



干旱胁迫对黄芪植株生长中 黄酮类成分积累的影响

李光跃, 罗晓雅, 孙窗舒, 于 倩, 陈贵林*

(内蒙古大学 生命科学学院, 内蒙古自治区中蒙药材规范化生产工程技术研究中心, 呼和浩特 010021)

摘 要:以 3 年生蒙古黄芪植株为材料, 采用盆栽法模拟干旱处理, 研究水分胁迫对黄芪生理状态以及其根、茎、叶中毛蕊异黄酮、毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花素和芒柄花苷 4 种黄酮类化合物含量的影响。结果显示: (1) 毛蕊异黄酮和毛蕊异黄酮葡萄糖苷在黄芪根、茎、叶均有分布, 不同器官的毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量表现为根>叶>茎, 而毛蕊异黄酮含量则是叶>茎>根。 (2) 干旱胁迫下, 黄芪根中毛蕊异黄酮葡萄糖苷和芒柄花苷在胁迫第 8~12 天有一定的积累; 叶中的毛蕊异黄酮则在干旱第 4~8 天有明显的积累, 而毛蕊异黄酮葡萄糖苷则没有明显变化。研究发现, 4 种黄酮类化合物在黄芪各器官中分布和含量不尽相同, 同一器官中不同黄酮类化合物对于干旱胁迫的响应规律也存在差异; 适度的干旱胁迫能够促进黄芪毛蕊异黄酮葡萄糖苷的积累, 但过度干旱胁迫则不利于其积累。

关键词:干旱胁迫; 黄芪; 不同器官; 超高效液相色谱; 黄酮类化合物

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

Effects of Progressive Drought Stress on the Accumulation of Flavonoids in the Growth of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao

LI Guangyue, LUO Xiaoya, SUN Chuangshu, YU Qian, CHEN Guilin*

(College of Life Science, The Good Agriculture Practice Engineering Technology Research Center of Chinese and Mongolia Medicine in Inner Mongolia, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: The dynamic of physiological state and contents of 4 flavonoids (calycosin, calycosin-7-o- β -D-glucoside, formononetin and ononin) in roots, stems and leaves were studied with the triennial *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao, under the continuous drought stress, by pot culture simulated drought conditions, at greenhouse in Inner Mongolia University. The result shows that: (1) calycosin and calycosin-7-o- β -D-glucoside are distributed and obvious difference in the three different parts, which the content of calycosin was leaf > stem > root, but the calycosin-7-o- β -D-glucoside was root > leaf > stem. (2) The response of the four flavonoids in the same organ under drought stress were different. The contents of calycosin-7-o- β -D-glucoside and ononin were increased during 8—12 d and then decreased in roots under drought stress. It is interested that the contents of calycosin was accumulated during 4—8 d, but calycosin-7-o- β -D-glucoside has few changes. Those results indicated that the con-

收稿日期: 2016-09-21; 修改稿收到日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(81660630); 内蒙古自然科学基金(2014MS0308)

作者简介: 李光跃(1992—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事黄芪抗旱生理研究。E-mail: guangyuel@163.com

* 通信作者: 陈贵林, 博士, 教授, 主要从事药用植物化学研究。E-mail: guilincheng61@163.com

tents and distributions of four kinds of flavonoids are diverse in different organs, and the response to drought stress is difference in the same organ. The moderate drought stress improved and severe drought stress would have a negative effect on the accumulation of flavonoids in *A. membranaceus* var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao.

Key words: drought stress; *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao; different organs; UPLC; flavonoids

