

结球甘蓝不同品种及部位中主要生物活性物质含量比较

方孟玮¹, 杨润强¹, 郭丽萍^{1,2}, 王志英¹, 顾振新^{1,*}

(1.南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095; 2.青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109)

摘要:对春大将、帕特、汉城和春优4种结球甘蓝 (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) 以及帕特甘蓝的不同部位中硫代葡萄糖苷、异硫氰酸盐 (isothiocyanate, ITCs)、总酚和抗坏血酸等主要生物活性物质含量进行比较。结果表明: 各品种中脂肪族硫苷含量均最高。其中帕特甘蓝中总硫苷、脂肪族硫苷均高于其他3个品种, 且其不同部位中总硫苷含量以外部叶为最高, 而中部叶中含量最低。帕特甘蓝中ITCs和总酚含量最高, 汉城甘蓝中抗坏血酸含量高于其他3个品种; 春大将甘蓝中黑芥子酶 (myrosinase, MYR) 活性最高, 帕特和春优甘蓝中其活性差异不显著, 汉城甘蓝中最低。帕特甘蓝中ITCs和抗坏血酸含量以外部叶为最高, 总酚含量则在内部叶中最高, MYR活性在中部叶和内部叶中显著高于外部叶。可见, 帕特甘蓝可作为功能性食品的原料加以开发利用。

关键词:甘蓝; 硫代葡萄糖苷; 异硫氰酸盐; 总酚; 抗坏血酸; 黑芥子酶

Comparison of Main Bioactive Substance Contents among Different Varieties and Parts of Cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.)

FANG Mengwei¹, YANG Runqiang¹, GUO Liping^{1,2}, WANG Zhiying¹, GU Zhenxin^{1,*}

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Comparison of the contents of glucosinolates, isothiocyanates, total phenols, ascorbic acid and other major bioactive substances among four cabbage varieties including 'Chundajiang', 'Pate', 'Hancheng', 'Chunyou' and different parts of 'Pate' cabbage was conducted. The results showed that contents of aliphatic thioglycosides were the highest of the total glucosinolates (GLs). Among the four cabbage varieties, the contents of total GLs and aliphatic thioglycosides in 'Pa Te' cabbage were the highest. The content of total GLs in outer leaves of 'Pate' cabbage was the highest, and the lowest in the central. The contents of ITCs and total phenols in 'Pate' cabbage were the highest among the cultivars analyzed. Ascorbic acid content in ball leaves of 'Hancheng' cabbage was higher than in other three varieties. Ball leaves of 'Chundajiang' cabbage contained the highest myrosinase (MRY) activity. No significant difference in myrosinase (MRY) activity was detected between 'Pate' and 'Chunyou', whereas in 'Hancheng', MRY activity was the lowest. The contents of ITCs and ascorbic acid in outer leaves and the content of total phenols in central leaves of 'Pate' cabbage were the highest. MRY activity in central and internal leaves of 'Pate' cabbage was significantly higher than that in the outer leaves. Thus, 'Pate' cabbage can be developed as a functional food raw material.

Key words: cabbage; glucosinolates; isothiocyanates; total phenols; ascorbic acid; myrosinase

中图分类号: TS255.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2015) 06-0187-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201506035

结球甘蓝 (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.), 俗称包菜、卷心菜, 是十字花科芸薹属蔬菜, 食用部位为

叶球。甘蓝富含抗坏血酸、VA原、VB₁、VB₂、叶酸、多酚等物质, 尤其硫代葡萄糖苷 (glucosinolates, GLs)

收稿日期: 2014-08-08

基金项目: 江苏省科技支撑项目 (BE2013430); 国家自然科学基金面上项目 (31271912);

江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介: 方孟玮 (1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工与综合利用。E-mail: 2012108083@njau.edu.cn

