

# 西兰花苗中萝卜硫素合成的调控手段研究进展

李 翠<sup>1</sup>, 方 胜<sup>2</sup>, 赵忠良<sup>2</sup>, 刘海杰<sup>1,\*</sup>

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 江苏新希望生态科技有限公司, 江苏 徐州 221150)

**摘 要:** 萝卜硫素 (sulforaphane, SFN) 具有抗肿瘤、抗炎、抗氧化、减轻肥胖等多种生物学活性, 在西兰花苗中含量最高, 使西兰花苗在保健食品和药品开发方面具有广阔的应用前景。本文首先综述SFN在西兰花苗中的合成及降解过程, 重点讨论在西兰花苗生长阶段采用不同处理手段对SFN及其合成相关因子含量的影响, 并对其作用机理进行总结分析, 最后提出目前还存在的问题及对未来研究方向的展望, 为提高植物源食品功能性的相关研究提供一定参考。

**关键词:** 西兰花苗; 硫代葡萄糖苷; 萝卜硫素; 生成机理; 调控

## Research Progress in Regulation of Sulforaphane Synthesis in Broccoli Sprouts

LI Cui<sup>1</sup>, FANG Sheng<sup>2</sup>, ZHAO Zhongliang<sup>2</sup>, LIU Haijie<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Jiangsu New Hope Ecological Technology Co. Ltd., Xuzhou 221150, China)

**Abstract:** Sulforaphane (SFN) has a variety of biological activities such as anti-tumor, anti-inflammatory, antioxidant, and anti-obesity properties. Being rich in SFN, broccoli sprouts are promising for application in the development of health foods and medicine. This article first reviews the synthesis and degradation process of SFN in broccoli sprouts, with a focus on the effects of different treatments on the contents of SFN and its synthesis-related factors during the growth of broccoli sprouts. It then summarizes the underlying mechanisms. Finally, the existing problems are outlined and future research directions are discussed, hoping to provide a reference for future research to improve the functionality of plant-derived foods.

**Keywords:** broccoli sprouts; glucosinolates; sulforaphane; formation mechanism; regulation

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231130-261

中图分类号: TS210.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 01-0210-08

引文格式:

李翠, 方胜, 赵忠良, 等. 西兰花苗中萝卜硫素合成的调控手段研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 210-217.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231130-261. <http://www.spkx.net.cn>

LI Cui, FANG Sheng, ZHAO Zhongliang, et al. Research progress in regulation of sulforaphane synthesis in broccoli sprouts[J].

Food Science, 2025, 46(1): 210-217. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231130-261.

<http://www.spkx.net.cn>

萝卜硫素 (sulforaphane, SFN) 又称莱菔硫烷, 属于异硫氰酸酯的一种, 由硫代葡萄糖苷 (简称硫苷) 经植物体内黑芥子酶 (myrosinase, MYR; EC3.2.3.1) 水解形成, 是迄今发现的植物源食品中抗癌活性最高的物质之一<sup>[1-3]</sup>。除抗癌活性外, 近年来还发现了SFN很多其

他生理功能, 如激活细胞内核转录因子E2相关因子2/抗氧化反应元件转录途径、促进抗氧化酶转录, 并抑制促炎性介质的表达, 从而发挥抗氧化和抗炎作用<sup>[4-5]</sup>; 阻断丝氨酸棕榈酰转移酶-3介导的神经酰胺生物合成, 调节体内葡萄糖稳态, 降低胰岛素抵抗<sup>[6]</sup>; 以及作用于脂肪酸

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31972091)

第一作者简介: 李翠 (1996—) (ORCID: 0000-0002-1699-2978), 女, 博士研究生, 研究方向为西兰花苗中萝卜硫素的富集调控。E-mail: licui20150901@163.com

\*通信作者简介: 刘海杰 (1973—) (ORCID: 0000-0003-2400-5036), 女, 教授, 博士, 研究方向为发芽食品中生物活性成分生物转化。E-mail: liuhaijie@cau.edu.cn

氧化途径、5'-单磷酸腺苷活化蛋白激酶转录途径、抑制三酰基甘油酯合成途径和脂肪组织褐变等多种途径,表现出减轻肥胖的潜力<sup>[7]</sup>等。

SFN主要存在于十字花科植物中,何珺等<sup>[8]</sup>测定12种常见十字花科蔬菜种子中SFN含量,发现西兰花种子中SFN含量最高,为10 022.3 μg/g(干基),而其他蔬菜种子的SFN平均含量仅在8.7~700.1 μg/g(干基)之间。SFN在西兰花种子和嫩苗中含量较高,随着植株生长,其含量逐渐降低,且西兰花苗中的SFN含量是成熟花球的10~100倍<sup>[9]</sup>。因此,西兰花苗作为摄取SFN的主要植物源食品逐渐成为研究热点。本文主要对西兰花苗中SFN的合成和分解过程及调控手段进行综述,为生产高SFN含量的西兰花苗提供一定参考。

