

不同质量浓度脱落酸对小白菜硫代葡萄糖苷含量的影响

胡克玲¹, 朱祝军²

(1 安徽农业大学 园艺学院, 安徽 合肥 230036; 2 浙江农林大学 农业与食品科学学院, 浙江 临安 311300)

摘要:为探讨外源激素对硫代葡萄糖苷(硫苷)的调控,研究了不同质量浓度(0、5、10和20 mg·L⁻¹)脱落酸(ABA)处理对小白菜 *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) Makino var. *communis* Tsen et Lee cv. Shanghaiqing 生长和硫苷含量的影响.结果表明:不同质量浓度的 ABA 对小白菜鲜质量没有显著的影响.在 10 mg·L⁻¹的 ABA 处理时总脂肪族硫苷含量显著降低,然而 5 和 10 mg·L⁻¹的 ABA 处理显著诱导了总吲哚族硫苷和 1-甲氧基吲哚-3-甲基硫苷含量的提高.20 mg·L⁻¹的 ABA 处理显著增加了芳香族硫苷含量.但是 10 和 20 mg·L⁻¹的 ABA 处理显著抑制了小白菜总硫苷含量的增加.10 mg·L⁻¹的 ABA 处理显著降低了总脂肪族硫苷在总硫苷中所占的比例,但显著增加了总吲哚族硫苷和芳香族硫苷的相对百分含量.研究表明,不同浓度 ABA 处理对小白菜单个硫苷和总硫苷含量及组成具有不同的影响.

关键词:小白菜; 硫代葡萄糖苷; 生长; 脱落酸
中图分类号:S634.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2013)03-0366-06

Effects of Different Concentrations of Absciscic Acid on Glucosinolates Contents in Pakchoi

HU Keling¹, ZHU Zhujun²

(1 Department of Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
2 School of Agricultural and Food Science, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract:To explore the regulatory effect of exogenous hormone on accumulation of the antitumor substance glucosinolate, plants of Shanghaiqing pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) Makino var. *communis* Tsen et Lee cv. Shanghaiqing) were treated by abscisic acid (ABA) with different concentrations (0, 5, 10 and 20 mg·L⁻¹). The results showed that sprays of ABA solutions did not significantly affect biomass of pakchoi. 10 mg·L⁻¹ ABA treatment significantly decreased the content of aliphatic glucosinolates in pakchoi shoots. However, treatments of 5 and 10 mg·L⁻¹ ABA significantly increased the contents of indole glucosinolates and neoglucobrassicin. The content of aromatic glucosinolate significantly increased by ABA at 20 mg·L⁻¹. But 10 and 20 mg·L⁻¹ ABA inhibited the increase in total glucosinolate content. In addition, 10 mg·L⁻¹ ABA treatment decreased the portion of aliphatic glucosinolates in pakchoi shoots, increasing the relative percentages of indole glucosinolates and aromatic glucosinolate. It could be concluded that exogenous ABA with different concentrations have different effects on the contents and composition of glucosinolates.

Key words: pakchoi; glucosinolate; growth; abscisic acid

收稿日期:2012-12-05 网络出版时间:2013-03-27
网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20130327.1444.001.html>
作者简介:胡克玲(1982—),女,讲师,博士;通信作者:朱祝军(1963—),男,教授,博士, E-mail: zhujun.zhu@zafu.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(30871718);安徽省自然科学基金(1208085QC54);浙江农林大学科研发展基金(2008FR028);安徽农业大学青年科学基金重点项目(2011zb006)

硫代葡萄糖苷简称硫苷,是一种主要分布于十字花科植物中的富含氮硫的次生代谢产物,与人类的身体健康有非常密切的关系,在抗癌方面的作用已得到人们的公认^[1]. 根据侧链基团的氨基酸来源不同,可将硫苷分为脂肪族、芳香族、吲哚族硫苷^[2]. 硫苷合成除了受到硫、盐^[3]等因素影响外,也受一些植物生长激素的调控^[4]. 随着对植物激素生理功能和作用机制方面研究的不断深入,人们发现植物激素和硫苷存在着非常复杂的相互作用^[4].

