫苷的含量在不同品种间和品种 × 季节相互作用间均差异显著。

吲哚族硫苷的含量既受基因型的影响同时也受环境的影响, 不同季节间 GBC 和 4OH 的含量差

异显著, 4OH 和 4ME 的品种 × 季节间的交互作用差异显著。芳香族硫苷 NAS 的含量在不同季节和品种 × 季节间的交互作用均呈显著性相关。

表 2 不同季节各种硫苷含量的方差分析及不同季节与品种之间的联合方差分析
Table 2 Mean squares of the analysis of variance within each season and mean squares of the combined analysis of variance for the GS content in the *Brassica rapa* varieties evaluated at two seasons

类别 Group	硫苷 Glucosinolate	2006 年春 Spring in 2006	2008 年秋 Autumn in 2008	联合方差分析 Combined analysis		
				季节 Season	品种 Variety	季节 × 品种 Season × variety
脂肪族硫苷 Aliphatic-GS	NAP	37.51**	4.44**	8.95**	10.52**	1.64*
	GBN	12.11**	6.39**	3.32	7.55**	1.52*
	PRO	13.82**	2.96**	0.64	3.11**	3.33**
吲哚族硫苷 Indolyl-GS	GBC	2.79**	1.41*	6.92*	2.39**	0.97
	NEO	2.77**	0.93	0	1.57	0.87
	4OH	2.45**	1.55*	6.14*	1.41	2.86**
	4ME	6.86**	2.03**	3.36	2.93	3.55**
芳香族硫苷 Aromatic-GS	NAS	1.37	1.29	8.56**	0.92	1.65*
总硫苷 Total GS	ToGS	15.56**	2.24**	0.07	7.82**	1.02

注: *和**分别表示在 $P \leq 0.05$ 和 $P \leq 0.01$ 水平的差异显著性。

Note: * and ** means significant difference at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$ respectively.

2.4 单一硫苷间及同种硫苷在不同季节间的相关性

单一硫苷间及同种硫苷在不同季节间的相关性分析结果表明(表 3), 两个季节的总硫苷含量呈极显著性正相关。在 8 种类型的硫苷中, 不同季节间同一硫苷间的含量除 4OH, NEO 和 NAS 外均呈极显著性相关, 表明多种硫苷的含量主要是受基因型的影响。

表 3 47 份大白菜中单一硫苷间及同种硫苷在不同季节间的相关性
Table 3 Correlation of individual GS content in 47 genotypes of Chinese cabbage

硫苷 Glucosinolate	PRO	NAP	GBN	4OH	GBC	4ME	NEO	NAS	Total GS
PRO	0.531**	0.096	0.204	0.290*	0.037	-0.045	0.181	-0.024	0.366*
NAP	-0.102	0.882**	0.703**	0.121	-0.115	-0.046	-0.157	-0.006	0.872**
GBN	0.067	0.636**	0.771**	0.205	-0.126	0.002	-0.015	-0.041	0.840**
4OH	0.260	0.163	0.047	0.209	-0.064	0.092	-0.122	-0.003	0.239
GBC	0.139	-0.117	-0.093	0.014	0.428**	0.454**	0.414**	0.016	0.098
4ME	0.134	-0.357*	-0.277	-0.178	0.390**	0.541**	0.341*	-0.008	0.205
NEO	-0.103	0.195	0.293*	-0.093	0.024	-0.146	0.257	0.025	0.139
NAS	0.466**	0.086	0.275	0.222	0.166	-0.005	-0.140	- 0.043	0.061
Total GS	0.357*	0.743**	0.841**	0.187	0.147	-0.130	0.386**	0.434**	0.777**

注: 上三角为 2006 年春各硫苷间的相关性, 下三角为 2008 年秋各硫苷间的相关性。上、下三角间为同种硫苷在不同季节间的相关性。

Note: Upper triangle, correlation coefficients of GS in spring 2006; lower triangle, correlation coefficients of GS in autumn 2008. The middle beam shows the correlation of each individual GS between two different seasons.

3 种脂肪族硫苷在两个季节中均与总硫苷呈显著或极显著正相关。其中 NAP 与总硫苷的相关系数达到 0.872 (2006 年春) 和 0.743 (2008 年秋), GBN 与总硫苷的含量间的相关系数为 0.840 (2006 年春) 和 0.841 (2008 年秋), 同时说明了脂肪族硫苷含量主要受遗传因子的控制。另外, NAP 和 GBN 间呈极显著正相关, NAP 和 PRO 呈负相关 (2008 年秋), 这是因为在其生物合成过程中 NAP 侧链的羟基化作用生成 PRO (Brown et al., 2002), PRO 与 NAP 的代谢产物相关。比较而言, 吲哚族硫苷较脂肪族硫苷更易受环境的影响, 因此它们之间的相关关系较复杂, 吲哚族硫苷中有多种类型的硫苷含量与某些类型的脂肪族硫苷呈显著性相关, 吲哚族内 GBC 与 4ME 的含量显著相关(2008 年秋)。芳香族硫苷 NAS 与其他类型的硫苷间也呈现一定的相关性, 但绝大多数未达到显著水平。