## 1 SFN的合成及降解

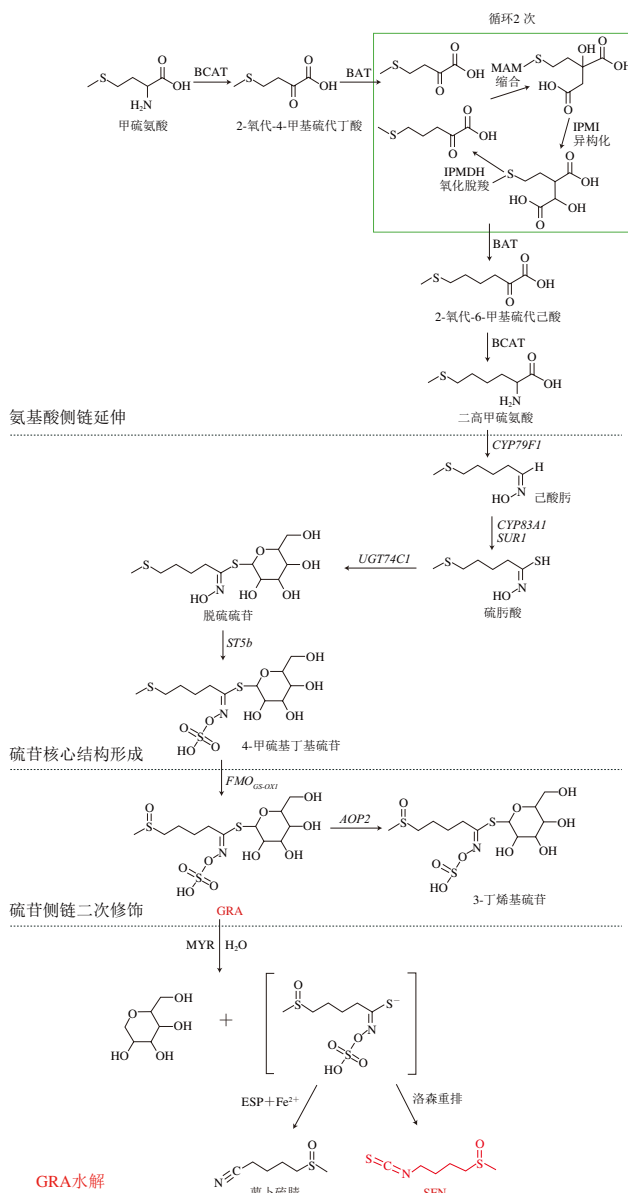
### 1.1 SFN在西兰花苗中的合成过程

SFN合成的前体物质为硫苷,是一类含氮和硫的植物次级代谢产物,由1个β-D-硫葡萄糖残基、1个磺酰基团和1个来源于8种氨基酸的侧链R构成,根据硫苷侧链结构不同,可以将其分为脂肪族硫苷、吲哚族硫苷和芳香族硫苷<sup>[10]</sup>。硫苷主要存在于十字花科植物中,目前在十字花科植物中发现的硫苷有120余种<sup>[11]</sup>。其中脂肪族硫苷萝卜硫苷(glucoraphanin, GRA)是SFN合成的具体前体物,也是西兰花中含量最高的硫苷,占西兰花总硫苷含量的50%以上<sup>[12]</sup>。

“MYR-硫苷”系统是十字花科植物特有的一种化学防御策略,也被称为“芥子油弹”<sup>[13]</sup>。正常情况下, GRA稳定分布于植物叶片的边缘区域及沿着初级脉的细胞中,且无生物活性;而MYR被保存在与GRA分离的特定细胞(黑芥子细胞,分散在细胞群中呈现多种类型的所有特殊植物细胞,为一种异细胞)的液泡中<sup>[14]</sup>。但在植物遭受如昆虫叮咬、烹饪、咀嚼等损伤后, GRA从细胞中释放并与MYR接触,发生水解反应,生成SFN。SFN的具体合成过程如图1所示,主要包括2个部分,即前期GRA在植物体内的生物合成及GRA水解生成SFN。

GRA来源于甲硫氨酸,其生物合成的分子遗传机制已有学者进行了解析<sup>[15]</sup>,主要包括3个阶段。第1阶段为氨基酸侧链延伸:甲硫氨酸首先在细胞质中经BCAT催化发生氨基转移,生成2-氧代-4-甲基硫代丁酸,然后通过BAT进入叶绿体中,进行3个反应:由MAM催化与乙酰辅酶A的缩合反应、IPMI催化的异构化反应及由IPMDH催化的氧化脱羧反应。该3个反应循环2次,将2个亚甲基基团(—CH<sub>2</sub>—)依次加在氨基酸侧链上,产物2-氧代-6-甲基硫代己酸由BAT再转运回到细胞质,经BCAT催

化的转氨作用生成二高甲硫氨酸。第2阶段为硫苷核心结构形成:该过程主要在细胞质中进行,是所有硫苷形成的共同部分,也是硫苷合成的关键步骤,包括乙醛胍、硫脲酸、脱硫硫苷和4-甲基硫基硫苷的依次形成,主要涉及CYP79F1、CYP83F1、UGT74C1、ST5b等基因。



BCAT.支链氨基酸转氨酶(branched chain amino acid amino-transferase); BAT.胆汁酸转运蛋白(bile acid transporter); MAM.甲硫烷基化苹果酸合成酶(methylthioalkyl-malatesynthase); IPMI.异丙基苹果酸异构酶(isopropylmalate isomerase); IPMDH.异丙基苹果酸脱氢酶(isopropylmalate dehydrogenase); CYP.细胞色素P450酶(cytochrome P450 enzymes); SUR. S-烷基硫脲裂解酶(S-alkyl-thihydroximate lyase); UGT.葡萄糖醛基转移酶(glucuronosyltransferase); ST.磺基转移酶(sulfotransferase); FMO.黄素单加氧酶(flavin-containing monooxygenase); AOP. 2-含氧戊二酸双加氧酶(2-oxoglutarate-dependent dioxygenases); ESP.表皮特异硫蛋白(epithiospecifier protein)。

图1 SFN的合成过程

Fig. 1 Synthesis process of SFN

第3阶段为硫苷侧链的二次修饰：该过程在很大程度上决定了硫苷的种类及水解产物的活性<sup>[16]</sup>。4-甲硫基丁基硫苷在FMO作用下，侧链经过氧化形成GRA，GRA除可以水解生成SFN外，还可在AOP作用下形成3-丁烯基硫苷。参与该过程的基因包括*FMO<sub>GS-OXI</sub>*和*AOP2*。硫苷在MYR作用下发生水解反应，生成D-葡萄糖和不稳定的 $\beta$ -糖苷配基中间体， $\beta$ -糖苷配基经重排、解裂可形成多种产物，而产物种类主要受硫苷种类、MYR活性和特定蛋白质等的影响<sup>[17]</sup>。在正常中性pH值条件下，GRA经MYR催化发生初步水解，中间体再通过非酶化“洛森重排”形成SFN，但当ESP存在时，ESP会将MYR释放的不稳定糖苷配基转化为无生物活性的萝卜硫腈<sup>[18]</sup>。而ESP是MYR的辅酶，为一种热不稳定蛋白，其稳定性和催化活性依赖于 $\text{Fe}^{2+}$ ，在西兰花苗水解反应液中添加 $\text{Fe}^{2+}$ 会使腈类物质生成量显著提高<sup>[19]</sup>。MYR是一种存在于植物组织或哺乳动物胃肠道微生物中的 $\beta$ -硫代葡萄糖苷酶，目前已知参与硫苷分解的MYR包括典型的硫代葡萄糖苷水解酶1~6和非典型的 $\beta$ -葡萄糖苷酶（beta-glucosidase, BGLU）18~33、PEN2/BGLU26和PYK10/BGLU23<sup>[20]</sup>。MYR活性受pH值、温度、金属离子、辅酶因子抗坏血酸和水分活度等多种因素的影响<sup>[21]</sup>。MYR活性的最佳pH值和温度随植物种类的不同而变化，分别在pH 4~9和20~70 °C之间<sup>[22]</sup>。有研究<sup>[23]</sup>发现，西兰花种子的内源性MYR将GRA水解为SFN的最佳条件为：25 °C、pH 4.0、添加0.02 mg/g抗坏血酸。

## 1.2 SFN降解过程

长期以来，植物次级代谢物被认为是由初级代谢物合成、具有生物活性的“最终”代谢产物<sup>[24]</sup>。然而随着西兰花苗的生长，SFN含量逐渐降低，这表明SFN会在植物组织中发生内源降解。因此了解SFN在植物中的降解途径对生产高SFN含量的西兰花苗也至关重要。Sugiyama等<sup>[25]</sup>解析了拟南芥中SFN的分解过程（图2）。SFN的分解从与谷胱甘肽（glutathione, GSH）缀合开始，然后逐步从SFN-GSH中裂解出甘氨酸和 $\gamma$ -谷氨酸残基，然后SFN-半胱氨酸（cysteine, Cys）分解并环化生成(4R)-(一)-2-硫酮基-4-噻唑烷羧酸（raphanusamic acid, RA）和SFN-NH<sub>2</sub>。RA通过开环反应等生成Cys，而Cys不仅能参与硫苷合成，并且与前面降解过程产生的甘氨酸和 $\gamma$ -谷氨酸残基一起参与GSH的合成，说明植物中存在初级代谢和次级代谢之间的双向转化。这为通过抑制SFN降解提高西兰花苗中SFN含量提供了新思路。

