

十字花科植物中硫代葡萄糖苷激发因子研究进展

彭 佩, 卿志星, 田 艳, 邓放明*

(湖南农业大学食品科学技术学院, 长沙 410128)

摘 要: 硫代葡萄糖苷(glucosinolate, GS)是广泛存在于十字花科植物中的一种含硫的阴离子亲水次生代谢产物。硫苷及其部分降解产物具有抗癌、抗菌杀虫、改善风味等多种作用。近年来, 人们尝试通过模拟环境信号分子来激发生物应激反应从而调节植物中硫苷的合成。因此, 了解不同环境条件对硫代葡萄糖苷含量的影响是十分有必要的。本文综述了主要影响硫代葡萄糖苷含量的环境条件, 包括昆虫的咀嚼、季节的变化、温度的差异、光照条件、营养条件、重金属等影响, 以期为十字花科植株中硫代葡萄糖苷的深入研究提供理论依据。

关键词: 十字花科; 硫代葡萄糖苷; 环境条件

Research progress on motivating factors of glucosinolate in cruciferae

PENG Pei, QING Zhi-Xing, TIAN Yan, DENG Fang-Ming*

(College of Food Science and Technology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China)

ABSTRACT: Glucosinolate (GS) is a sulfur-containing anionic hydrophilic secondary metabolite widely existing in cruciferous plants. Glucosinolate and its partial degradation products have various effects such as anti-cancer, antibacterial and insecticidal, and improving flavor. In recent years, people try to modulate the synthesis of glucosinolates in plants by simulating environmental signal molecules to stimulate biological stress responses. Therefore, it is necessary to understand the effects of different environmental conditions on the content of glucosinolates. This paper reviewed the environmental conditions those primarily affect glucosinolate content, including insect chewing, seasonal changes, temperature differences, light conditions, nutrient conditions, heavy metals and so on, in order to provide a theoretical basis for the in-depth study of glucosinolates in cruciferous plants.

KEY WORDS: cruciferae; glucosinolate; environment conditions

1 引 言

硫代葡萄糖苷(glucosinolate, GS, 简称硫苷)是一类含氮、硫元素的次生代谢产物, 在十字花科植物中广泛存在^[1]。硫苷由 β -D-葡萄糖、磺酸肟和来源氨基酸的侧链 R 组成。同时, 硫苷的结构根据侧链 R 的不同可分为脂肪族硫苷、芳香族硫苷和吲哚族硫苷。迄今为止, 已发现大约 120 种单体

硫苷, 3 类代表性单体硫苷化学的结构式如图 1 所示^[2]。

Grubb 等^[3]研究发现, 硫苷的生物合成包括 3 个部分: 氨基酸侧链的延伸、核心结构的形成以及次级侧链的修饰。随着拟南芥基因组序列测定的完成和功能基因的注释, 让人们了解硫苷的生物代谢途径和硫苷的合成有了更为深入的了解, 尤其是在硫苷合成的不同阶段中起着十分重要作用的 MYB、MAM、CYP79/CYP 83、AOP 等基因家族^[4]。

基金项目: 湖南省重点研发计划(2016NK2110)、国家现代农业特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-E-02)

Fund: Supported by Hunan Province Key Research and Development Program (2016NK2110) and Special Technical System of Vegetable Industry with Modern Agricultural Characteristics (NYBJG201408)

*通讯作者: 邓放明, 博士, 教授, 主要研究方向为食品科学。E-mail: fmdenghnan@sina.com

*Corresponding author: DENG Fang-Ming, Ph.D, Professor, College of Food Science and Technology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China. E-mail: fmdenghnan@sina.com.