脱落酸(Abscicic acid, ABA)作为植物体内一种重要的植物激素,在调节植物生长发育、衰老以及适应环境胁迫方面具有重要的作用^[5]. 但目前,有关外源 ABA 影响植物硫苷含量的报道较少,外源 ABA 对植株硫苷含量的影响机制尚不清楚. 为了探索 ABA 对硫苷的调控机制,本文研究了不同浓度的外源 ABA 对小白菜硫苷含量和组成的影响,探讨不同浓度 ABA 处理对小白菜硫苷含量和组成的影响机制,以期对硫苷的合成调控提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料培养与试验设计

选用小白菜 *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) Makino var. *communis* Tsen et Lee ‘上海青’为试验材料. 将小白菜种子播种于蛭石中,待其生长至 2~3 片真叶时,挑选生长一致的幼苗,移栽到 10 L 的塑料箱中,溶液培养. 营养液成分:Ca (NO₃)₂、KH₂PO₄、KNO₃、MgSO₄ 和 NH₄NO₃ 浓度分别为 2.5、1.0、4.0、1.0 和 0.5 mmol · L⁻¹, H₃BO₃、H₂MoO₄、MnSO₄、ZnSO₄、CuSO₄ 和 EDTA-Fe 浓度分别为 10.0、0.1、3.0、2.0、0.8 和 40.0 μmol · L⁻¹. 培养期间每 3~4 天更换 1 次营养液. 白天温度 25~30 ℃,夜间温度 15~18 ℃,最大光照强度为 3 万 lx.

试验设置 5、10 和 20 mg · L⁻¹ 的 ABA 3 个处理,以清水为对照(CK). 先将 ABA (Sigma 公司产品)配制成 1 000 mg · L⁻¹ 的溶液,再根据试验所需进行稀释. 将 ABA 溶液均匀喷施于小白菜叶面,每株一次性喷施 5 mL. 每个处理重复 3 次,每个重复为 6 株,每处理共 18 株. 处理 7 d 后取样. 整株采收,用湿棉布包裹小白菜根部,放进泡沫箱中,迅速运回实验室. 将地上部与根部分割,测定地上部鲜质量,并用液氮迅速处理,保存在超低温冰箱(-80 ℃)中,然后在冷冻干燥机中干燥,研磨,在超低温冰箱中保存备用.

1.2 硫苷含量分析

参照 Krumbein 等^[6]、陈新娟等^[7]的方法并略微修改. 称取 0.25 g 冻干样品于 80 ℃ 水浴中预热 1 min 后,用 4 mL 体积分数为 70% 的甲醇于 75 ℃ 水浴条件下提取 10 min,冷却后加入 1 mL 乙酸钡,用涡涡仪充分混合后,4 000 r · min⁻¹ 离心 10 min,保存上清液,沉淀再用体积分数为 70% 甲醇提取 2 次. 将 3 次提取的上清液定容至 10 mL. 同时做 1 个平行重复,在另一份样品中加入 5 mmol · L⁻¹ 的 2-丙烯基硫苷(Sigma-Aldrich Co., MO, USA) 100 μL 作为内标,其他操作相同. 取 5 mL 提取液在 0.03 MPa 压力下流经 DEAE SephadexTM A25 (Amersham Biosciences, Sweden) 固相萃取柱,待提取液全部流出小柱后,加入 200 μL 硫酸酯酶液(Sigma-Aldrich Co., MO, USA). 室温反应 12 h 后用 5 mL 超纯水洗脱. 洗脱液用 0.45 μm 滤膜过滤后在 4 ℃ 条件下保存,待高效液相色谱(HPLC)分析.

HPLC 分离条件:色谱柱为 ProntoSIL ODS2 (250 × 4 mm, 5 μm; Bishoff, Germany). 柱温 30 ℃. 流动相为超纯水和乙腈. 梯度条件为 0~45 min 内乙腈浓度线性梯度变化 0~20%, 水梯度变化为 100%~80%. 检测波长 229 nm,流速 1.3 mL · min⁻¹.