水分缺乏会严重影响植物的生长发育过程,导致农作物大幅减产^[1]。中国北方地区的干旱半干旱区约占全国面积的 39%,干旱胁迫成为当地作物生产面临的主要问题之一^[2]。干旱胁迫大多会导致植物形态矮小,气孔关闭、光合作用受到抑制,次生代谢活跃,控制植物损伤和修复的作用^[3]。植物体内次生代谢产物的积累与外界环境的变化相关^[4],当植物面临如干旱、高温、紫外辐射、盐或重金属等非生物胁迫时,体内部分代谢通路可能被激活,从而影响代谢产物的积累^[5]。黄酮类化合物是植物主要的次生代谢产物之一,在植物应对非生物胁迫方面具有重要作用^[6]。如在蝇子草属植物(*Silene litorea*)中,其花青素的积累受环境因子的影响较大,在不同环境中含量有所差异,而且在花瓣、花萼和叶片中含量亦不相同^[7];在藜麦(*Chenopodium quinoa*)的抗旱研究中,其黄酮类化合物和皂苷大量积累,增加了约 26.27%^[8];对海岸松(*Pinus pinaster*)的干旱研究表明,黄酮类化合物含量在不同器官中存在显著差异,且代谢物在根中的变化幅度要显著高于其他器官^[9]。因此,黄酮类化合物的积累有助于植物在环境胁迫下发挥解毒作用,并且具有物种及组织差异性。

蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao] 为豆科多年生草本植物,是一味常用的大宗药材,而内蒙古自治区为中国黄芪主产地之一^[10]。目前对黄芪的研究较为广泛,如干旱胁迫下黄芪主要抗氧化酶类的变化,部分糖类、氨基酸等的代谢调控及总黄酮含量的变化等^[11-13]。但对于干旱胁迫下黄芪植株不同器官主要黄酮类化合物的积累规律鲜有报道。本试验以 3 年生蒙古黄芪植株为试验材料,采用盆栽模拟干旱胁迫实验来探究干旱胁迫下黄芪植株 4 种黄酮类化合物(毛蕊异黄酮、毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花素、芒柄花苷)在根、茎和叶中的积累规律,为提高黄芪药用品质及资源的综合利用提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验的黄芪幼苗购置于锡林郭勒盟正蓝旗内

蒙古金绿源绿色工程有限责任公司,经内蒙古大学陈贵林教授鉴定为蒙古黄芪,于 2014 年 4 月 10 日以相同规格花盆(上口直径 17 cm,底面直径 12 cm,高 25 cm),内装 5 kg 普通农田土,每盆定植 5 株,于内蒙古大学温室进行正常管理(每周浇水 2~3 次)。

1.2 试验处理

2015 年 5 月 3 日选取长势一致、无病害的 3 年生蒙古黄芪植株共 84 盆移至防雨棚进行试验,处理组(DS)和对照组(CK)各 42 盆。6 月 11 日进行干旱胁迫处理,处理组饱和浇水后持续干旱处理,对照组正常浇水。花盆位置随机摆放。干旱胁迫处理过程中每 4 d 取样 1 次,第 16 天取样完成后,进行复水处理,7 d 后取样,于 7 月 3 日结束试验。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 土壤含水量 采用烘干法测定^[14]。先将取样用的空铝盒烘干称重(W_0),然后取各处理黄芪的新鲜土样置铝盒中一起称重(W_1),随后立即将带土铝盒放入(105 ± 2)℃烘箱中烘至恒重,移到真空干燥器中,冷却至室温,称重(W_2),重复 6 次。土壤含水量(%) = $[(W_1 - W_2) / (W_2 - W_0)] \times 100\%$ 。

1.3.2 叶片相对含水量 采用饱和称重法测定。选择距茎尖 5 片叶位的叶片,测定鲜重(FW);将叶基部置于水中,在 4℃黑暗条件下使其饱和吸水 24 h,测定饱和重量(TW);之后在烘箱中 60℃烘干至恒重,测定干重(DW),重复 6 次。叶片相对含水量(%) = $[(FW - DW) / (TW - FW)] \times 100\%$ 。

1.3.3 生物量 将植株从盆中取出,并用自来水将泥土冲洗干净,水分沥干后再将植株迅速装入自封袋,置于冰盒中,迅速带回实验室,清洗,吸干水分,置烘箱中 105℃下杀青 10 min,65℃下烘干至恒重^[15],将整株取出,分为地上和地下两部分测量单株干重(g/株)。