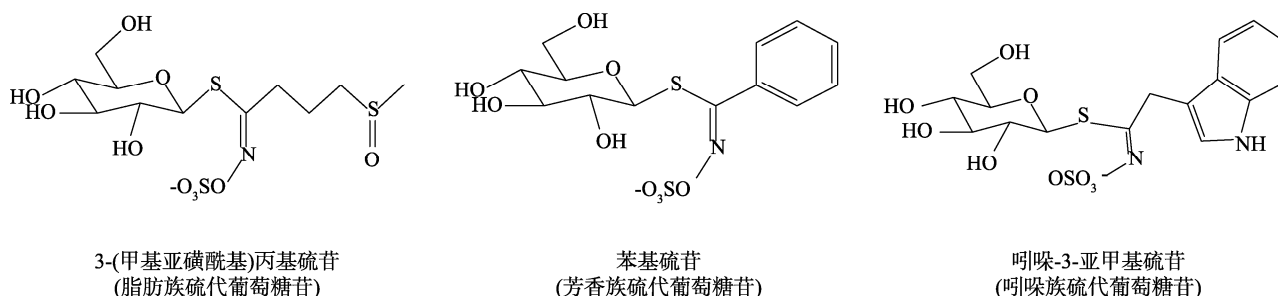


图1 硫代葡萄糖苷的化学结构式
Fig.1 Chemical structures of glucosinolate

硫苷在十字花科植物组织中并不是单独存在的,而是以硫苷-黑芥子酶的形式存在。在完整的十字花科植物中,黑芥子酶位于特定的蛋白体中,硫苷则位于液胞中。当植物细胞组织受到外界因素影响被破坏的时候,释放出来的黑芥子酶与硫苷发生催化反应,进而使硫苷水解形成多种降解产物^[5],包括异硫氰酸盐、硫氰酸酯、腈类、环硫腈类、恶唑烷等,最终产物也会因为化学环境的不同而不同^[6]。硫苷及其降解产物具有不同的生理特性,硫苷的降解产物异硫氰酸盐是十字花科独特风味物质的主要来源。它具有很强的杀菌杀虫作用,对线虫、细菌、真菌、昆虫和病毒都具有很强的灭杀作用。硫苷在抗乳腺癌、肺癌和胃癌方面都有相关的研究报道。毒理学研究表明,萝卜硫素、6-甲磺酰乙基异硫氰酸盐和酚乙基异硫氰酸盐都显示出了很强的抗癌特性^[7]。流行病学研究显示,摄入十字花科植物例如白菜、西兰花等都能明显的降低患癌风险^[8]。但是也有研究表明,有些硫苷的降解产物对高等动物具有不同程度的毒性和抗营养作用^[9]。大量硫苷在黑芥子酶的催化作用下,水解后会产生许多有毒产物,硫苷的水解产物-恶唑烷硫酮易、异硫氰酸盐、氰类等都会对动物的器官造成不同程度的破坏作用,例如造成动物的甲状腺肿大,对皮肤粘膜的强烈刺激作用,肝、肾肿大与变性等,在硫苷含量过高的情况下尤其如此^[10]。因此控制硫苷的含量对人体营养健康需求有重大的意义。

植物中硫苷含量一般受多种方面的影响,主要包括基因、环境、储藏加工、植物激素和外源植物生长调节物质等,这些影响因素单独或互相调控影响着硫苷的合成。本文综述了影响硫代葡萄糖苷含量的主要环境条件,以期利用环境条件调控十字花科植物硫苷的生源合成提供科学依据。

2 单因素环境条件对十字花科植物中硫代葡萄糖苷含量的影响

2.1 昆虫的咀嚼

当植物受到食草动物的攻击,尤其是被昆虫咀嚼而

导致植物组织破坏后,黑芥子酶从液泡中释放出来从而使硫苷与黑芥子酶接触,产生许多降解产物,导致硫苷的含量下降^[11]。但是,作为一种植物自身防御机制,受伤植株中硫代葡萄糖苷尤其是吲哚族硫代葡萄糖苷的含量会明显增加,并且这种升高的程度会在不同的植物品种上体现出较大的差异^[12,13]。Velasco等^[14]研究了被昆虫攻击后甘蓝菜中的总硫苷和单个硫苷含量的变化,发现被昆虫攻击后甘蓝菜中总硫苷含量和单个硫苷含量都有所下降,其中叶子的含量从41 $\mu\text{mol/g}$ 下降到了25.8 $\mu\text{mol/g}$,虫害下的黑芥子苷、屈曲花苷、葡糖硫苷含量也降到了最低。Koritsas等^[15]指出,跳甲对大白菜的作用会显著的影响硫苷单体的含量,如吲哚族硫苷,芸薹葡糖硫苷等,这种变化也伴随着脂肪族硫苷含量的急剧下降。