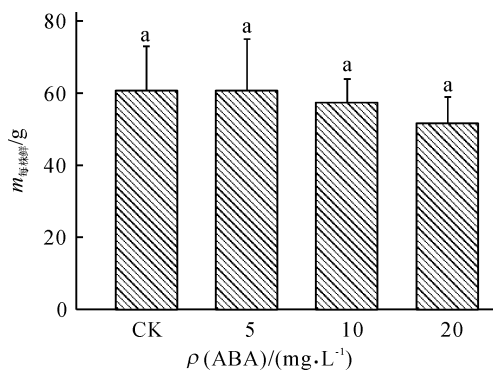
1.3 统计分析

作图采用 Originlab 7.5 软件. 数据采用 SAS 软件进行方差分析.

2 结果与分析

2.1 ABA 处理对小白菜生长的影响

如图 1 所示,在本试验所设置质量浓度下,小白菜的地上部鲜质量随 ABA 处理质量浓度的增加有下降的趋势,但与对照相比并没有显著差异.



图中柱子上方凡具有一个相同英文字母者,表示经过 Duncan's 方差检验差异不显著($P > 0.05$).

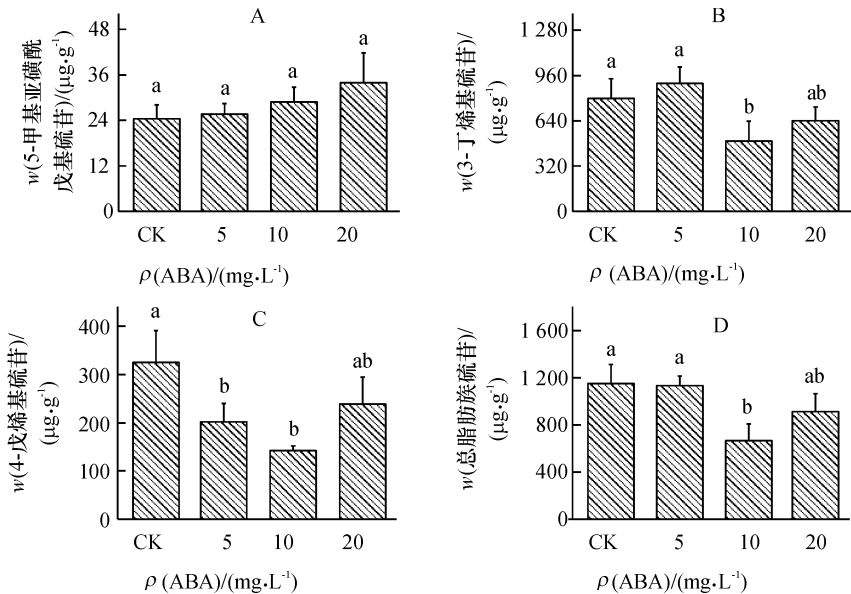
图1 不同质量浓度 ABA 处理对小白菜地上部鲜质量的影响
Fig. 1 Effects of ABA with different concentrations on fresh mass of pakchoi shoots

2.2 ABA 处理对小白菜地上部脂肪族硫苷含量的影响

在小白菜地上部共检测到 7 种单个硫苷,分别是:3 种脂肪族硫苷,包括 5-甲基亚磺酰戊基硫苷 (Glucoalylsin),3-丁烯基硫苷 (Gluconapin),4-戊烯基硫苷 (Glucobrassicinapin);3 种吲哚族硫苷,包括吲哚-3-甲基硫苷 (Glucobrassicin),4-甲氧基吲哚-3-甲基硫苷 (4-methoxyglucobrassicin),1-甲氧基吲哚-3-甲基硫苷 (Neoglucobrassicin);1 种芳香族硫苷,即 2-苯乙基硫苷 (Gluconasturtin).