1.3.4 根、茎、叶黄酮类化合物的提取及测定 (1) 供试品溶液制备:将黄芪根、茎、叶分别粉碎,过 65 目筛。取 0.5 g 根(茎或叶)粉末,用 50 mL 甲醇 70℃回流提取 4 h,冷却至室温后,称重补足甲醇,过滤,取 25 mL 滤液,减压浓缩蒸干,再用甲醇重新溶解并定容至 5 mL,置于 4℃冰箱待测^[10]。(2) 色谱

条件选择:所用仪器为 UPLC(Waters 公司),PDA 检测器,色谱柱为 ACQUITY UPLC® BEH Shield RP18(2.1×100 mm,1.7 μm)。流动相为乙腈(A),0.2%甲酸水(B),流速为 0.2 mL/ min,梯度洗脱 v/v(0~2 min,25% A;2~4 min,25%~35% A;4~6 min,35%~45% A;6~8 min,45%~50% A;8~10 min,50%~60% A;10~12 min,60%~25% A)。柱温为 30 ℃,进样量为 2 μL,检测波长为 260 nm。(3) 样品中 4 种黄酮类成分测定:将上述所得供试品溶液过 0.22 μm 滤膜,按所述色谱条件,测定 CK 和 DS 组黄芪植株根、茎、叶中 4 种黄酮类成分毛蕊异黄酮、毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花素和芒柄花苷的含量,每个处理重复 3 次。

1.4 数据处理

Excel 和 SPSS 19.0 软件进行统计分析,用 Duncan 法进行处理间差异显著性检验(LSD)。

2 结果与分析

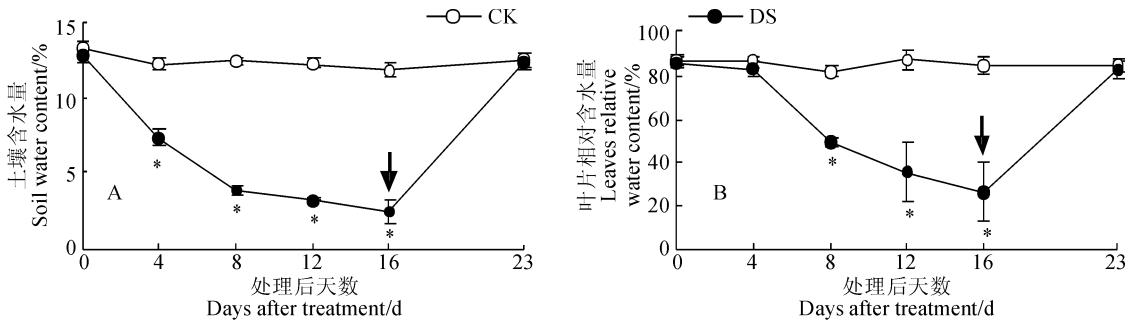
2.1 干旱胁迫下土壤含水量及黄芪叶片相对含水量的变化

按照 Hsiao 对于干旱程度的划分标准,本试验

在持续胁迫后 4 d 达到轻度胁迫,8 d 为中度胁迫,12~16 d 为重度胁迫^[16]。由图 1 可以看出,随着干旱处理时间的延长,处理组(DS)土壤含水量持续降低,由胁迫前的 12.82%降到胁迫 16 d 时的 2.39%,复水 1 周后恢复到正常状态;而对照组(CK)的土壤含水量始终变化不大。同时,黄芪叶片相对含水量在干旱胁迫后 0~4 d 内变化不大,在第 4 天之后则迅速下降,在第 16 天降低至 26.44%,复水后恢复正常;而对照组叶片相对含水量则没有显著变化。

2.2 干旱胁迫对黄芪植株生物量的影响

图 2 显示,对照组和干旱胁迫组黄芪植株根系生物量随处理时间均始终变化不大,且同期两者之间也没有明显差异;黄芪植株地上部生物量在正常水分(对照组)下随处理时间则呈现缓慢上升趋势,而在持续的干旱处理过程中则呈现下降趋势,且干旱胁迫组和对照组间差异随着处理时间逐渐加大,并在处理 12~23 d 间差异达到显著水平。黄芪处理组地上部生物量下降可能是干旱胁迫使得植物呼吸消耗增加、干物质量减少所致。即干旱胁迫明显抑制了黄芪植株地上部生物量积累,而对其根系生物量无明显影响。