此外，值得注意的是，食用西兰花苗后，硫苷在人体肠道菌群的作用下生成SFN，之后SFN也以类似的方式进行降解：SFN首先诱导II相抗氧化酶，在GSH S-转移酶作用下形成SFN-GSH，该结合物水解逐步形成SFN-半胱氨酸和SFN-Cys。而最终排泄至尿液中的主要产物为SFN-Cys和萝卜硫素N-乙酰半胱氨酸<sup>[26-27]</sup>。

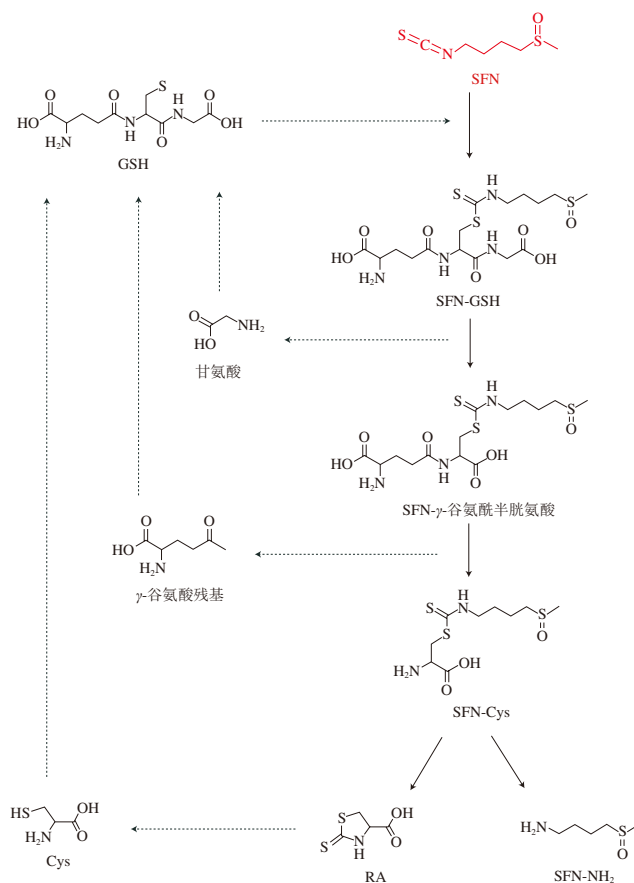


图2 SFN在植物中的降解过程

Fig. 2 Degradation process of SFN in plants

## 2 不同调控手段对西兰花苗中SFN合成的影响

### 2.1 生长环境的影响

#### 2.1.1 光照

光为植物的能源生产提供燃料，并充当主要环境信号，在植物生长和发育中起关键作用<sup>[28]</sup>。此外，不同光质可以通过不同途径促进十字花科植物中硫苷的积累：紫外线（ultraviolet, UV）-A主要影响吲哚族硫苷含量，蓝光主要影响脂肪族硫苷含量，而红光/远红光对脂肪族、吲哚族硫苷基本均有影响<sup>[29]</sup>。梁文静<sup>[30]</sup>发现红光可以显著促进西兰花苗菜下胚轴的伸长和可溶性糖积累，而蓝光处理可以显著促进叶绿素和可溶性蛋白积累。Melissa等<sup>[31]</sup>采用7.16 W/m<sup>2</sup>的UV-B照射发芽6 d的西兰花苗120 min，2~24 h后收获，发现此处理条件下GRA含量增加73%。这可能是由于UV-B诱导了GRA合成相关基因*FMO<sub>GS-OX5</sub>*的表达，以及病原体和水杨酸（salicylic acid, SA）响应基因*PR-1*和*PR-2*上调，导致植物防御机制开启，生成更多硫苷<sup>[32]</sup>。光对SFN合成的影响主要通过调控硫苷的生物合成间接作用，涉及硫苷关键基因表达、光合糖信号转导、光调控氮和硫同化等多个方面<sup>[29]</sup>，然



而不同的光质影响效应也不同,具体的分子机制还需要进一步研究。

### 2.1.2 温度

植物在高温胁迫下,次生代谢产物会积累,以此来抵御胁迫作用。Matusheski等<sup>[33]</sup>将新鲜的西兰花苗60℃处理10~20 min,发现SFN含量显著增加,萝卜硫甙产量减少且与ESP活性降低相一致,加热至70℃及以上,2种产物的生成与未加热的对照组相比无显著差异。ESP属于热敏性蛋白,适当热处理能够降低其活性,从而提高SFN生成量,而低温主要通过增强MYR活性影响SFN合成,因此找到调控SFN合成的关键温度至关重要。此外,Guo Liping等<sup>[34]</sup>发现,在西兰花苗生长过程中,每天给予20 min、60℃的热胁迫,最终GRA含量提高39%,MYR和ESP活性显著降低,而SFN含量较对照组提高153.73%。SFN的增加幅度远大于GRA含量的提高,猜测热胁迫下可能还有其余调控因子参与GRA水解合成SFN过程,还需要进一步研究来明确。

## 2.2 添加外源物质的影响

### 2.2.1 营养物质

在植物生长过程中,可以通过外源添加含氮、含硫化化合物及糖类等调控其营养状况,促进植物中硫苷的合成,从而提高SFN含量。

#### 2.2.1.1 含氮化合物

国内外很多研究表明植物可以将氨基酸作为氮源直接吸收利用。一方面,氨基酸是蔬菜中硝酸盐代谢的最终产物,外源氨基酸处理能显著降低硝酸盐积累<sup>[35]</sup>;另一方面,氨基酸也是硫苷合成的前体物质,氨基酸不同,形成的硫苷种类也不同,脂肪族硫苷主要来自于甲硫氨酸<sup>[14]</sup>。Baenas等<sup>[36]</sup>用15 mmol/L甲硫氨酸培养西兰花发芽,GRA含量达到254.45 mg/100 g,相比于对照组提高约76%,这在一定程度上也间接提高了SFN含量。植物吸收氨基酸的生理机制已有大量研究<sup>[37]</sup>,主要是受一系列转运蛋白,如赖氨酸-组氨酸转运体1、氨基酸渗透酶1和氨基酸渗透酶5的调控。然而,植物吸收氨基酸后的代谢和分配的研究目前还相对较少,西兰花苗中氨基酸调控硫苷合成的上游具体作用元件和调控模式还尚不明确。

此外,关于氮肥对植物中硫苷含量的影响研究大部分与硫肥结合在一起。研究<sup>[38]</sup>发现,低氮高硫肥((125 N+110 S) kg/hm<sup>2</sup>)可以显著提高甘蓝中GRA含量,硫苷总量达到最大(284.8 μmol/100 g)。但关于氮肥对西兰花苗中SFN含量的具体影响鲜见详细报道。