不同质量浓度 ABA 处理对单个脂肪族硫苷和总脂肪族硫苷含量均产生了不同程度的影响. 在

ABA 处理下,5-甲基亚磺酰戊基硫苷(图 2A)含量与对照差异不显著. 不同质量浓度 ABA 处理下,3-丁烯基硫苷(图 2B)和总脂肪族硫苷(图 2D)含量呈相似的变化趋势. 较低质量浓度 ABA($5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理对 3-丁烯基硫苷和总脂肪族硫苷含量没有显著影响;但随着 ABA 质量浓度的增加,两者含量有下降的趋势,特别是在 ABA 质量浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,两者含量最低,与对照相比,分别减少了 38% 和 42%. 不同质量浓度 ABA 处理均降低了 4-戊烯基硫苷(图 2C)含量,尤其在 ABA 质量浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时显著降低了 4-戊烯基硫苷含量,比对照降低了 56%. 说明 ABA 对脂肪族硫苷合成为负调控.



每图中,柱子上方凡具有一个相同小写英文字母者,表示经过 Duncan's 方差检验差异不显著 ($P>0.05$).

图2 不同质量浓度 ABA 处理对小白菜地上部(干品)脂肪族硫苷含量的影响
Fig.2 Effects of ABA with different concentrations on contents aliphatic glucosinolates

2.3 ABA 处理对小白菜地上部吲哚族硫苷含量的影响

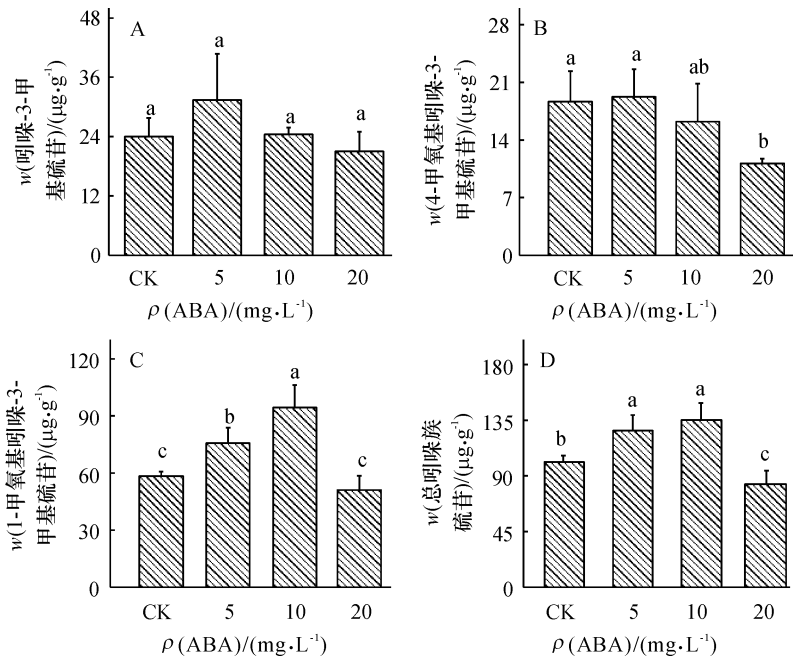
与对照相比,ABA 质量浓度增加对吲哚-3-甲基硫苷含量没有显著的影响(图 3A). 在低质量浓度 ABA($5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理时 4-甲氧基吲哚-3-甲基硫苷含量无显著变化,但随 ABA 质量浓度增加,4-甲氧基吲哚-3-甲基硫苷含量呈递减趋势(图 3B). 1-甲氧基吲哚-3-甲基硫苷含量随 ABA 质量浓度的增加有先升高后下降的趋势,10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时达到最高值,比对照增加 62%(图 3C). 总吲哚族硫苷含量随 ABA 质量浓度增加,也呈先升后降的趋势,在 ABA 质量浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时其含量达到最高,但在低质量浓度 ($5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 与较高质量浓度 ($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 处理之间没有显著差异(图 3D). 可见,ABA 处理对多数吲哚族硫苷含量有一定的浓度效应.

2.4 ABA 处理对小白菜地上部芳香族硫苷含量的影响

如图 4 所示,与对照相比,5 和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ABA 处理对芳香族硫苷/2-苯乙基硫苷含量没有显著影响. 但较高质量浓度 ($20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ABA 处理能够显著诱导 2-苯乙基硫苷的合成,其含量比对照增加了 143%.