2.2 温度

温度是调节植物代谢水平的主要环境因子之一。Verkerk等^[16]报道花椰菜中硫代葡萄糖苷的含量与具体的气候因素系统呈线性关系,而温度之所以影响硫苷含量可能是由于温度会对各种参与硫苷合成的酶造成影响。因此,温度的高低直接影响植物体内硫苷的浓度。

Tanja等^[17]指出空气温度对硫苷含量有较大的影响,并且相比脂肪族和芳香族硫苷,吲哚族硫苷更容易受到环境因素的影响。在30/15 $^{\circ}\text{C}$ 昼夜温度下花椰菜的硫苷含量要明显高于昼夜温度为22/15 $^{\circ}\text{C}$ 和18/12 $^{\circ}\text{C}$ 。Paulsen等^[18]指出花椰菜子的温度达到15 $^{\circ}\text{C}$ 时总硫苷损失的含量最多。同时,在恒定的温度,如在33 $^{\circ}\text{C}$ 的高温和11.3 $^{\circ}\text{C}$ 的低温的条件下都能产生较高浓度的硫苷^[19]。Kissen等^[20]研究了三代拟南芥中硫苷在生长温度为恒定标准的21 $^{\circ}\text{C}$,适中的15 $^{\circ}\text{C}$ 和较低的9 $^{\circ}\text{C}$ 下的增长状况。结果表明,适中的和明显较低的恒定温度会使硫苷的含量明显上升,并且这种温度变化导致的硫苷含量变化没有持续地影响到下一代,也就是说不会发生继代遗传。另外一些研究则发现,冷冻储藏会影响硫苷的代谢。因为冷冻不仅没让黑芥子酶失活,反而破坏了植物的细胞结构,从而造成硫苷含量的下降^[21]。

2.3 光照条件

光是光合作用的基础,植物体正常的生命活动都离

不开光照,因此,光照条件对硫苷含量具有很大的影响,其中光照时间、光的种类、强弱程度等都会对硫苷的合成产生不同的影响。

Engelen-Eigles 等^[22]指出主要影响豆瓣菜苷含量的环境因素是昼长,在昼长更长的条件下,豆瓣菜苷的含量增加了30%~40%。Palaniswamy 等^[23]研究了在21 d中,光级、光周期和温度对豆瓣菜中2-苯乙基硫苷的含量的影响,结果发现每天光照12 h的豆瓣菜中的2-苯乙基硫苷的含量明显高于每天光照8 h的豆瓣菜。光的种类也会影响硫苷的含量,在富含红灯的金属卤化灯照射下的豆瓣菜中2-苯乙基硫苷含量要比在远红外照射下的豆瓣菜高25%~40%。旱金莲花在较短时间内适度的紫外辐射,其硫苷含量得到显著增加^[24]。

光质不同主要体现在光反射出的颜色,彩色的塑料薄膜能改变土壤的温度和反射到植物的光质。研究发现彩色塑料薄膜能影响植物的光合作用。红光、远红光和蓝光通过调控光敏色素和隐花色素从而影响植物中硫苷的合成^[25]。Antonious 等^[26]发现彩色的塑料薄膜会影响芜菁甘蓝中的总硫苷含量,芜菁甘蓝在蓝色塑料薄膜的条件下的总硫苷含量要高于在绿色和白色塑料薄膜下的总硫苷含量。

2.4 硫元素和氮元素

在养分供应中,以氮元素和硫元素对硫苷的影响最大。硫苷的侧链来源于氨基酸,因此氨基酸是硫苷合成的前体,而氮、硫元素是组成氨基酸的必须元素,因此氮元素和硫元素将直接影响植物中硫苷的含量。