#### 2.2.1.2 含硫化化合物

植物中硫元素的含量会影响硫苷的种类及含量。硫苷中的硫占植物中总硫含量的30%,硫肥以硫元素的形式进入植物体内并参与硫苷的合成<sup>[39]</sup>。Hassini等<sup>[40]</sup>发现,用3 mmol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>处理西兰花苗,GRA含量较

蒸馏水处理的对照组增加20%。此外有研究<sup>[41]</sup>发现,用2 mmol/L ZnSO<sub>4</sub>处理西兰花苗,GRA含量增加30%,MYR活性提高,从而使SFN的生成量增加。Guo Liping等<sup>[42]</sup>发现,用10 mmol/L CaSO<sub>4</sub>处理西兰花苗后,硫苷和SFN含量显著增加,GRA合成基因*Elong*、*CYP79F1*、*CYP83A1*和*FM O<sub>GS-OXI</sub>*的表达显著上调,MYR与*ESM1*基因表达上调,从而使该处理下西兰花苗中MYR活性提高而ESP活性下降。由于不同硫酸盐所含阳离子不同,影响SFN合成的机理也不同,除硫元素对西兰花苗中硫苷及SFN含量的调控作用外,K<sup>+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>的影响也不可忽视,但关于不同金属离子的单独调控作用研究较少。

### 2.2.1.3 糖

在植物中糖类不仅能作为体内能源和碳骨架的提供者,还能作为非常重要的信号分子调控植物的生长发育过程和对逆境胁迫的应答<sup>[43]</sup>。Guo Rongfang等<sup>[44]</sup>用146 mmol/L不同种类的糖(蔗糖、葡萄糖、果糖、甘露醇和果糖/葡萄糖(1:1))处理西兰花苗,发现所有糖均诱导了硫苷积累,其中蔗糖最为有效,GRA含量达15.09 μmol/g,相比于对照组提高167%,并促进了GRA合成过程中*GS-Elong*基因表达,但对MYR酶活无显著影响;而葡萄糖效果最差,仅使GRA含量提高不足51%,同时MYR酶活显著降低。蔗糖可能是以分解为葡萄糖和果糖的形式调控硫苷的合成,而葡萄糖可能通过其信号转导下游转录因子AB15和脂肪族硫苷合成相关转录因子MYB28相互作用调控硫苷的积累<sup>[45]</sup>。Natella等<sup>[46]</sup>用不同浓度的蔗糖溶液处理西兰花苗,发现176 mmol/L蔗糖溶液处理下,硫苷总量达到最大,与对照组相比增加82%,但脂肪族硫苷含量无显著变化,蔗糖主要通过促进吲哚族硫苷合成(增加190%)影响西兰花苗中的硫苷含量。出现这种差异可能与实验材料和栽培环境不同有关,且结果的可靠性还有待验证,糖信号对西兰花苗中SFN含量影响的分子机制也需进一步研究。

### 2.2.2 植物激素

在植物受到病原菌侵染、昆虫摄取等外源损害时,植物激素可以通过调控次生代谢产物的合成响应环境变化,这其中也包括硫苷的合成。茉莉酸(jasmonic acid, JA)不仅参与植物的生长发育过程,还调控植物对于机械损伤、昆虫取食和腐生型病原菌侵害的防御反应<sup>[47]</sup>。Guo Liping等<sup>[48]</sup>发现,JA处理后西兰花芽中脂肪族硫苷生物合成途径中相关基因的表达升高,MYR酶活提高,SFN合成增加236%。茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)是JA的一种甲酯衍生物,研究<sup>[49]</sup>发现,MeJA主要调控西兰花中吲哚族硫苷——1-甲氧基吲哚基-3-甲基硫苷(neoglucobrassicin, nGBS)的合成,经250 μmol/L MeJA处理的成熟西兰花,与对照组相比硫苷总量增加50%,nGBS含量增加8倍,MYR酶活提高,但脂肪族硫苷含量降低约25%。

SA是一种与植物体内的逆境防御系统密切相关的信号分子,帮助植物形成与根相关的微生物种群,并增强对病原体威胁的适应性<sup>[50]</sup>。Hassini等<sup>[40]</sup>发现,SA主要通过影响MYR酶活调控萝卜根中脂肪族硫苷含量,且表现出低浓度(0.5 mmol/L)抑制、高浓度(1.5 mmol/L)促进的作用效果。在西兰花苗中也发现了SA的类似作用,用0.2 mmol/L SA对西兰花苗的叶片进行喷洒处理,吲哚族硫苷显著积累,MYR酶活提高,GRA含量降低约12%<sup>[40]</sup>。但外源添加高浓度SA是否可以促进西兰花苗中硫苷及SFN合成还有待实验论证。此外,JA和SA不是相互独立的,它们在植物的抗性反应中存在相互协同或拮抗作用,而其他激素如生长素、油菜素内酯(brassinosteroids, BR)等也会影响硫苷的合成,从而调控SFN的合成。各种植物激素存在相互作用,不同信号途径交织在一起形成复杂的网络,因此对于植物激素诱导西兰花苗中SFN合成的机理还需要更加深入的研究。

#### 2.2.3 NaCl

NaCl溶液可能通过渗透压胁迫或通过离子影响植物的代谢系统,进而影响西兰花苗中SFN的合成。Guo Liping等<sup>[51]</sup>使用不同浓度NaCl溶液处理西兰花苗,发现当浓度达到160 mmol/L时, GRA含量达到最高(3.84 mmol/g),相比于对照组提高71.4%,MYR活性提高38.4%、SFN含量增加215%。在NaCl造成的逆境胁迫下,西兰花苗可能通过改变体内内源激素如脱落酸、BR的含量来诱导一些胁迫响应基因的表达,激活西兰花苗中的“MYR-硫苷”防御体系,从而调控SFN的合成。

#### 2.2.4 钙盐

钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )是所有真核细胞中的普遍信号,在细胞信号传导中充当第二信使,参与植物代谢的很多途径<sup>[52]</sup>。在植物中, $\text{Ca}^{2+}$ 可与钙调蛋白(calmodulin, CaM)结合成 $\text{Ca}^{2+}$ /CaM复合体,通过其浓度变化将胞外信号传导到胞内,用以启动和调节胞内的生理生化过程<sup>[53]</sup>。研究<sup>[54]</sup>发现,10 mmol/L  $\text{CaCl}_2$ 处理可使西兰花苗中MYR基因表达上调,SFN含量增加约99%。此外,Zhuang Li等<sup>[55]</sup>还发现, $\text{CaCl}_2$ 可以减缓 $\text{ZnSO}_4$ 引起的胁迫并促进西兰花苗中GRA和SFN的形成,使其含量分别提高43%和132%。