3 讨论

在本试验中, 通过 HPLC 法在 129 份大白菜材料中共检测到 8 种硫苷, 其中以脂肪族硫苷的含量最高, 占到总硫苷含量的 60% 之多, 吲哚族次之, 芳香族硫苷的含量最低。大白菜中硫苷总含量为 $3.61 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$, 较芸薹属其他作物含量 (Kushad et al., 1999; Padilla et al., 2007) 低。大白菜主要以叶球作为食用器官, 中国及东亚其他地区人们偏好苦味较淡的口感, 因此可能经过长期的人工选择, 最终形成了大白菜硫苷含量较低, 口感较淡的特性。不同品种间硫苷的总含量具有较大的差异且变异范围广泛; 同一材料在不同环境条件下硫苷含量也不同, 可见环境因素对硫苷积累存在一定影响。

大白菜中硫苷组分的主成分分析显示, 脂肪族硫苷 NAP、GBN 和 PRO 含量最高, 表明了脂肪族硫苷是大白菜中主要的硫苷; 同时筛选出 6 份高硫苷含量的材料, 它们将为白菜硫苷相关育种提供较理想的种质资源。另外考虑到芸薹属其他作物硫苷含量较高, 因此, 在进行大白菜有益硫苷相关性状育种操作过程中有必要考虑不同种间杂交。

本研究中对不同大白菜材料中硫苷含量进行了方差分析, 同时也进行了季节与材料间的联合方差分析。结果表明, 3 种类型的脂肪族硫苷 NAP、GBN 和 PRO 的含量在不同品种间和品种 \times 季节互作间均差异显著, 表明脂肪族硫苷的合成主要受遗传因子的控制。吲哚族硫苷间的相关性较差, 这说明吲哚族硫苷的合成受遗传因子影响的同时也受环境因子的影响, 这与 Kushad 等 (1999) 和 Kim 等 (2003) 的结论较为一致。而芳香族硫苷 NAS 的含量在不同季节间差异显著, 表明 NAS 含量的积累主要受环境因素的影响。

相关性分析表明, 同种硫苷在不同季节间存在相关性, 其中脂肪族硫苷中同一硫苷在不同季节间呈极显著正相关, 同时脂肪族硫苷与总硫苷含量也呈极显著正相关。此外不同类型的脂肪族硫苷间也有一定的相关性, NAP 与 PRO 负相关, GBN 与 NAP 呈极显著正相关, 这与它们生物合成途径息息相关 (Sonderby et al., 2010)。吲哚族硫苷占总含量的 21%, 相对含量较高, 具有较高的营养价值, 但吲哚族硫苷之间的相关性以及与脂肪族和芳香族硫苷含量间的相关性不明显, 可见环境因素在吲哚族硫苷积累过程中存在不可忽视的作用。

大量研究表明, 萝卜硫苷 (GRA) 的降解产物萝卜硫素具有强烈的抗癌作用 (Zhang et al., 1994; Mithen et al., 2003; Kim et al., 2008), 而本研究在 129 份大白菜材料中均未检测到 GRA。GRA 在 AOP2 基因的催化下生成 NAP, NAP 经 GSL-OH 基因作用后转变为一种可引起哺乳动物甲状腺肿大的硫苷, PRO (Griffiths et al., 1998)。本研究中发现, 大白菜中 NAP 和 PRO 的含量较高, 如果使 AOP2 丧失作用, 势必会引起 NAP 含量的降低, 同时 PRO 的含量也会大幅度减少, 而 NAP 上游产物 GRA 将会大量富集。因此, 这也提示通过基因工程的手段改良大白菜中硫苷组分, 尤其是增加有益硫苷的含量理论上存在可能性。

References

- Brader G, Mikkelsen M, Halkier B, Tapio Palva E. 2006. Altering glucosinolate profiles modulates disease resistance in plants. *The Plant Journal*, 46 (5): 758 - 767.
- Branca F, Li G, Goyal S, Quiros C F. 2002. Survey of aliphatic glucosinolates in sicilian wild and cultivated Brassicaceae. *Phytochemistry*, 59: 717 - 724.
- Brown A F, Yousef G G, Jeffer E H, Klein B P, Walling M A, Kushad M M, Juvik J A. 2002. Glucosinolate profile in broccoli: Variation in levels and implications in breeding for cancer chemoprotection. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127: 807 - 813.
- Charron C S, Saxton A M, Carl E S. 2005. Relationship of climate and genotype to seasonal variation in the glucosinolate-myrosinase system. I.