Booth 等^[27]发现施加硫肥后提高了油菜花中硫苷的含量。在硫营养不足的情况下,小白菜的生长受到抑制,硫苷含量显著下降^[28]。Maria 等^[29]研究了不同施肥条件下辣根中吲哚族、芳香族和脂肪族的硫苷的增长状况,结果表明只加氮肥,脂肪族硫苷含量增加150%,芳香族和吲哚族硫苷都增加35%;同时添加氮肥和硫肥时,脂肪族硫苷增加400%,芳香族和吲哚族分别增加280%和180%,说明同时施用2种养分具有协同增效作用,对硫苷生成具有明显的促进作用。张勤争等^[30]指出施用碳酸氢铵或尿素比施用硫酸铵的油菜籽的硫苷含量更低,其差异可达20%左右。在盆栽条件下,硫酸铵的施用时期对菜籽硫苷含量有明显的影响,以移栽期施用影响为甚,但氮肥用量的影响不明显。同时氮肥和硫肥对种子中硫苷浓度有显著的互作效应,即当硫肥不足时增加氮肥可能降低种子中硫苷的浓度,但当硫肥充足时增加氮肥供应可以增加种子中硫苷浓度^[31]。当硫肥不足时,增加氮素供应造成硫苷含量降低的主要原因一方面是氮素刺激生长造成体内硫苷“稀释”,另一方面可能是氮素供应的增加造成植物蛋白质合成的增加,与硫苷合成竞争碳水化合物,同时氮素供应量的增加可能会造成与硫苷合成有关的硫含量的降低^[32]。

随着工业化的发展和大量含硫能源的使用,空气中

的硫化氢和二氧化硫等有毒有害气体的含量越来越高,不仅对人体的生命健康产生了较大影响,可能对植物的正常生理活动有一定影响。有研究发现植物能吸收空气中硫化氢和二氧化硫中的硫元素,因此,硫苷作为含硫次生代谢物其组分和含量可能受硫化氢和二氧化硫的影响,但目前并没有直接研究证明硫苷的合成和空气中的硫化氢及二氧化硫有关系,还需要相关研究证实^[33]。

2.5 重金属

十字花科中许多植物容易富集金属离子,重金属的富集会影响硫苷的生物合成和积累。如重金属镉对不同品种的白萝卜幼苗的硫代葡萄糖苷均表现出“低浓度促进,高浓度抑制”的印象。1 $\mu\text{mol/L}$ 和 10 $\mu\text{mol/L}$ 2个浓度的镉离子对3种白萝卜幼苗的硫代葡萄糖苷的合成起促进作用,使其硫苷含量升高,更高浓度的镉离子处理时,可能是由于随着幼苗体内镉离子的积累超过了阈值,导致硫苷含量下降^[34]。Jahangir 等^[35]发现铜、铁、锰对芜菁硫苷含量均有促进作用,其中铜铁对植物代谢的影响大于锰。Kusznierewicz 等^[36]研究发现当土壤中的锌含量从原来80 mg/kg(DW) 升至450 mg/kg(DW) 时,白菜中的锌含量从原来的15 mg/kg(DW) 升至130 mg/kg(DW) ,在白菜中硫苷含量由原来的3.2 $\mu\text{mol/g(DW)}$ 升至12 $\mu\text{mol/g(DW)}$;当土壤中铬含量从原来的0.3 mg/kg(DW) 升至30 mg/kg(DW) 后,白菜中的铬含量由0.02 mg/kg(DW) 升至3 mg/kg(DW) ,白菜中的硫苷含量由原来的3.5 $\mu\text{mol/g(DW)}$ 升至10 $\mu\text{mol/g(DW)}$,说明了一定量的重金属离子对硫苷具有促进作用。但是也有研究发现在镉的诱导下,拟南芥的根和叶中的硫苷含量均有下降^[37]。Searle 等^[38]通过放射线同位素标记法,初步研究了铜离子和硫离子对3-吲哚甲基硫苷的作用,并发现这2种离子对硫苷具有相似的降解作用。

3 多因素环境条件对十字花科植物中硫代葡萄糖苷含量的影响

3.1 季节

季节不同,其温度、湿度、光照等通常都有所差异,植物的生长发育与生理活动都会受到影响,进而影响植物体内硫苷的含量。一般而言,由于夏季和秋季的平均气温、日照时间、辐射强度、降雨量及光合光子通量均较高,因此春夏两季种植的植物体内的总硫苷含量以及多数单硫苷的含量较高。而秋冬季节空气干燥,土壤中可利用的水分较少,容易在开花期对植物种子形成干旱胁迫,使参与硫苷合成的氨基酸和糖类含量升高,因此在秋冬两季种植的植物体内硫苷含量较低^[39]。

Cartea 等^[40]指出在春季播种的花椰菜中的硫苷含量高于秋季播种的花椰菜。Charron 等^[41]实验发现季节对硫苷芥子酶活性的影响可以通过温度、光合作用的光子通量