*通信作者: 顾振新 (1956—), 男, 教授, 博士, 研究方向为生物技术与农产食品加工、功能食品创制原理与技术。

E-mail: guzx@njau.edu.cn

含量丰富^[1]。硫苷结构包括 β -D-硫葡萄糖基、磺酸肟以及由氨基酸衍生而成的支链,根据其支链的不同可将GLs分为脂肪族、芳香族和吡啶族GLs 3大类^[2]。甘蓝等蔬菜受到细胞破碎等机械损伤后,其中的GLs迅速与黑芥子酶(myrosinase, MYR)接触,被水解成异硫氰酸盐(isothiocyanate, ITCs)、硫氰酸盐和腈类等物质^[3]。近年来,富含ITCs的功能性呈味食品日益受到关注。ITCs是迄今发现的蔬菜中最具抗癌作用的生物活性物质^[4],可有效地防止饮食中多环芳烃、杂环胺和亚硝胺等多种物质引起的DNA损伤,对啮齿类动物肝癌、乳腺癌、肺癌、食道癌和胃癌的形成有明显的阻断作用^[5]。ITCs还具有杀菌、抗虫、抗氧化、抑制血小板聚集等作用^[6]。蔬菜中抗坏血酸、多酚类物质对人体也具有保健作用^[7-8]。

本研究以江苏地区主栽的4种结球甘蓝为试材,研究其叶片中GLs、ITCs、总酚、抗坏血酸、MYR活性差异及其在叶球各部位的分布,以期为选取高GLs含量的甘蓝原料、并以此开发功能性食品提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

结球甘蓝:品种为春大将(大平头型)、帕特(小平头型)、汉城(牛心型)和春优(鸡心型)甘蓝,种植于南京郊区,达到食用成长度时于2014年春季采收。

烯丙基硫苷、硫酸酯酶、抗坏血酸 美国Sigma公司; DEAE Sephadex A-25树脂 北京Solarbio公司; 乙腈(色谱纯) 上海陆都化学试剂厂; 二氯甲烷、福林-酚、草酸、甲醇、乙醇、没食子酸、醋酸钠、盐酸、氢氧化钠、乙酸(均为分析纯)、考马斯亮蓝G-250(生化试剂) 国药集团上海化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

WH-3型微型旋涡混合仪 上海沪西分析仪器厂; DZF-6020型真空冷冻干燥系统 美国Labconco公司; 818型pH计 美国Orion Research公司; 755B型分光光度计 上海精密科学仪器有限公司; 1200液相色谱仪(配紫外检测器) 美国安捷伦公司; TDL-40B离心机 上海安亭科学仪器厂; HH-6数显恒温水浴锅常州国华电器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 品种比较实验

品种比较:春大将、帕特、汉城、春优甘蓝的叶片经冷冻干燥,粉碎后过200目筛,测定GLs等含量和MYR活性。

部位比较:将帕特甘蓝叶球从外向内每7片叶为一个部分,依次分为外部叶、中部叶、内部叶3部分,经冷冻干燥,粉碎成粉末,过200目筛,测定硫苷等含量与MYR活性。

1.3.2 GLs的提取

根据Font等^[9]的方法并作适当修改。准确称取0.20 g样品加入4 mL煮沸的体积分数70%甲醇,水浴后离心,收集上清液,沉淀再用甲醇提取,合并上清液。取1 mL上清液流经DEAE SephadexTM A-25离子交换柱,待提取液全部排干后,用2 mL 0.02 mol/L醋酸钠溶液分2次冲洗柱子,然后加入200 μ L硫酸酯酶,于35 $^{\circ}$ C条件下反应16 h后洗脱,洗脱液经0.45 μ m滤膜过滤后用于高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)分析。

HPLC分析条件:色谱柱为Eclipse XDB-C₁₈柱(4.6 mm \times 150 mm, 5 μ m);流动相为超纯水和乙腈,先用水洗脱1 min, 1~21~26 min内乙腈的线性梯度为体积分数0%~20%~0%;检测波长226 nm;流速1 mL/min;柱温30 $^{\circ}$ C;进样量20 μ L;以烯丙基硫苷作为内标。