2.5 ABA 处理对小白菜地上部总硫苷含量的影响

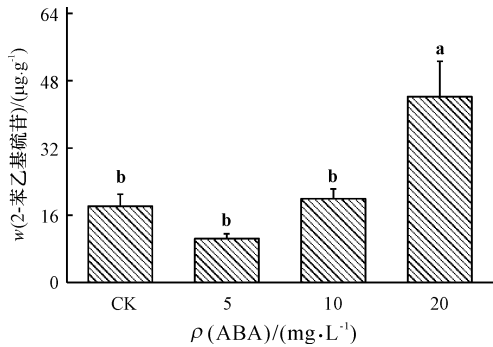
从图 5 可知,与对照相比,在较低质量浓度 ($5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ABA 处理下,总硫苷含量没有显著的变化. 但随着 ABA 质量浓度的增加,总硫苷含量显著降低,尤其在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理下,总硫苷含量达到最低值,比对照减少 30%. 说明在试验所设置的浓度范围内,ABA 处理并不能提高小白菜总硫苷含量,在较高浓度下反而降低了总硫苷含量.



每图中,柱子上方凡具有一个相同小写英文字母者,表示经过 Duncan's 方差检验差异不显著($P>0.05$).

图3 不同质量浓度 ABA 处理对小白菜地上部(干品)吲哚族硫苷含量的影响

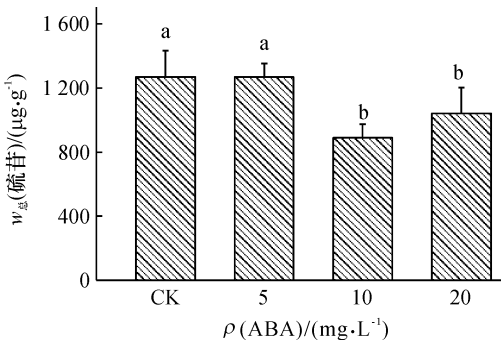
Fig. 3 Effects of ABA with different concentrations on indole glucosinolate content in pakchoi shoots



图中柱子上方凡具有一个相同小写英文字母者,表示经过 Duncan's 方差检验差异不显著($P>0.05$).

图4 不同质量浓度 ABA 处理对小白菜地上部(干品)芳香族硫苷/2-苯乙基硫苷含量的影响

Fig. 4 Effects of ABA with different concentrations on the content of aromatic/gluconasturtin glucosinolates



图中柱子上方凡具有一个相同小写英文字母者,表示经过 Duncan's 方差检验差异不显著($P>0.05$).

图5 不同质量浓度 ABA 处理对小白菜地上部(干品)总硫苷含量的影响

Fig. 5 Effects of ABA with different concentrations on total glucosinolate content in pakchoi shoots

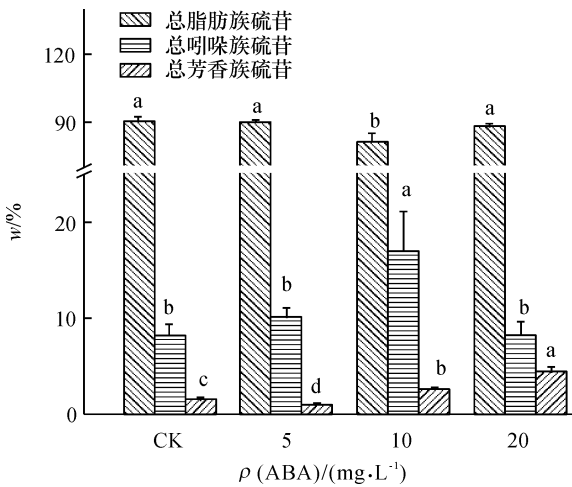
2.6 ABA 处理对小白菜地上部 3 类硫苷相对百分含量的影响

总脂肪族硫苷、吲哚族硫苷和芳香族硫苷占总硫苷比例如图 6 所示. ABA 处理对总脂肪族硫苷相对百分含量影响不大,仅 10 mg · L⁻¹ 的 ABA 使其降低了 11%. 不同质量浓度 ABA 处理下,总吲哚族硫苷相对百分含量呈先增后降趋势,在 10 mg · L⁻¹ 时吲哚族硫苷的相对百分含量达到最高,比对照增加 109%,这可能与此时脂肪族硫苷相对百分含量减少有关. 在 5 mg · L⁻¹ 的 ABA 处理时,芳香族硫苷相对百分含量所占比例有所下降,但随 ABA 质量浓度的增加又显著提