和昼长来解释。黑芥子酶的活性与温度呈负线性关系,与光合量子具有正线性关系和负二次关系,酶的比活性与温度和光合量子具有正线性关系和负二次关系。Vallejo 等^[42]发现西蓝花中硫苷的含量会受季节变化的影响,晚冬时西蓝花中的硫苷含量明显高于早春。王辉等^[43]发现同一季节不同硫苷及同种硫苷在不同季节间的相关性分析。其中,不同季节间 3 种脂肪族硫苷(gluconapin、progoitrin、glucobrassicinapin)、芳香族硫苷(gluconasturtiin)和总硫苷含量均达到显著或极显著性正相关,而 4 种吲哚族硫苷(4-hydroxyglucobrassicin、glucobrassicin、4-methoxyglucobrassicin、1-methoxyglucobrassicin)相关性均未达到显著水平,这表明脂肪族硫苷、芳香族硫苷受环境影响较小,而吲哚族硫苷受环境影响较大。

3.2 光照和其他因素

基因表达对硫苷的合成也会受到光照的影响,基因通过影响酶类来控制硫苷的合成。研究指出白天或黑夜会影响硫苷合成 mRNA 的转录水平。硫苷的侧链氨基酸转移酶和甲基硫代苹果酸酯合成酶都参与硫苷早期侧链延伸中,其表达水平在白天明显高于晚上,并且在持续的光照下其表达水平也很高^[44]。由于 CYP83B1 将参与到吲哚族硫苷的合成当中,因此,改变光质导致 CYP83B1 转录水平的提高意味着吲哚族硫苷的含量上升^[45]。Hoecker 等^[46]发现利用红灯持续照射拟南芥提高了其 CYP83B1 的转录水平,而远红外对其照射几乎没有影响。同时,光照也会影响硫酸盐的吸收,进而影响硫苷的合成。

随着科技发展,研究学者可以人为的控制一些植物的生长环境条件,例如利用无土栽培技术提高硫苷的含量^[47];通过浇灌盐水来改变植物中的硫苷含量^[48];或是加入亚硒酸盐硒酸盐来改变硫苷的代谢系统进而影响硫苷的含量^[49]。

4 结论与展望

昆虫的咀嚼、季节、温度、光照条件、营养条件、重金属等环境因子都对植物中硫苷的合成与降解有很大的影响,因此,利用环境信号来刺激生物的应激反应从而来完善植物硫苷含量影响因子研究,为改善十字花科植物硫苷含量提供理论基础具有重大意义。

一般来说,环境因素会影响植物体内硫苷浓度,但是利用这些因素直接提高植物中的硫苷含量仍然较为困难。同时,由于不同种类的硫苷具有不同的刺激性气味,近年来研究者为了种植出味道更温和的植物,间接筛选去除一些硫苷如 2-丙烯基硫苷、3-丁烯基硫苷,然而这方面的文献资料较少^[50],尤其是有关环境信号分子对单体硫苷合成及其代谢的分子调控机制研究更少,这些方面都有待进一步的研究。