1.3.3 ITCs含量

参照Guo Qianghui等^[10]提供的方法。取0.5 g样品,用4 mL蒸馏水匀浆,在40 $^{\circ}$ C条件下酶解3 h后,离心(10 000 \times g, 15 min),收集上清液。取100 μ L上清液,与2 mL甲醇,1.8 mL硼砂缓冲液(0.2 mol/L, pH 8.5), 200 μ L 1,2-苯二硫醇(7 nmol/L)混匀后,于65 $^{\circ}$ C条件下反应1 h后,过0.45 μ m膜, HPLC进行分析,以萝卜硫素的标准曲线来计算。

HPLC条件:色谱柱为Eclipse XDB-C₁₈柱(4.6 mm \times 150 mm, 5 μ m);流动相甲醇-水体积比7:3;流速1.00 mL/min;进样量20 μ L;检测波长365 nm。

1.3.4 总酚含量

参照Ainsworth等^[11]的方法测定甘蓝总酚含量。取0.2 g样品,用5 mL体积分数50%甲醇研磨匀浆,匀浆液于10 000 \times g离心15 min后收集上清液。取1 mL上清液,加入1 mL 0.2 mol/L福林酚试剂和2 mL质量分数2% Na₂CO₃溶液,室温避光反应2 h后,于波长765 nm处测定吸光度。用没食子酸作标准曲线,计算出样品中总酚含量。

1.3.5 抗坏血酸含量

根据Volden等^[12]的方法作适当修改。称取0.2 g样品,用4 mL质量分数2%草酸溶液研磨提取,匀浆液于10 000 \times g离心15 min后收集上清液。过0.45 μ m膜, HPLC测定。HPLC条件:色谱柱为SB-C₁₈色谱柱;检测波长254 nm;流速0.8 mL/min;柱温30 $^{\circ}$ C;全文所测量含量均以干质量计。进样量20 μ L;流动相0.1%草酸-甲醇(95:5, V/V)。全文所测含量均以干质量计。

1.3.6 MYR活性

参照Kim等^[13]的方法。取0.2 g样品,用3 mL 0.1 mol/L pH 6.5磷酸盐缓冲液冰浴研磨,离心,上清液即为粗酶

液。取粗酶液0.5 mL与0.5 mL 0.1 mol/L烯丙基硫苷混合，水浴反应后沸水灭酶，以葡萄糖试剂盒测定葡萄糖的含量。以每分钟被MYR转化生成1 nmol葡萄糖为1个酶活力单位，酶活单位为U/mg pro。

1.4 数据分析

数据采用统计分析软件18.0 (SPSS 18.0) 进行统计分析，均值间比较采用Duncan's多重比较，在0.05水平上进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 4种甘蓝品种的球叶中GLs含量差异

表1 不同甘蓝品种的球叶中GLs含量

Table 1 Contents of GLs in ball leaves of different varieties of cabbage $\mu\text{mol/g}$

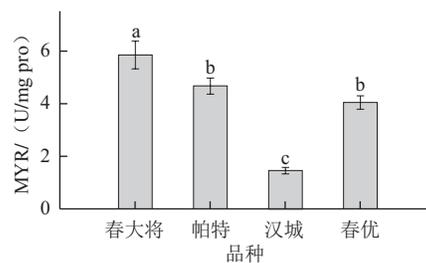
GLs种类	春大将	帕特	汉城	春优	
脂肪族GLs	GIB	5.23±0.21 ^d	4.42±0.20 ^e	5.81±0.09 ^a	5.36±0.02 ^b
	PRO	17.76±0.04 ^b	19.51±0.08 ^a	15.55±0.19 ^f	10.43±0.16 ^d
	SIN	8.79±0.14 ^e	15.74±0.20 ^a	10.06±0.11 ^b	2.65±0.09 ^d
	GNA	4.67±0.09 ^d	3.76±0.12 ^b	3.97±0.11 ^c	5.34±0.14 ^a
吡啶族GLs	4-HGB	0.22±0.02 ^{bc}	0.15±0.02 ^e	0.43±0.05 ^a	0.30±0.07 ^b
	GB	8.92±0.15 ^a	3.92±0.07 ^b	2.40±0.14 ^c	2.67±0.08 ^d
	4MGB	0.62±0.06 ^c	0.40±0.04 ^b	0.99±0.15 ^a	0.22±0.19 ^a
	脂肪族GLs	36.42±0.16 ^b	43.43±0.18 ^a	35.39±0.15 ^b	23.69±0.20 ^c
总GLs	46.17±0.14 ^a	47.90±0.14 ^a	39.21±0.04 ^b	26.97±0.11 ^c	