高,在 20 mg · L⁻¹ 的 ABA 处理时,比对照增加 195%.

2.7 ABA 处理对小白菜地上部单个硫苷相对百分含量的影响

不同质量浓度 ABA 处理对小白菜 7 种单个硫苷占总硫苷比例的影响见表 1. 较低质量浓度(5 mg · L⁻¹) ABA 处理时,5-甲基亚磺酰戊基硫苷相对百分含量并没有明显的变化,但较高质量浓度(10 和 20 mg · L⁻¹) ABA 处理时,5-甲基亚磺酰戊基硫苷相对百分含量显著增加. 3-丁烯基硫苷是小白菜地上部最主要的硫苷,不同浓度 ABA 处理下其相对百分含量没有显著变化. 然而,4-戊烯基硫苷相对百分含



同种硫苷之间,柱子上方凡具有一个相同小写英文字母者,表示经过 Duncan's 方差检验差异不显著 ($P>0.05$).

图 6 不同质量浓度 ABA 处理对总脂肪族、总吲哚族和芳香族硫苷相对百分含量的影响

Fig. 6 Effects of ABA with different concentrations on the composition of glucosinolates

表 1 不同质量浓度 ABA 处理对小白菜地上部单个硫苷相对总硫苷质量分数的影响¹⁾

Tab. 1 Effects of ABA treatments on the percentages of individual glucosinolates against total glucosinolate in pakchoi shoots

ρ (ABA)/ (mg · L ⁻¹)	5 - 甲基亚磺 酰戊基硫苷	3 - 丁烯 基硫苷	4 - 戊烯 基硫苷	吲哚 - 3 - 甲基硫苷	4 - 甲氧基吲哚 - 3 - 甲基硫苷	1 - 甲氧基吲哚 - 3 - 甲基硫苷	2 - 苯乙 基硫苷
CK	1.93 ± 0.21b	62.87 ± 4.66a	25.70 ± 4.95a	1.93 ± 0.46b	1.47 ± 0.21ab	4.66 ± 0.74b	1.43 ± 0.04c
5	2.04 ± 0.34b	71.07 ± 4.53a	16.07 ± 4.11b	2.50 ± 0.83ab	1.51 ± 0.23ab	5.97 ± 0.27b	0.83 ± 0.10d
10	3.54 ± 0.43a	59.57 ± 7.65a	17.57 ± 3.37ab	3.03 ± 0.57a	2.03 ± 0.70a	11.82 ± 3.16a	2.45 ± 0.23b
20	3.31 ± 0.85a	61.61 ± 1.32a	22.74 ± 2.13ab	2.02 ± 0.23ab	1.10 ± 0.24b	4.98 ± 0.97b	4.23 ± 0.20a

1) 表中数据为平均值 ± 标准差 ($n=3$); 同列数据后凡具有一个相同英文字母者,表示经过 Duncan's 检验差异不显著 ($P>0.05$).

3 讨论与结论

Moller 等^[8]在油菜 *Brassica campestris* 小孢子培养中发现,外源添加 ABA 对烯基脂肪族硫苷含量没有显著影响. 在本试验中发现,较低质量浓度 ($5\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) ABA 处理显著降低了 4 - 戊烯基硫苷含量,但对小白菜中另一种烯基硫苷 3 - 丁烯基硫苷含量没有影响. 然而,随着 ABA 质量浓度的增加,脂肪族硫苷含量除了 5 - 甲基亚磺酰基戊基硫苷以外都呈现下降趋势. 由于脂肪族硫苷是小白菜地上部最主要的硫苷,而且下降程度较大,使总硫苷含量有下降的趋势.