参考文献

- [1] Hanschen FS, Rohn S, Mewis I, *et al.* Influence of the chemical structure on the thermal degradation of the glucosinolates in broccoli sprouts [J]. Food Chem, 2012, 130(1): 1–8.
- [2] Fahey JW, Zalcmann AT, Talalay P. The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants [J]. Phytochemistry, 2001, 56(1): 5–51.
- [3] Grubb CD, Abel S. Glucosinolate metabolism and its control [J]. Trend Plant Sci, 2006, 11(2): 89–100.
- [4] 杨丽梅, 方智远, 刘玉梅, 等. 十字花科植物中主要硫代葡萄糖苷合成与调节基因的研究进展[J]. 中国蔬菜, 2010, 2010(12): 1–6.
Yang LM, Fang ZY, Liu YM, *et al.* Research progress on regulation and synthesis genes on glucosinolates biosynthesis in crucifer [J]. China Veg, 2010, 2010(12): 1–6.
- [5] 吴建朋. 芝麻菜种子中硫代葡萄糖苷(slucoerucin)的分离纯化工艺研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
Wu JP. Study the process of separation and purification of glucoerucin from rocket salad seed [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [6] Bones AM, Rossiter JT. The enzymic and chemically induced decomposition of glucosinolates [J]. Cheminform, 2006, 67(11): 1053–1067.
- [7] 李锋, 张春雷. 芸薹属植物的生防作用[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(1): 97–103.
Li F, Zhang CL. Biocontrol of brassica [J]. Chin J Oil Crop Sci, 2006, 28(1): 97–103.
- [8] Ishikawa S, Maruyama A, Yamamoto Y, *et al.* Extraction and characterization of glucosinolates and isothiocyanates from rape seed meal [J]. J Oleo Sci, 2014, 63(3): 303–308.
- [9] 邱海荣. 不同品种青花菜和花椰菜硫代葡萄糖苷含量的测定及比较[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
Qiu HR. Determination and comparison of glucosinolate content in various broccoli and cauliflower cultivars [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [10] 宋敏. 氨基酸对芥蓝硫代葡萄糖苷组分及含量的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
Song M. Effect of amino acid on composition and content of glucosinolates of Chinese kale [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [11] Barth C, Jander G. Arabidopsis myrosinases TGG1 and TGG2 have redundant function in glucosinolate breakdown and insect defense [J]. Plant J, 2006, 46(4): 549.
- [12] Wallsgrove R. Glucosinolate biosynthesis and pest/disease interactions [J]. Young, 1999, (1): 49.
- [13] 杨静. 营养状态和采后处理对小白菜硫代葡萄糖苷的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
Yang J. Glucosinolates in pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) as affected by nutrients status postharvest [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [14] Velasco P, Cartea ME, Gonzalez C, *et al.* Factors affecting the glucosinolate content of kale (*Brassica oleracea* acephala group) [J]. J Agric Food Chem, 2007, 55(3): 955–962.