注: GIB. 3-甲基亚酰基丙基GL; PRO. 2-S-羟基-3-丁烯基GL; SIN. 2-丙烯基GL; GNA. 3-丁烯基GL; 4-HGB. 4-羟基-3-吡啶甲基GL; GB. 1-磺酸-3-吡啶甲基GL; 4MGB. 4-甲氧基-3-吡啶甲基GL。不同小写字母代表各指标在0.05水平上差异显著。下同。

从表1可知，帕特和春大将甘蓝中总GLs含量显著高于汉城甘蓝和春优甘蓝，春优甘蓝中总GLs含量显著低于汉城甘蓝；4个品种的甘蓝中均检测到7种GLs，包括4种GLs (GIB、PRO、SIN、GNA) 和3种吡啶族GLs (4-HGB、GB、4MGB)，其中含量最高的GLs均为PRO。4个品种的甘蓝中脂肪族GLs含量以帕特为最高 (43.43 $\mu\text{mol/g}$)，汉城、春大将其次，而春优甘蓝中脂肪族GLs含量不足帕特甘蓝的55%。在帕特中，除PRO外，SIN含量较高，分别是春大将、汉城和春优甘蓝的1.79、1.56倍和3.80倍；春大将甘蓝中GB含量较高，分别是帕特、汉城和春优甘蓝的2.28、3.72倍和3.34倍。可见，帕特甘蓝中总GLs和脂肪族GLs含量具有优势。

2.2 4种甘蓝品种的球叶中MYR活性差异

由图1可知，春大将甘蓝中MYR活性最高，帕特、春优甘蓝中MYR活性差异不显著，而汉城甘蓝中MYR活性显著低于其他3个品种，仅为春大将甘蓝中MYR活性的24.7%。可见，不同甘蓝品种中，MYR活性差异较大。



不同小写字母代表各指标在0.05水平上差异显著。下同。

图1 不同甘蓝品种的球叶中MYR活性

Fig.1 Comparison of MYR activity of ball leaves of different varieties of cabbage

2.3 4种甘蓝球叶中ITCs、总酚和抗坏血酸含量差异

表2 不同品种的甘蓝球叶中ITCs、总酚和抗坏血酸含量比较

Table 2 Comparisons of contents of ITCs, total phenolics and ascorbic acid in different varieties of cabbage $\text{mg}/100\text{g}$

指标	品种			
	春大将	帕特	汉城	春优
ITCs	2.83±0.07 ^c	3.43±0.03 ^a	2.38±0.05 ^d	2.94±0.11 ^b
总酚	168.74±0.05 ^d	373.63±0.15 ^a	360.52±0.24 ^b	313.70±0.16 ^c
抗坏血酸	222.69±0.22 ^d	257.25±0.06 ^c	607.40±0.10 ^a	375.71±0.04 ^b

由表2可知，4种甘蓝品种的ITCs含量以帕特甘蓝为最高，春优、春大将甘蓝其次，而汉城甘蓝中ITCs含量最低。帕特甘蓝中总酚含量最高，春大将甘蓝中总酚含量最低，不足帕特甘蓝中的45.16%。汉城甘蓝中抗坏血酸含量高于其他3种品种，分别是春大将、帕特、春优甘蓝中的2.73、2.36倍和1.62倍。