CK 和 DS 分别表示对照组和干旱处理组;箭头表示开始复水时间; * 表示同期处理与对照在 0.05 水平存在显著差异;下同。

图 1 干旱胁迫下盆栽土壤含水量(A)及叶片相对含水量(B)

The CK and DS represent the control and drought stress groups, respectively; Arrow stands for the stage of rewatering; * indicates the same period of treatment and control were significantly different at the 0.05 level; The same as below

Fig. 1 Soil water content in pot(A) and relative water content of leaves(B) under drought stress

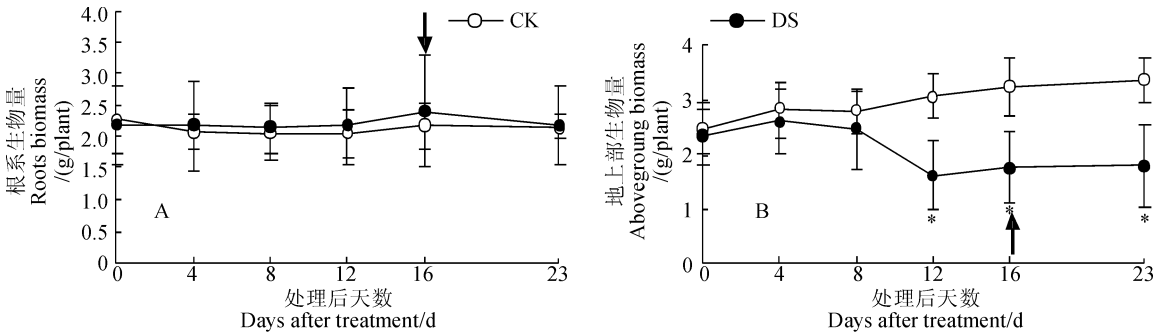


图 2 干旱胁迫对黄芪生物量的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on the biomass of *A. membranaceus* var. *mongholicus*

2.3 干旱胁迫对黄芪植株 4 种黄酮类化合物含量的影响

4 种黄酮类化合物在黄芪根中均有分布(图 3)。其中,芒柄花苷的含量随着干旱处理时间的延长呈现先增加后降低的变化趋势,至第 12 天达到积累最高值(0.29 mg/g),并在第 4、12 天显著高于对照(图 3,A);而芒柄花素在干旱胁迫期间呈现波动下降趋势,在胁迫第 4~8 天的过程中含量明显下降,而在第 8~12 天又呈现增长的趋势,随后又降低,并在第 4、12、23 天显著高于对照(图 3,B);根中毛蕊异黄酮含量在整个干旱期间都处于持续降低的状态,并在第 4、16、23 天显著高于对照(图 3,C);根中毛蕊异黄酮葡萄糖苷的含量变化与毛蕊异黄酮不同,在干旱胁迫第 8~12 天有显著的增长趋势,并在第 12 天达到了干旱期间的最高值(0.71 mg/g),并在第 12、16、23 天显著高于对照(图 3,D)。同时,黄芪对照组根中 4 种黄酮类化合物含量在整个处理过程中基本维持稳定。这些结果表明,干旱胁迫下黄芪根中黄酮苷随干旱胁迫的增加有一定的积累效应,这可能是由于黄酮苷类物质的积累可促进糖的转运,以减缓干旱胁迫压力。

与黄芪根中不同,在同样的检测条件下,黄芪茎和叶均没有检测到芒柄花苷和芒柄花素。首先,黄芪茎中毛蕊异黄酮和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量在干旱胁迫过程中的变化趋势相似,表现出降-升-降波