- [15] Koritsas VM, Lewis JA, Fenwick GR. Glucosinolate responses of oilseed rape, mustard and kale to mechanical wounding and infestation by cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*) [J]. *Ann Appl Biol*, 2010, 118(118): 209–221.
- [16] Verkerk R, Schreiner M, Krumbein A, *et al.* Glucosinolates in *Brassica* vegetables: the influence of the food supply chain on intake, bioavailability and human health [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2009, 53(supplement): S219–S265.
- [17] Tanja B, Stanislav T. Environmental factors affecting the glucosinolate content in *Brassicaceae* [J]. *J Food Agric Environ*, 2012, 10(2): 357–360.
- [18] Paulson E, Barrios S, Baenas N, *et al.* Effect of temperature on glucosinolate content and shelf life of ready-to-eat broccoli florets packaged in passive modified atmosphere [J]. *Postharv Biol Technol*, 2018, (138): 125–133.
- [19] Pereira FM, Rosa E, Fahey JW, *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.
- [20] Kissen R, Eberl F, Winge P, *et al.* Effect of growth temperature on glucosinolate profiles in *Arabidopsis thaliana*, accessions [J]. *Phytochemistry*, 2016, (130): 106.
- [21] Quinsac A, Charrier A, Ribaillier D, *et al.* Glucosinolates in etiolated sprouts of sea-kale (*Crambe maritima* L.) [J]. *J Sci Food Agric*, 1994, 65(2): 201–207.
- [22] Engelen-Eigles G, Holden G, Cohen JD, *et al.* The effect of temperature, photoperiod, and light quality on gluconasturtiin concentration in watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.) [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(2): 328–334.
- [23] Palaniswamy UR, Mcavoy RJ, Bible BB, *et al.* Ontogenic variations of ascorbic acid and phenethyl isothiocyanate concentrations in watercress (*Nasturtium officinale* R.Br.) leaves [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(18): 5504–5509.
- [24] Schreiner M, Krumbein A, Mewis I, *et al.* Short-term and moderate UV-B radiation effects on secondary plant metabolism in different organs of nasturtium (*Tropaeolum majus* L.) [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2009, 10(1): 93–96.
- [25] Sun-Ju K, Taeko M, Masami W, *et al.* Effect of nitrogen and sulphur application on the glucosinolate content in vegetable turnip rape (*Brassica rapa* L.) [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2002, 48(1): 7.
- [26] Antonious GF, Kasperbauer MJ, Byers ME. Light reflected from colored mulches to growing turnip leaves affects glucosinolate and sugar contents of edible roots [J]. *Photochem Photobiol*, 2010, 64(3): 605–610.
- [27] Booth EJ, Walker KC, Griffiths DW. A time-course study of the effect of sulphur on glucosinolates in oilseed rape (*Brassica napus*) from the vegetative stage to maturity [J]. *J Sci Food Agric*, 1991, 56(4): 479–493.
- [28] Hu K, Zhu Z, Zang Y, *et al.* Accumulation of glucosinolates and nutrients in pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis*) two cultivar plants exposed to sulfur deficiency [J]. *Horticult Environ Biotechnol*, 2011, 52(2): 121.
- [29] Maria SD, Agneta R. Influence of nitrogen and sulfur fertilization on glucosinolate content and composition of horseradish plants harvested at different developmental stages [J]. *Acta Physiolog Plantarum*, 2016, 38(4): 1–12.
- [30] 张勤争, 奚海福, 郎献华, 等. 油菜籽硫代葡萄糖苷含量影响因子的研究[J]. *浙江农业学报*, 1990, 2(1): 30–34.
- Zhang QZ, Xi HF, Lang XH, *et al.* Factors affecting glucosinolate content in rapeseed [J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 1990, 2(1): 30–34.
- [31] 谢祝捷, 邱海荣, 姚雪琴. 影响十字花科蔬菜中硫代葡萄糖苷组分和含量的因素[C]. 中国园艺学会十字花科蔬菜分会, 2008.
- Xie ZJ, Qiu HR, Yao XQ. Factors influencing the composition and content of glucosinolates in cruciferous vegetables [C]. *Research Progress of Cruciferous Vegetables in China*, 2008.
- [32] 高相李, 李淑敏, 张宏彦, 等. 氮硫供应水平对不同品种芜菁生长和营养品质指标的影响[J]. *北方园艺*, 2008, (6): 15–18.
- Gao XY, Li SM, Zhang HY, *et al.* Effect of nitrogen and sulfur supply level on growth and nutritional quality of turnip cultivars [J]. *Nor Horticul*, 2008, (6): 15–18..
- [33] 祝彪. 外源植物生长调节物质对小白菜硫代葡萄糖苷的影响及相关合成基因表达研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Zhu B. Studies on the effects of plant growth regulators on glucosinolates and the expression of related genes in pakchoi [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [34] 邱宇婷, 蒋岚, 朱毅, 等. 镉胁迫下萝卜幼苗的硫代葡萄糖苷含量变化研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, (6): 3490–3493.
- Qiu YT, Jiang L, Zhu Y, *et al.* Study on the variation of glucosinolates content in radish seedlings under cadmium stress [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2012, (6): 3490–3493
- [35] Jahangir M, Abdelfarid IB, Choi YH, *et al.* Metal ion-inducing metabolite accumulation in *Brassica rapa* [J]. *Plant Phys*, 2008, 165(14): 1429–1437.
- [36] Kuznierewicz B, Bączek-Kwinta R, Bartoszek A, *et al.* The dose-dependent influence of zinc and cadmium contamination of soil on their uptake and glucosinolate content in white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *alba*) [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2012, 31(11): 2482–2489.
- [37] Sun XM, Zhang JX, Zhang HJ, *et al.* Glucosinolate profiles of *Arabidopsis thaliana* in response to cadmium exposure [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2009, 200(1): 109–117.
- [38] Searle LM, Chamberlain K, Butcher DN. Preliminary studies on the effects of copper, iron and manganese ions on the degradation of 3-indolylmethylglucosinolate (a constituent of *Brassica* spp.) by myrosinase [J]. *J Sci Food Agric*, 2010, 35(7): 745–748.
- [39] 程亚州, 陈思学, 阎秀峰. 环境对植物芥子油苷的影响[J]. *生态学报*, 2008, 8(8): 2828–2833.
- Cheng YZ, Cheng SX, Yan XF. Effect of environment on glucosinolate metabolism in plant [J]. *Acta Ecologic Sin*, 2008, 8(8): 2828–2833.
- [40] Cartea ME, Velasco P, Obregón S, *et al.* Seasonal variation in glucosinolate content in *Brassica oleracea* crops grown in northwestern Spain [J]. *Phytochemistry*, 2008, 69(2): 403–410.
- [41] Charron CS, Saxton AM, Sams CE. Relationship of climate and genotype to seasonal variation in the glucosinolate-myrosinase system II. Myrosinase activity in ten cultivars of *Brassica oleracea* grown in fall and spring seasons [J]. *J Sci Food Agric*, 2005, 85(85): 682–690.
- [42] Vallejo F, Tomás-Barberán F, *et al.* Total and individual glucosinolate contents in inflorescences of eight broccoli cultivars grown under various climate and fertilization conditions [J]. *J Sci Food Agric*, 2003, 83(4): 307–313.