2.4 帕特甘蓝球叶不同部位中GLs含量差异

表3 甘蓝球叶不同部位中GLs含量比较

Table 3 Comparison of GLs contents in different parts of cabbage leaves $\mu\text{mol/g}$

GLs种类	部位			
	外部叶	中部叶	内部叶	
脂肪族GLs	GIB	5.22±0.21 ^a	3.05±0.01 ^c	4.11±0.11 ^b
	PRO	17.78±0.02 ^b	12.53±0.01 ^c	18.67±0.02 ^a
	SIN	10.80±0.04 ^b	7.43±0.08 ^c	12.58±0.01 ^a
	GNA	5.66±0.11 ^a	3.35±0.01 ^c	4.07±0.03 ^b
吡啶族GLs	4-HGB	0.23±0.02 ^b	0.15±0.01 ^c	0.36±0.02 ^a
	GB	8.83±0.20 ^a	5.96±0.03 ^c	7.36±0.20 ^b
	4MGB	0.63±0.00 ^b	0.41±0.00 ^c	0.89±0.01 ^a
脂肪族GLs	39.46±0.17 ^a	26.36±0.09 ^b	39.43±0.13 ^a	
总GLs	49.15±0.03 ^a	32.88±0.07 ^b	48.05±0.09 ^a	

从4种甘蓝品种中选取总GLs、脂肪族GLs及其水解产物ITCs含量具有优势的帕特甘蓝为原料，将其球叶分为外部叶、中部叶和内部叶，比较球叶不同部位中GLs含量差异。从表3可知，甘蓝外部叶、内部叶的总GLs含量显著高于中部叶，中部叶的总GLs含量仅为外部叶中的67%。脂肪族GLs含量以外部叶和内部叶为最高，从脂

肪族GLs占总GLs含量的比例看,其顺序为内部叶>外部叶>中部叶,分别达到82.06%、80.28%和80.17%。这表明,虽然各部位的GLs组分相同,但各组分的含量及其相对含量与部位具有相关性。对帕特甘蓝球叶不同部位中测得的几种GLs占总硫苷含量的百分比分析表明:其外部叶、中部叶、内部叶的总脂肪族GLs含量均高于总吲哚族GLs含量。内部叶中PRO含量最高,其次为SIN。SIN是甘蓝主要苦味物质^[13],以内部叶中含量最高,中部叶最低。GB是甘蓝中的主要活性物质,外部叶、中部叶和内部叶所占比重分别为17.97%、18.13%和15.32%。

2.5 帕特甘蓝球叶不同部位中MYR活性差异

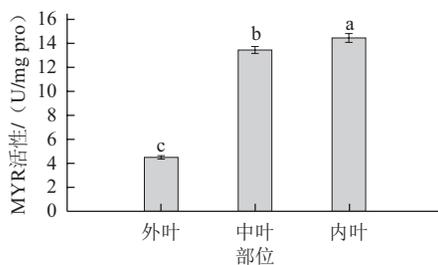


图2 甘蓝球叶不同部位中MYR活性比较

Fig.2 Comparison of MYR activity in different parts of cabbage leaves

由图2可知,甘蓝球叶的中部叶、内部叶中MYR活性显著高于外部叶。内部叶中MYR活性最高为14.45 U/mg pro,其次为中部叶13.43 U/mg pro,外部叶仅为4.50 U/mg pro。外部叶中MYR活性不足内部叶的31.18%。

2.6 帕特甘蓝球叶不同部位中ITCs、总酚和抗坏血酸含量差异

表4 甘蓝球叶不同部位中ITCs、总酚和抗坏血酸含量比较

Table 4 Comparisons of contents of ITCs, total phenolics and ascorbic acid in different varieties of cabbage