较低质量浓度 ($5\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) ABA 处理只显著提高了 1 - 甲氧基吲哚 - 3 - 甲基硫苷和总吲哚族硫苷含量. 而随 ABA 质量浓度增加,4 - 甲氧基吲哚 -

量有下降的趋势,尤其在 $5\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理时显著降低了 4 - 戊烯基硫苷相对百分含量,与对照相比减少了 37%.

随 ABA 处理浓度的增加,吲哚 - 3 - 甲基硫苷相对百分含量呈先增加后降低趋势,尤其在 $10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理时比对照增加 57%. 4 - 甲氧基吲哚 - 3 - 甲基硫苷相对百分含量在 $10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 处理时达到最大值,与对照相比增加 38%. 然而随着 ABA 处理浓度增加,其相对百分含量迅速降低并低于对照水平. 在不同浓度 ABA 处理下,1 - 甲氧基吲哚 - 3 - 甲基硫苷相对百分含量变化趋势与 4 - 甲氧基吲哚 - 3 - 甲基硫苷相似,在 $10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理时达到最大值,与对照相比增加了 153%,然后迅速降低至与对照水平相当. 在 $5\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理时,2 - 苯乙基硫苷相对百分含量与对照相比降低了 42%,但随着 ABA 处理浓度增加,2 - 苯乙基硫苷相对百分含量又迅速升高,并在 $20\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 处理时达到最大值,比对照增加近 2 倍.

3 - 甲基硫苷含量随 ABA 质量增加呈现下降趋势,1 - 甲氧基吲哚 - 3 - 甲基硫苷含量和总吲哚族硫苷含量都呈先增加后降低的趋势. Moller 等^[8]发现供应 $15\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 减少了吲哚族硫苷含量. 然而, Bodnaryk^[9]报道外源 ABA 对植株吲哚族硫苷含量没有影响. 这可能是由于试验作物的不同,但也说明了 ABA 对吲哚族硫苷诱导作用具有浓度效应.

脱落酸与茉莉酸在结构上有相似之处,在生理效应上也有许多相似的地方,如促进气孔关闭、叶片脱落等^[4]. 研究发现,茉莉酸能显著诱导吲哚族硫苷的合成^[10]. 另外, Doughty 等^[4]报道用不同浓度茉莉酸甲酯处理油菜,显著诱导了吲哚族硫苷的累积,并且对 1 - 甲氧基吲哚 - 3 - 甲基硫苷含量的影响比对照吲哚 - 3 - 甲基硫苷含量的影响更明显. 与此结果类似,本试验也发现不同质量浓度 ABA 处理提高了吲

噻族硫苷的含量。10 mg · L⁻¹的 ABA 处理使总噻族硫苷和 1-甲氧基噻-3-甲基硫苷含量显著提高,对噻-3-甲基硫苷含量则没有显著影响。而 ABA 处理对单个噻族硫苷具有的这种选择性累积效应类似于机械伤害或油菜蓝跳甲 *Altica cyanea* 的噬咬^[11-12]。这些信号物质选择性诱导单个噻族硫苷的累积,也说明了这些硫苷具有不同的调控途径。

2-苯乙基硫苷的水解产物是苯乙基异硫脲酸酯,被认为具有降低致癌物质活性的作用。外源水杨酸处理油菜,显著诱导了 2-苯乙基硫苷的合成^[13]。Smetanska 等^[14]在芜菁 *Brassica rapa* 中报道外源供应水杨酸和茉莉酸均显著诱导了 2-苯乙基硫苷含量的提高。这是由于水杨酸和茉莉酸诱导了控制 2-苯乙基硫苷合成基因 *CYP79A2* 的表达^[10]。本试验中,20 mg · L⁻¹的 ABA 处理显著诱导了 2-苯乙基硫苷的合成。ABA 在植物防御反应中可能是独立的信号分子,也可能通过与水杨酸、茉莉酸和乙烯所调控的生物胁迫信号传导途径互作,共同调控植物的防御信号^[15]。