#### 2.2.5 硒化物

硒和硫同属第6主族元素,有相似的理化特性并在植物中共享同一条代谢途径。西兰花是富硒富硫植物,硒积累增加(5  $\mu\text{mol/L}$ 以上)会显著影响其含硫化合物(硫苷)的合成<sup>[56]</sup>。用100  $\mu\text{mol/L}$ 亚硒酸钠和硒酸钠处理西兰花苗,与对照组相比,SFN含量分别增加15.5%和23.7%,硒处理提高西兰花苗中SFN含量的机理可能与硫硒竞争抑制效应、MYR活性增强和合成基因ST5b表达增加有关<sup>[57]</sup>。

#### 2.2.6 微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)

SAEW指在无隔膜的电解装置中电解稀盐酸溶液,获得的pH 5.0~6.5、氧化还原电位约800 mV、有效氯质量浓度(available chlorine concentration, ACC) 10~60 mg/L的功能水<sup>[58]</sup>。SAEW起源于日本,具有广谱杀菌性、环境友好、使用安全可靠、成本低廉等优点,近年来被广泛应用于医疗卫生、食品加工和农业生产三大领域<sup>[59]</sup>。Li Lizhen等<sup>[60]</sup>通过优化光照条件和SAEW参数指标(pH 5.6、ACC 50 mg/L),发现西兰花苗中GRA和SFN含量进一步增加,其中SFN含量最高增加至11.49 mg/g(干基),相比于对照组提高61.2%。SAEW中的HClO、 $\text{ClO}^-$ 等成分会对植物产生氧化胁迫,可能是通过影响其内源激素、活性氧(reactive oxygen species, ROS)水平和抗氧化酶活性调控SFN生成<sup>[61]</sup>。但目前关于SAEW调控西兰花苗中SFN合成的具体分子机制的相关报道较少,可以从氧化胁迫角度进一步深入研究其作用机理。

#### 2.3 联合处理

除通过以上单因素手段调控西兰花苗中SFN合成外,现在越来越多的研究集中在通过2种或以上方式联合处理西兰花苗,探究多因素互作对SFN合成的影响,如用2,4-表油菜素内酯(2,4-epibrassinolide, EBR)单独处理西兰花芽, GRA含量降低,而40 mmol/L NaCl溶液联合2 nmol/L EBR处理却使GRA含量提高85%,这可能是由于BR促进了盐胁迫下GRA的合成,也可能与植物激素的胁迫程度依赖性双向效应有关<sup>[62-63]</sup>。用160 mmol/L NaCl+100  $\mu\text{mol/L}$  SA联合处理西兰花苗,水解过程中的MYR酶活及相关基因表达增加,而硫苷生物合成途径的转录情况无显著变化, SFN含量相比于未处理组提高近6倍<sup>[64]</sup>。田璐等<sup>[65]</sup>发现,174.09 mmol/L NaCl+10.48 mmol/L  $\text{CaCl}_2$ 联合处理能进一步增加西兰花苗中的硫苷含量, GRA含量达到4.46  $\mu\text{mol}/10$ 株,相比于对照组提高92%。这是由于 $\text{Ca}^{2+}$ 可以通过盐过度敏感途径缓解NaCl盐胁迫<sup>[66]</sup>。除NaCl外, $\text{CaCl}_2$ 还可以与其他手段相联合。Li Cui等<sup>[67]</sup>将 $\text{CaCl}_2$ 和SAEW结合,制备 $\text{CaCl}_2$ -HCl复合电解水并将其用于西兰花苗的培育,结果发现,西兰花苗中的SFN含量提高26.1%、萝卜硫甾含量降低50.9%,MYR活性提高41.5%。这可能是由于 $\text{CaCl}_2$ -HCl复合电解水处理激活了西兰花苗中的ROS和钙信号,信号向下传递给SFN合成相关转录因子,然后转录因子促进SFN合成相关结构基因的表达,从而影响西兰花苗中SFN的合成<sup>[68-69]</sup>。多方法联合处理对西兰花苗中SFN合成

的调控效果显著,但其涉及的影响因素较多、调控机理复杂,关于组合方式的选择及多因素互作的机理还需进一步深入研究。

西兰花苗中SFN含量因基因型的不同而存在较大的差异。SFN含量的影响因素复杂,整个过程受品种、环境、外源添加物等多种因素影响<sup>[70]</sup>。目前国内外学者主要着眼于SFN的合成途径,从改变生长环境、添加外源物质及多种方法联合处理等方面促进西兰花苗生长过程中SFN的合成,具体调控方法如表1所示。

表1 不同处理手段对西兰花苗中SFN合成主要相关因子的影响  
Table 1 Effects of different treatments on major factors for SFN synthesis in broccoli sprouts

处理手段	参数	效应	参考文献
改变生长环境	光照 7.16 W/m <sup>2</sup> UV-B	GRA含量提高73%	[31]
	温度 60 °C, 20 min/d	GRA含量提高39%、MYR活性下降58% ESP含量降低64%、SFN含量提高154%	[34]
添加外源物质	含氮化合物 15 mmol/L 甲硫氨酸	GRA含量提高76%	[36]
	含硫化合物 3 mmol/L K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	GRA含量提高20%	[40]
	2 mmol/L ZnSO <sub>4</sub>	GRA含量提高30%	[41]
	糖 146 mmol/L 蔗糖	GRA含量提高167%、MYR活性不变	[44]
	146 mmol/L 葡萄糖	GRA含量提高51%、MYR活性下降	[44]
	植物激素 200 μmol/L SA	GRA含量降低12%	[40]
	100 μmol/L JA	MYR活性提高、SFN含量提高236%	[48]
	NaCl 160 mmol/L NaCl	GRA含量提高71.4%、MYR活性提高38.4% SFN含量提高215%	[51]
	钙 10 mmol/L CaCl <sub>2</sub>	MYR活性提高、SFN含量提高99%	[54]
	100 μmol/L Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>	MYR活性提高、SFN含量提高23.7%	[57]
多种方法联合处理	100 μmol/L Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>	MYR活性提高、SFN含量提高15.5%	[57]
	SAEW pH 5.6、ACC 50 mg/L	GRA含量提高、SFN含量提高61.2%	[60]
	40 mmol/L NaCl+2 nmol/L EBR	GRA含量提高85%	[62-63]
	160 mmol/L NaCl+100 μmol/L SA	GRA含量不变、MYR活性提高、SFN含量提高6倍	[64]
	174.09 mmol/L NaCl+10.48 mmol/L CaCl <sub>2</sub>	GRA含量提高92%	[65]
	5 mmol/L CaCl <sub>2</sub> -HCl	MYR活性提高41.5%、SFN含量提高26.1%	[67]

### 3 结 语

本文总结了前人关于西兰花苗中SFN的合成和降解过程的研究,在此基础上,又进一步综述通过改变处理手段提高西兰花苗生长过程中SFN积累的研究现状(图3)。SFN主要由西兰花苗中含量丰富的GRA水解形成,是迄今发现的植物源食品中抗癌活性最高的物质之一,具有治疗许多人类疾病的潜力,主要由西兰花苗中含量丰富的GRA水解形成。随着西兰花苗中硫苷合成过程和SFN生理功能的逐步揭示,采用不同的调控手段胁迫西兰花种子发芽和生长,富集西兰花苗中的SFN早已成为很多学者关注和研究的重点。此外,也可采用分子育种手段提高西兰花苗中的GRA含量和MYR活性、减少ESP蛋白的形成,从而达到富集SFN的目的。已有学者<sup>[71]</sup>通过基因工程手段(RNA干扰技术)使芥菜型油菜中AOP2不表达,提高了GRA含量。