指标	部位		
	外部叶	中部叶	内部叶
ITCs	6.61±0.08 ^a	3.38±0.46 ^b	3.51±0.58 ^b
总酚	418.79±0.38 ^b	400.65±0.59 ^b	504.26±0.36 ^a
抗坏血酸	283.83±0.20 ^a	160.60±0.15 ^b	222.99±0.08 ^c

由表4可知,帕特甘蓝外部叶中ITCs含量显著高于中部叶、内部叶,分别为中部叶、内部叶的1.96、1.88倍,中部叶、内部叶中ITCs含量无显著性差异。帕特甘蓝内部叶的总酚含量最高,外部叶其次,中部叶最低,不足外部叶中的79.46%,外部叶、中部叶中总酚含量之间无显著差异。外部叶中抗坏血酸含量最高,中部叶中含量最低,不足外部叶的56.59%。

3 讨论与结论

蔬菜中GLs及其降解产物具有抗虫、抗病和抗癌

作用,且赋予植物风味,其种类和含量差异直接影响其降解产物的生物活性。十字花科植物中总GLs含量以甘蓝类蔬菜为最高,其次是白菜类和芥菜类蔬菜^[14]。本研究表明4个甘蓝品种的叶球中总GLs平均含量为40.06 μmol/g,最高可达47.90 μmol/g,高于大白菜、芥菜^[15-17]。在不同甘蓝品种、不同部位中GLs的含量差异显著(表1、3)。

本研究在4个不同品种的甘蓝叶球中均检测到7种GLs,分别是GIB、PRO、SIN、GNA、4-HGB、GB和4MGB。弓志青等^[18]在甘蓝中除检测到以上7种外,还检测到4-戊烯基GL、3-甲基硫氧丙基GL、3-甲基亚磺酰丁基GL,程坤等^[19]在甘蓝中检测到芳香族GLs(苯乙基GL),本研究中未检测到芳香族GLs。这一差异可能与甘蓝品种、生长时期、栽培环境等因素有关。本实验的4个甘蓝品种中GLs组分相同,且脂肪族GLs为其主要组分,这与弓志青等^[18]的研究结果一致。本研究结果还表明GLs的含量与甘蓝品种及其部位有关(表1、3)。在对不同甘蓝品种中各种GLs占总GLs的百分比分析时发现:4种甘蓝品种中均以PRO为主,帕特甘蓝中总GLs、脂肪族GLs均高于其他3种甘蓝。

GLs降解产物因其功能作用的复杂性而受到科研工作者的广泛关注。本研究发现,不同甘蓝品种中的MYR活性差异较大,汉城甘蓝中MYR活性显著低于其他3个品种(图1),外部叶中MYR含量显著低于中部叶、内部叶(图2)。GLs水解产生的ITCs能有效地防止饮食中多环芳烃、杂环胺和亚硝胺所引起的DNA损伤和癌症^[5-6]。4种甘蓝品种之间ITCs含量以帕特中ITCs含量最高,春优、春大将其次,汉城甘蓝则最低,并且帕特甘蓝的外部叶中ITCs含量显著高于中部叶和内部叶,这可能与植物次生代谢物质易在成熟器官中累积有关。

研究工作者对于蔬菜品质的关注已从产量、外形和营养成分逐步转向对人体具有特殊生理功能的物质方面。甘蓝含有丰富的抗坏血酸和多酚等抗氧化成分以及具有抗癌功能的GLs和ITCs(表2、4),因而甘蓝是一种值得提倡大量食用的蔬菜。总酚具有清除自由基、抗氧化的能力,每天摄取一定量的甘蓝可以抑菌消炎、抗病毒、减少患心血管疾病、癌症的几率^[7]。帕特甘蓝中总酚的含量显著高于春大将、春优甘蓝,而帕特甘蓝内部叶显著高于外部叶和中部叶,这可能与总酚合成的部位、转运方式等有关。人体摄入一定量的抗坏血酸可保证正常的生理代谢^[8]。汉城甘蓝中抗坏血酸含量显著高于其他3种品种,其次是春优、帕特甘蓝,而春大将甘蓝中抗坏血酸含量最低。帕特甘蓝外部叶中抗坏血酸含量高于中部叶和内部叶,这可能与次生代谢物质的积累方式、植物细胞分裂以及植物质膜的转运^[20]等有关。