- Glucosinolate content in ten cultivars of *Brassica oleracea* grown in fall and spring seasons. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85: 671 - 681.
- Fabey J W, Salemann A T, Talalay P. 2001. The chemical diversity and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry*, 56: 5 - 51.
- Fahey J W, Haristoy X, Dolan P M, Kensler T W, Scholtus I, Stephenson K K, Talalay P, Lozniewski A. 2002. Sulforaphane inhibits extracellular, intracellular, and antibiotic-resistant strains of *Helicobacter pylori* and prevents benzo[a] pyrene-induced stomach tumors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99: 7610 - 7615.
- Griffiths D W, Birch A N E, Hillman J R. 1998. Antinutritional compounds in the Brassicaceae—Analysis, biosynthesis, chemistry and dietary effects. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 73: 1 - 18.
- Halkier B A, Gershenzon J. 2006. Biology and biochemistry of glucosinolates. *Annual Review of Plant Biology*, 57: 303 - 333.
- He Hong-ju, Chen Hang, Schnitzer W H. 2002. Glucosinolate composition and contents in *Brassica* vegetables. *Scientia Agricultura Sinica*, 35 (2): 192 - 197. (in Chinese)
- 何洪巨, 陈杭, Schnitzer 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.
- Jia Cheng-guo, Xu Chao-jiong, Wei Jia, Yuan Jing, Yuan Gao-feng, Wang Bing-liang, Wang Qiao-mei. 2009. Effect of modified atmosphere packaging on visual quality and glucosinolates of broccoli florets. *Food Chemistry*, 114: 28 - 37.
- Kim S J, Kawaguchi S, Watanabe Y. 2003. Glucosinolates in vegetative tissues and seeds of 12 cultivars of vegetable turnip rape (*Brassica rapa* L.). *Soil Science and Plant Nutrition*, 49: 337 - 346.
- Kim J, Lee B, Schroeder F, Jander G. 2008. Identification of indole glucosinolate breakdown products with antifeedant effects on *Myzus persicae* (green peach aphid). *The Plant Journal*, 54 (6): 1015 - 1026.
- Kushad M M, Brown A F, Kurilich A C, Juvik J A, Klein B K, Wallig M A, Jeffery E H. 1999. Variation of glucosinolates in vegetable subspecies of *Brassica oleracea*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47: 1541 - 1548.
- Ludwig-Müller J. 2009. Glucosinolates and the clubroot disease: Defense compounds or auxin precursors. *Phytochemistry Reviews*, 8: 135 - 148.
- Mithen R F, Dekker M, Verkerk R, Rabot S, Johnson I T. 2000. The nutritional significance, biosynthesis and bioavailability of glucosinolates in human foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80: 967 - 984.
- Mithen R, Faulkner K, Magrath R, Rose P, Williamson G, Marquez J. 2003. Development of isothiocyanate-enriched broccoli, and its enhanced ability to induce phase 2 detoxification enzymes in mammalian cells. *Theoretical and Applied Genetics*, 106 (4): 727 - 734.
- Padilla G, Cartea M E, Velasco P, de Haro A, Ordas A. 2007. Variation of glucosinolates in vegetable crops of *Brassica rapa*. *Phytochemistry*, 68: 536 - 545.
- Shen G, Khor T O, Hu R, Yu S, Nair S, Ho C T, Reddy B S, Huang M T, Newmark H L, Kong A N. 2007. Chemoprevention of familial adenomatous polyposis by natural dietary compounds sulforaphane and dibenzoylmethane alone and in combination in Apc Min/+ mouse. *Cancer Res*, 67: 9937 - 9944.
- Song Ting-yu, Hou Xi-lin, He Qi-wei, Wu Chun-yan, Xu Yuan-fang. 2008. Evaluation of glucosinolate composition and contents in Tai-tsay. *Acta Horticulturae Sinica*, 35 (8): 1161 - 1166. (in Chinese)
- 宋廷宇, 侯喜林, 何启伟, 吴春燕, 徐苑芳. 2008. 蕹菜中硫代葡萄糖苷的鉴定与含量分析. *园艺学报*, 35 (8): 1161 - 1166.
- Sonderby I E, Geu F F, Halkier B A. 2010. Biosynthesis of glucosinolates—gene discovery and beyond. *Trends in Plant Science*, 15 (5): 283 - 90.
- Sun B, Liu N, Zhao Y T, Yan H Z, Wang Q M. 2011. Variation of glucosinolates in three edible parts of Chinese kale (*Brassica alboglabra* Bailey) varieties. *Food Chemistry*, 124 (3): 941 - 947.
- Vallejo F, Tomás-Barberán F, García-Viguera C. 2002. Potential bioactive compounds in health promotion from broccoli cultivars grown in Spain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82: 1293 - 1297.
- Xu C J, Guo D P, Yuan J, Yuan G F, Wang Q M. 2006a. 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: 176 - 184.
- Xu C, Huang M T, Shen G, Yuan X, Lin W, Khor T O, Conney A H, Kong A N. 2006b. Inhibition of 7, 12-dimethyl-benz(a)anthracene-induced skin tumorigenesis in C57BL/6 mice by sulforaphane is mediated by nuclear factor E2-related factor 2. *Cancer Research*, 66: 8293 - 8296.
- Zhang Y, Kensler T W, Cho C G, Posner G H, Talalay P. 1994. Anticarcinogenic activities of sulforaphane and structurally related synthetic norbornyl isothiocyanates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91: 3147 - 3150.