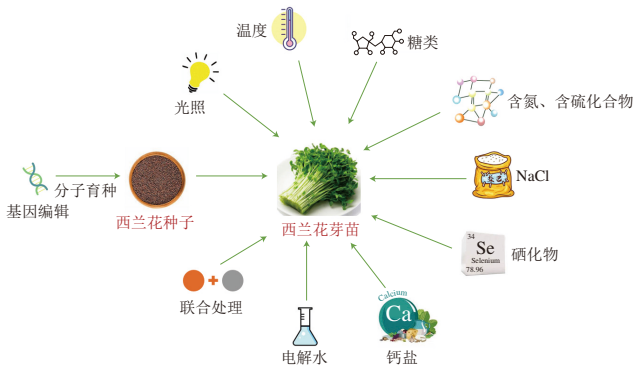


图3 西兰花苗中SFN合成的调控手段

Fig. 3 Methods for regulating SFN biosynthesis in broccoli sprouts

然而,关于富集西兰花苗中SFN的研究还存在很多问题,仍有很多方面需要进一步研究:1)虽然已知西兰花苗中SFN合成的过程及其中的一些调控基因,但目前大多数研究均从GRA合成相关基因的表达情况、MYR酶活及ESP活性方面阐述各种调控手段的作用机理,在关键酶基因和转录因子响应外源刺激过程中,其上游具体作用元件和调控模式尚不清晰,亟待解决。2)多种手段联合调控已被证明可以更加有效地富集西兰花苗中的SFN,但多种因素如何相互作用调控SFN合成、如何选择可以富集SFN的联合调控手段等问题仍需进一步研究。3)目前研究的调控手段大多着眼于SFN的合成途径,对SFN在植物中的降解途径关注较少。通过抑制SFN降解生产高SFN含量的西兰花苗也是一种新思路。4)基于合成生物学的理念,设计和创建人工细胞工厂发酵生产目标化合物是一种新的SFN获取模式。杨寒<sup>[72]</sup>通过基因选择、途径设计和蛋白质工程在大肠杆菌中成功构建GRA的生物合成途径。如何在此基础上继续探索优化,合成更高含量的SFN也是一个值得探索的问题。

综上所述,为得到高SFN含量的西兰花苗,需要逐步明确各手段调控SFN合成的具体分子机制,并不断发掘新的有效调控手段和新技术,从而为提高植物源食品的功能性提供依据。

### 参考文献:

- [1] VANDUCHOVA A, ANZENBACHER P, ANZENBACHEROVA E. Isothiocyanate from broccoli, sulforaphane, and its properties[J]. Journal of Medicinal Food, 2019, 22(2): 121-126. DOI:10.1089/jmf.2018.0024.
- [2] YAGISHITA Y, FAHEY J W, DINKOVA-KOSTOVA A T, et al. Broccoli or sulforaphane: is it the source or dose that matters?[J]. Molecules, 2019, 24(19): 3593-3630. DOI:10.3390/molecules24193593.
- [3] WU G T, YAN Y L, ZHOU Y Y, et al. Sulforaphane: expected to become a novel antitumor compound[J]. Oncology Research Featuring Preclinical and Clinical Cancer Therapeutics, 2020, 28(4): 439-446. DOI:10.3727/096504020X15828892654385.