ABA 对植物防御的调控较复杂,既有正向调控,也有负向调控,对小白菜 3 类硫苷有不同的调控作用。ABA 对小白菜脂肪族硫苷含量为负调控作用,但对噻族硫苷和芳香族硫苷含量具有正向调控的作用,并具有一定的浓度效应。

参考文献:

- [1] VERHOEVEN D T, VERHAGEN H, GOLDBOHN R A, et al. A review of mechanisms underlying anticarcinogenicity by brassica vegetables[J]. *Chem-biol interact*, 1997, 103(2): 79-129.
- [2] HALKIER B A, GERSHENZON J. Biology and biochemistry of glucosinolates[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2006, 57:303-333.
- [3] HU Keling, ZHU Zhujun, ZANG Yunxiang, et al. Accumulation of glucosinolates and nutrients in pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis*) two cultivar plants exposed to sulfur deficiency[J]. *Hortic, Environ Biotechnol*, 2011, 52(2):121-127.
- [4] DOUGHTY K J, KIDDLE G A, PYE B J, et al. Selective induction of glucosinolates in oilseed rape leaves with methyl jasmonate[J]. *Phytochemistry*, 1995, 38(2): 347-350.
- [5] FUJITA M, FUJITA Y, NOUTOSHI Y, et al. Crosstalk between abiotic and biotic stress responses: A current view from the points of convergence in the stress signaling networks[J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2006, 9(4):436-442.
- [6] KRUMBEIN A, SCHONHOF I, SCHREINER M. Composition and contents of phytochemicals (glucosinolates, carotenoids and chlorophylls) and ascorbic acid in selected *Brassica* species (*B. juncea*, *B. rapa* subsp. *nipposinica* var. *chinoleifera*, *B. rapa* subsp. *chinensis* and *B. rapa* subsp. *rapa*)[J]. *J Appl Bot Food Qual*, 2005, 79(3): 168-174.
- [7] 陈新娟,朱祝军,钱琼秋,等. 硫苷的提取、分离和鉴定[J]. *中国食品学报*, 2007, 7(3):43-48.
- [8] MOLLER S C, NEHLIN L, GLIMELIUS K, et al. Influence of in vitro culture conditions on glucosinolate composition of microspore-derived embryos of *Brassica napus* [J]. *Physiol Plantarum*, 1999, 107(4):441-446.
- [9] BODNARYK R P. Potent effect of jasmonates on indole glucosinolates in oilseed rape and mustard [J]. *Phytochemistry*, 1994, 35(2):301-305.
- [10] MIKKELSEN M D, PETERSEN B L, GLAWISCHNIG E, et al. Modulation of CYP79 Genes and Glucosinolate Profiles in *Arabidopsis* by Defense Signaling Pathways[J]. *Plant Physiol*, 2003, 131(1):298-308.
- [11] KORITSAS V M, LEWIS J A, FENWICK G R. Glucosinolate responses of oilseed rape, mustard and kale to mechanical wounding and infestation by cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*) [J]. *Ann Appl Biol*, 1991, 118(1):209-221.
- [12] BODNARYK R P. Effects of wounding on glucosinolates in the cotyledons of oilseed rape and mustard [J]. *Phytochemistry*, 1992, 31(8):2671-267.
- [13] KIDDLE G A, DOUGHTY K J, WALLSGROVE R M. Salicylic acid-induced accumulation of glucosinolates in oilseed rape (*Brassica napus*) leaves [J]. *J Exp Bot*, 1994, 45(9):1343-1346.
- [14] SMETANSKA B I, KRUMBEIN A, SCHREINER M, et al. Influence of salicylic acid and methyl jasmonate on glucosinolate levels in turnip [J]. *J Hortic Sci Biotech*, 2007, 82(5):690-694.
- [15] BARI R, JONES J D G. Role of plant hormones in plant defence responses [J]. *Plant Mol Biol*, 2009, 69(4): 473-488.

【责任编辑 李晓卉】