参考文献:

- [1] 何娜. 结球甘蓝富集 γ -氨基丁酸工艺研究及其超细微粉开发[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 1-2.
- [2] 李晨, 薛峰, 缪文华, 等. 硫甙葡萄糖苷降解研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(9): 71-72.
- [3] 姜子涛, 张清峰, 李荣. 异硫氰酸酯的产生、化学性质及测定方法[J]. 中国调味品, 2005, 30(4): 9-14.
- [4] YANG Peng, CHEN Baoan, LIU Delong. Anticancer mechanisms and researches of isothiocyanates[J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2008, 6(5): 325-332.
- [5] 罗丽娜. 硫代葡萄糖苷水解产物抗肿瘤作用的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 7-12.
- [6] GUO Rongfang, YANG Gaofeng, WANG Qiaomei. Effect of sucrose and mannitol on the accumulation of health-promoting compounds and the activity of metabolic enzymes in broccoli sprouts[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 128(3): 159-165.
- [7] 翟清波, 李诚, 王静, 等. 植物多酚降血糖和降血脂作用研究进展[J]. 中国药房, 2012, 23(3): 279-281.
- [8] 何琳琳. 抗坏血酸测定方法及存在的问题探讨[J]. 西南科技大学学报, 2005, 20(1): 69-71.
- [9] FONT R, RÍO-CELESTINO M, CARTEA E, et al. Quantification of glucosinolates in leaves of leaf rape (*Brassica napus* ssp. *pabularia*) by near-infrared spectroscopy[J]. Phytochemistry, 2005, 66(2): 175-185.
- [10] GUO Qianghui, GUO Liping, WANG Zhiying, et al. Response surface optimization and identification of isothiocyanates produced from broccoli sprouts[J]. Food Chemistry, 2013, 141: 1580-1586.
- [11] AINSWORTH E A, GILLESPIE K M. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent[J]. Nature Protocols, 2007, 2(4): 875-877.
- [12] VOLDEN J, BERGE G A, BENGTSSON G B, et al. Effect of thermal treatment on glucosinolates and antioxidant-related parameters in red cabbage (*Brassica oleracea* L. ssp. *capitata* f. *rubra*) [J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 595-605.
- [13] KIM H J, CHEN F, WANG X, et al. Effect of methyl jasmonate on phenolics, isothiocyanate, and metabolic enzymes in radish sprout (*Raphanus sativus* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(19): 7263-7269.
- [14] 蒋晓丽, 刘伟, 郭世荣. 硫代葡萄糖苷影响因子及其生理功能研究[J]. 现代园艺, 2008(12): 4-5.
- [15] 孙秀波, 慕美财, 李玫瑰, 等. 十字花科蔬菜硫代葡萄糖苷含量比较[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(19): 64-65.
- [16] 何洪巨, 陈杭, SCHNITZLER W H. 芸薹属蔬菜中硫代葡萄糖苷鉴定与含量分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2): 192-197.
- [17] 廖永翠, 宋明, 王辉, 等. 大白菜中硫代葡萄糖苷的鉴定及含量分析[J]. 园艺学报, 2011, 38(5): 963-969.
- [18] 弓志青, 张愨, 刘春泉. 甘蓝不同部位及加工对硫代葡萄糖苷组分和含量的影响[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 218-223.
- [19] 程坤. 甘蓝硫代葡萄糖苷含量与其相关合成和调节基因表达关系的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010: 21-22.
- [20] 邹礼平. 番茄抗坏血酸生物合成与代谢途径中相关酶基因的克隆与调控[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005: 13-21.