- [4] SUBEDI L, LEE J H, YUMNAM S, et al. Anti-inflammatory effect of sulforaphane on LPS-activated microglia potentially through JNK/AP-1/NF- $\kappa$ B inhibition and Nrf2/HO-1 activation[J]. Cells, 2019, 8(2): 194. DOI:10.3390/cells8020194.
- [5] MAZARAKIS N, SNIBSON K, LICCIARDI P V, et al. The potential use of *L*-sulforaphane for the treatment of chronic inflammatory diseases: a review of the clinical evidence[J]. Clinical Nutrition, 2020, 39(3): 664-675. DOI:10.1016/j.clnu.2019.03.022.
- [6] TENG W, LI Y, DU M, et al. Sulforaphane prevents hepatic insulin resistance by blocking serine palmitoyl transferase 3-mediated ceramide biosynthesis[J]. Nutrients, 2019, 11(5): 1185. DOI:10.3390/nu11051185.
- [7] MARTINS T, COLACO B, VENANCIO C, et al. Potential effects of sulforaphane to fight obesity[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(8): 2837-2844. DOI:10.1002/jsfa.8898.
- [8] 何珺, 谢述琼, 杨佳年, 等. 12 种十字花科蔬菜种子中萝卜硫素含量研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(4): 11-13. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2015.04.004.
- [9] FAHEY J W, ZHANG Y, TALALAY P. Broccoli sprouts: an exceptionally rich source of inducers of enzymes that protect against chemical carcinogens[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1997, 94(19): 10367-10372. DOI:10.1073/pnas.94.19.10367.
- [10] JI R, LEI J X, CHEN I W, et al. Cytochrome P450 CYP380C6 and CYP380C9 in green peach aphid facilitate its adaptation to indole glucosinolate-mediated plant defense[J]. Pest Management Science, 2021, 77(1): 148-158. DOI:10.1002/ps.6002.
- [11] BLAZEVIĆ I, MONTAUT S, BURCUL F, et al. Glucosinolate structural diversity, identification, chemical synthesis and metabolism in plants[J]. Phytochemistry, 2020, 169: 112100. DOI:10.1016/j.phytochem.2019.112100.
- [12] HWANG I M, PARK B, DANG Y M, et al. Simultaneous direct determination of 15 glucosinolates in eight brassica species by UHPLC-Q-Orbitrap-MS[J]. Food Chemistry, 2019, 282: 127-133. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.12.036.
- [13] MAKOTO S, IKUKO H N. Specialized vacuoles of myrosin cells: chemical defense strategy in brassicales plants[J]. Plant and Cell Physiology, 2018, 59(7): 1309-1316. DOI:10.1093/pcp/pcy082.
- [14] NINTEMANN S J, HUNZIKER P, ANDERSEN T G, et al. Localization of the glucosinolate biosynthetic enzymes reveals distinct spatial patterns for the biosynthesis of indole and aliphatic glucosinolates[J]. Physiologia Plantarum, 2017, 163: 138-154. DOI:10.1111/ppl.12672.
- [15] OUASSOU M, MAISARAEL A, AMALKROYMANN J, et al. Biosynthesis of indole glucosinolates and ecological role of secondary modification pathways[J]. Comptes Rendus Biologies, 2019, 342(3/4): 58-80. DOI:10.1016/j.crv.2019.03.005.
- [16] WANG J S, GU H H, YU H F, et al. Genotypic variation of glucosinolates in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) florets from China[J]. Food Chemistry, 2012, 133(3): 735-741. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.01.085.
- [17] GUERRERO-BELTRÁN C E, CALDERÓN-OLIVER M, PEDRAZA-CHAVERRI J, et al. Protective effect of sulforaphane against oxidative stress: recent advances[J]. Experimental and Toxicologic Pathology, 2012, 64(5): 503-508. DOI:10.1016/j.etp.2010.11.005.
- [18] MATUSHESKI N V, JEFFERY E H. Comparison of the bioactivity of two glucoraphanin hydrolysis products found in broccoli, sulforaphane and sulforaphane nitrile[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(12): 5743-5749. DOI:10.1021/jf010809a.
- [19] WILLIAMS D J, CRITCHLEY C, PUN S, et al. Key role of Fe<sup>2+</sup> in epithiospecifier protein activity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(15): 8512-8521. DOI:10.1021/jf904532n.
- [20] RYOSUKE S, HIRAI M Y. Atypical myrosinase as a mediator of glucosinolate functions in plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1008. DOI:10.3389/fpls.2019.01008.
- [21] GU Z X, GUO Q H, GU Y J. Factors influencing glucoraphanin and sulforaphane formation in brassica plants: a review[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(11): 1804-1816. DOI:10.1016/S2095-3119(12)60185-3.
- [22] TRAVERS-MARTIN N, KUHLMANN F, MÜLLER C. Revised determination of free and complexed myrosinase activities in plant extracts[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2008, 46(4): 506-516. DOI:10.1016/j.plaphy.2008.02.008.
- [23] SHEN L Q, SU G Y, WANG X Y, et al. Endogenous and exogenous enzymolysis of vegetable-sourced glucosinolates and influencing factors[J]. Food Chemistry, 2010, 119(3): 987-994. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.08.003.
- [24] ERB M, KLIEBENSTEIN D J. Plant secondary metabolites as defenses, regulators and primary metabolites-the blurred functional trichotomy[J]. Plant Physiology, 2020, 184(1): 39-52. DOI:10.1104/pp.20.00433.
- [25] SUGIYAMA R, LI R, KUWAHARA A, et al. Retrograde sulfur flow from glucosinolates to cysteine in *Arabidopsis thaliana*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(22): e2017890118. DOI:10.1073/pnas.2017890118.
- [26] SUN J H, CHARRON C S, NOVOTNY J A, et al. Profiling glucosinolate metabolites in human urine and plasma after broccoli consumption using non-targeted and targeted metabolomic analyses[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125660. DOI:10.1073/pnas.2017890118.
- [27] ABELLÁN Á, DOMÍNGUEZ-PERLES R, MORENO D, et al. Sorting out the value of cruciferous sprouts as sources of bioactive compounds for nutrition and health[J]. Nutrients, 2019, 11(2): 429. DOI:10.3390/nu11020429.
- [28] MO W P, TANG W J, DU Y X, et al. Phytochrome-interacting factor-like14 and slender rice1 interaction controls seedling growth under salt stress[J]. Plant Physiology, 2020, 184(1): 24. DOI:10.1104/pp.20.00024.
- [29] 毛鹏鹏, 郑胤建, 杨其长, 等. 光质对十字花科蔬菜硫代葡萄糖苷调控分子机制研究进展[J]. 园艺学报, 2020, 47(9): 15. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0219.
- [30] 梁文静. LED光质对西兰花芽苗菜生长及代谢的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 15-19.
- [31] MELISSA M, VIMAL N, JORGE B, et al. UVA, UVB light doses and harvesting time differentially tailor glucosinolate and phenolic profiles in broccoli sprouts[J]. Molecules, 2017, 22(7): 1065. DOI:10.3390/molecules22071065.
- [32] MEWIS I, SCHREINER M, NGUYEN C N, et al. UVB irradiation changes specifically the secondary metabolite profile in broccoli sprouts: induced signaling overlaps with defense response to biotic stressors[J]. Plant and Cell Physiology, 2012(9): 1546-1560. DOI:10.1093/pcp/pcs096.
- [33] MATUSHESKI N V, JUVIK J A, JEFFERY E H. Heating decreases epithiospecifier protein activity and increases sulforaphane formation in broccoli[J]. Phytochemistry, 2004, 65(9): 1273-1281. DOI:10.1016/j.phytochem.2004.04.013.
- [34] GUO L P, YANG R Q, ZHOU Y L, et al. Heat and hypoxia stresses enhance the accumulation of aliphatic glucosinolates and sulforaphane in broccoli sprouts[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(1): 107-116. DOI:10.1007/s00217-015-2522-y.
- [35] MA Q X, CAO X C, XIE Y N, et al. Effects of glucose on the uptake and metabolism of glycine in pakchoi (*Brassica chinensis* L.) exposed to various nitrogen sources[J]. BMC Plant Biology, 2017, 17(5968): 1008-1010. DOI:10.1186/s12870-017-1006-6.
- [36] BAENAS N, VILLANO D, GARCIA-VIGUERA C, et al. Optimizing elicitation and seed priming to enrich broccoli and radish sprouts in glucosinolates[J]. Food Chemistry, 2016, 204: 314-319. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.02.144.
- [37] 马庆旭. 植物对氨基酸的吸收及pH和Cd胁迫对其吸收的影响机制[J]. 杭州: 浙江大学, 2019: 11-13.
- [38] ROSEN C J, FRITZ V A, GARDNER G M, et al. Cabbage yield and glucosinolate concentrations as affected by nitrogen and sulfur fertility[J]. HortScience, 2005, 40(5): 1493-1498. DOI:10.21273/HORTSCI.40.5.1493.
- [39] AIRES A, ROSA E, CARVALHO R, et al. Influence of nitrogen and sulfur fertilization on the mineral composition of broccoli