- [43] 王辉, 廖永翠, 徐东辉, 等. 普通白菜叶片中硫代葡萄糖苷的季节性变化[J]. 中国蔬菜, 2011, 1(10): 35–40.
Wang H, Liao YC, Xu DH, *et al.* Seasonal variation of glucosinolate in *Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis* (L.) Makino var. *communis* Tsen et Lee leaves [J]. Chin Veg, 2011, 1(10): 35–40.
- [44] Schuster J, Knill T, Reichelt M, *et al.* Branched-chain aminotransferase is part of the chain elongation pathway in the biosynthesis of methionine-derived glucosinolates in *Arabidopsis* [J]. Plant Cell, 2006, 18(10): 2664–2679.
- [45] Hansen CH, Du L, Naur P, *et al.* CYP83b1 is the oxime-metabolizing enzyme in the glucosinolate pathway in *Arabidopsis* [J]. J Biol Chem, 2001, 276(27): 11078–11085.
- [46] Hoecker U, Toledoortiz G, Bender J, *et al.* The photomorphogenesis-related mutant red1 is defective in CYP83B1, a red light-induced gene encoding a cytochrome P450 required for normal auxin homeostasis [J]. Planta, 2004, 219(2): 195–200.
- [47] Di-Gioia F, Avato P, Serio F, *et al.* Glucosinolate profile of *Eruca sativa*, *Diplotaxis tenuifolia*, and *Diplotaxis erucoides*, grown in soil and soilless systems [J]. J Food Compos Anal, 2018, (69): 197–204.
- [48] Di-Gioia F, Rosskopf EN, Leonardi, *et al.* Effects of application timing of saline irrigation water on broccoli production and quality [J]. Agric Water Manag, 2018, (203): 97–104.
- [49] Tian M, Xu X, Liu Y, *et al.* Effect of Se treatment on glucosinolate metabolism and health-promoting compounds in the broccoli sprouts of three cultivars [J]. Food Chem, 2016, (190): 374–80.
- [50] Verkerk R, Schreiner M, Krumbein A, *et al.* Glucosinolates in *Brassica* vegetables: the influence of the food supply chain on intake, bioavailability and human health [J]. Mol Nutr Food Res, 2010, 53(S2): S219–S219.

(责任编辑: 陈雨薇)

作者简介



彭 佩, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学。
E-mail: 1150747169@qq.com



邓放明, 博士, 教授, 主要研究方向为食品科学。
E-mail: fmdenghnan@sina.com

食品安全风险评估与风险监测

食品安全问题是“食物中有毒、有害物质对人体健康影响的公共卫生问题”。食品安全要求食品对人体健康造成急性或慢性损害的所有危险都不存在, 是一个绝对的概念, 降低疾病隐患, 防范食物中毒的一个跨学科领域。食品安全中的风险评估是根据各个国家的具体条件来进行判定的, 其中, 人与动物的健康安全情况均在考量范围内。食品安全不仅关系人类与动物的生命健康, 也会关系整个社会经济的可持续发展, 与国家的国际形象和政府形象也有所关联, 更是衡量一个政府执政能力的重要判断指标。

鉴于此, 本刊特别策划了“食品安全风险评估与风险监测”专题, 专题将围绕(1)危害识别、(2)危害特征描述、(3)暴露评估、(4)风险特征描述、(5)区域性风险监测、(6)风险管理等方面。或您认为本领域有意义的问题综述及研究论文均可, 专题计划在 2019 年 5 月出版。

本刊主编国家风险评估中心吴永宁研究员邀请有关食品领域研究人员为本专题撰写稿件, 综述、研究论文和研究简报均可。请在 2019 年 3 月 30 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并经审稿合格后优先发表。

投稿方式(注明专题):

网站: www.chinafoodj.com

E-mail: jfoodsq@126.com

《食品安全质量检测学报》编辑部