- sprouts[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(7): 1035-1046. DOI:10.1080/01904160701394402.
- [40] HASSINI I, RIOS J J, GARCIA-IBÁÑEZ P, et al. Comparative effect of elicitors on the physiology and secondary metabolites in broccoli plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2019, 239: 1-9. DOI:10.1016/j.jplph.2019.05.008.
- [41] YANG R Q, GUO L P, ZHOU Y L, et al. Calcium mitigates the stress caused by  $\text{ZnSO}_4$  as a sulphur fertilizer and enhances the sulforaphane formation of broccoli sprouts[J]. RSC Advances, 2015, 5(17): 12563-12570. DOI:10.1039/C4RA11371C.
- [42] GUO L P, ZHU Y L, WANG F W. Calcium sulfate treatment enhances bioactive compounds and antioxidant capacity in broccoli sprouts during growth and storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 139: 12-19. DOI:10.1016/j.postharvbio.2018.01.010.
- [43] PENG Y C, CHEN L L, LI S J, et al. BRI1 and BAK1 interact with G proteins and regulate sugar-responsive growth and development in arabidopsis[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1215-1231. DOI:10.1038/s41467-018-03884-8.
- [44] GUO R F, YUAN G F, WANG Q M. Sucrose enhances the accumulation of anthocyanins and glucosinolates in broccoli sprouts[J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 1080-1087. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.05.078.
- [45] MIAO H Y, WEI J, ZHAO Y T, et al. Glucose signalling positively regulates aliphatic glucosinolate biosynthesis[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64: 1097-1109. DOI:10.1093/jxb/ers399.
- [46] NATELLA F, MALDINI M, NARDINI M, et al. Improvement of the nutraceutical quality of broccoli sprouts by elicitation[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 101-109. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.01.063.
- [47] HU Y R, JIANG Y J, HAN X, et al. Jasmonate regulates leaf senescence and tolerance to cold stress: crosstalk with other phytohormones[J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(6): 1361-1369. DOI:10.1093/jxb/erx004.
- [48] GUO L P, YANG R Q, GU Z X. Cloning of genes related to aliphatic glucosinolate metabolism and the mechanism of sulforaphane accumulation in broccoli sprouts under jasmonic acid treatment[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 13(96): 4329-4336. DOI:10.1002/jsfa.7629.
- [49] CHIU Y C, MATAK K, KU K M. Methyl jasmonate treated broccoli: impact on the production of glucosinolates and consumer preferences[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125099. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125099.
- [50] DING P T, DING Y L. Stories of salicylic acid: a plant defense hormone[J]. Trends in Plant Science, 2020, 6(25): 549-565. DOI:10.1016/j.tplants.2020.01.004.
- [51] GUO L P, YANG R Q, WANG Z Y, et al. Effect of NaCl stress on health-promoting compounds and antioxidant activity in the sprouts of three broccoli cultivars[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2014, 65(4): 476-481. DOI:10.3109/09637486.2013.860583.
- [52] TIAN W, WANG C, GAO Q F, et al. Calcium spikes, waves and oscillations in plant development and biotic interactions[J]. Nature Plants, 2020, 6(7): 750-759. DOI:10.1038/s41477-020-0667-6.
- [53] KIM M C, CHUNG W S, YUN D J, et al. Calcium and calmodulin-mediated regulation of gene expression in plants[J]. Molecular Plant, 2009, 2(1): 13-21. DOI:10.1093/mp/ssn091.
- [54] YANG R Q, HUI Q R, GU Z X, et al. Effects of  $\text{CaCl}_2$  on the metabolism of glucosinolates and the formation of isothiocyanates as well as the antioxidant capacity of broccoli sprouts[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 24: 156-163. DOI:10.1016/j.jff.2016.04.007.
- [55] ZHUANG L, XU K X, ZHU Y L, et al. Calcium affects glucoraphanin metabolism in broccoli sprouts under  $\text{ZnSO}_4$  stress[J]. Food Chemistry, 2021, 334: 127520. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127520.
- [56] DALL'ACQUA S, ERTANI A, PILON-SMITS E A H, et al. Selenium biofortification differentially affects sulfur metabolism and accumulation of phytochemicals in two rocket species (*Eruca sativa* Mill. and *Diplotaxis tenuifolia*) grown in hydroponics[J]. Plants, 2019, 8(3): 68. DOI:10.3390/plants8030068.
- [57] MAO S X, WANG J W, WU Q, et al. Effect of selenium-sulfur interaction on the anabolism of sulforaphane in broccoli[J]. Phytochemistry, 2020, 179(1): 112499. DOI:10.1016/j.phytochem.2020.112499.
- [58] RAO H, WANG Q F, HAN X, et al. Quantitative proteomics reveals the mechanism of slightly acidic electrolyzed water-induced buckwheat sprouts growth and flavonoids enrichment[J]. Food Research International, 2021, 148: 110634. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110634.
- [59] WANG H X, ZHANG Y Q, JIANG H T, et al. A comprehensive review of effects of electrolyzed water and plasma-activated water on growth, chemical compositions, microbiological safety and postharvest quality of sprouts[J]. Trends in Food Science and Technology, 2022, 129: 449-462. DOI:10.1016/j.tifs.2022.10.017.
- [60] LI L Z, SONG S H, NIRASAWA S, et al. Slightly acidic electrolyzed water treatment enhances the main bioactive phytochemicals content in broccoli sprouts via changing metabolism[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(2): 606-614. DOI:10.1021/acs.jafc.8b04958.
- [61] LI L Z, SUN Y Y, LIU H J, et al. The increase of antioxidant capacity of broccoli sprouts subject to slightly acidic electrolyzed water[J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101856. DOI:10.1016/j.fbio.2022.101856.
- [62] LIU J L, YANG R C, JIAN N, et al. Putrescine metabolism modulates the biphasic effects of brassinosteroids on canola and *Arabidopsis* salt tolerance[J]. Plant, Cell and Environment, 2020, 43(6): 1348-1359. DOI:10.1111/pce.13757.
- [63] GUO R F, HOU Q M, YUAN G F, et al. Effect of 2,4-epibrassinolide on main health-promoting compounds in broccoli sprouts[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 58(1): 287-292. DOI:10.1016/j.lwt.2014.02.047.
- [64] ESFANDIARI A, SAEI A, MCKENZIE M J, et al. Preferentially enhancing anti-cancer isothiocyanates over glucosinolates in broccoli sprouts: how NaCl and salicylic acid affect their formation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 115: 343-353. DOI:10.1016/j.plaphy.2017.04.003.
- [65] 田璐, 吴嘉琪, 李昕悦.  $\text{NaCl}$ 与 $\text{CaCl}_2$ 处理对西兰花芽苗硫苷和异硫氰酸盐含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(2): 352-358. DOI:10.7685/jnau.201610002.
- [66] ZELM E V, ZHANG Y X, TESTERINK C. Salt tolerance mechanisms of plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2020, 71: 403-433. DOI:10.1146/annurev-arplant-050718-100005.
- [67] LI C, SONG S H, HE Y N, et al.  $\text{CaCl}_2$ -HCl electrolyzed water affects glucosinolate metabolism and improves the quality of broccoli sprouts[J]. Food Research International, 2021, 150: 110807. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110807.
- [68] LI C, SONG S H, HE Y N, et al. Transcriptomics integrated with metabolomics reveals the mechanism of  $\text{CaCl}_2$ -HCl electrolyzed water-induced glucosinolate biosynthesis in broccoli sprouts[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(2): 801-812. DOI:10.26599/FSHW.2022.9250068.
- [69] LI C, SONG S H, HE Y N, et al.  $\text{CaCl}_2$ -HCl electrolyzed water promotes glucosinolate metabolism in broccoli sprouts via calcium signalling[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10(1): 1-13. DOI:10.1186/s40538-023-00416-5.
- [70] 刘倩, 李敏, 田玉玲, 等. 硫代葡萄糖苷研究现状[J]. 农产品加工, 2020(6): 86-88. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2020.03.058.
- [71] AUGUSTINE R, BISHT N C. Biofortification of oilseed brassica juncea with the anti-cancer compound glucoraphanin by suppressing GSL-ALK gene family[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 18005. DOI:10.1038/srep18005.
- [72] 杨寒. 微生物合成植源抗癌化合物前体萝卜硫苷[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 1-2.