动变化趋势,且波动幅度较大,除干旱处理第 4 天外,与对照同期相比并无明显差异(图 4,A、B)。这可能是由于茎在植物生理中主要起运输作用导致的。其次,黄芪叶中毛蕊异黄酮含量在干旱胁迫第 0~8 天呈现增长的趋势,其在第 4、8 天显著高于对照,并在第 8 天达到最大积累量(1.43 mg/g),比对照显著增加 86.9%,但随着干旱时间的延长又明显下降(图 4,C);叶片中毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量虽然也存在降-升-降波动变化趋势,但始终与对照组差异不明显,而其在复水一周后迅速下降并显著低于对照(图 4,D)。这可能是因为叶片是主要的光合作用场所,为了维持细胞的氧化稳定性从而导致毛蕊异黄酮含量的增加。同时,在正常水分条件下,黄芪茎和叶中毛蕊异黄酮和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量基本维持稳定。

3 讨论

干旱能引起植物体内水分匮乏,从而导致一系列生理生化指标的变化,最终导致植物生长受到限制。在这过程中伴随着植物体内次生代谢产物的变化。冬小麦品种‘Aikang 58’和‘Chinese Spring’进行干旱胁迫处理后,叶片中与黄酮类化合物合成相关的基因表达上调,并且总黄酮含量和花青素含量积累水平均有所增加^[17]。对干旱荒漠植物红砂的 *RsF3H*(红砂中特有的黄酮类化合物合成关键酶)基

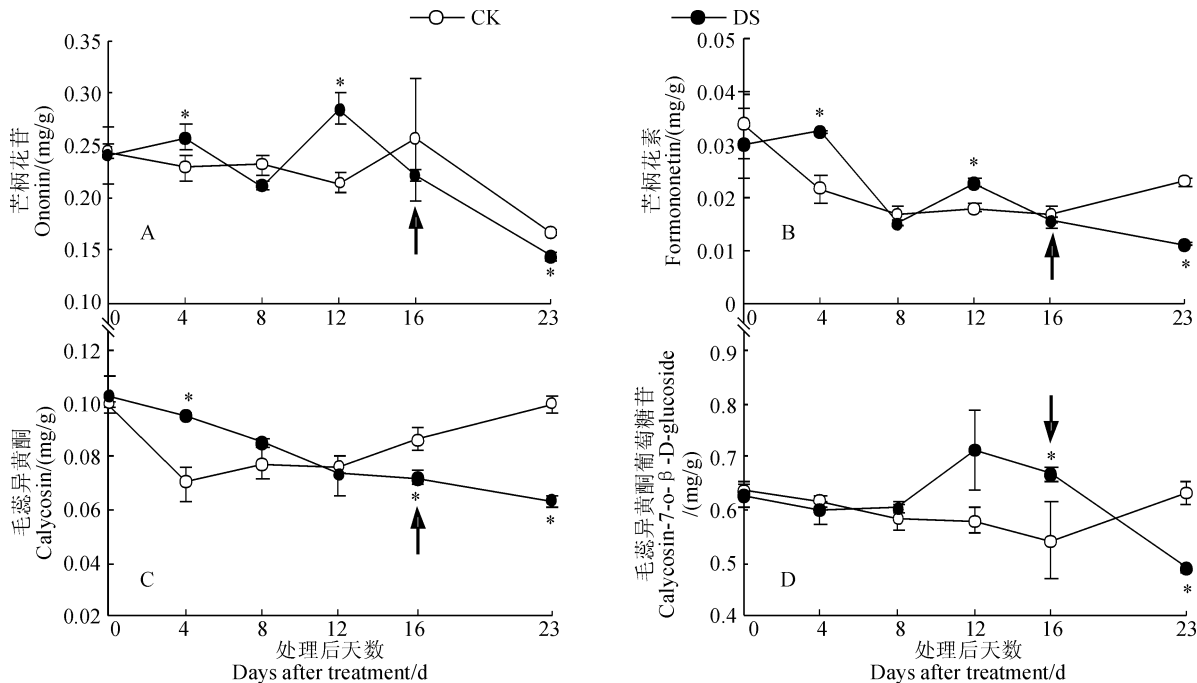


图 3 干旱胁迫对黄芪根中黄酮类物质含量的影响

Fig. 3 Effect of drought stress on the contents of flavonoids in roots of *A. membranaceus* var. *mongholicus*

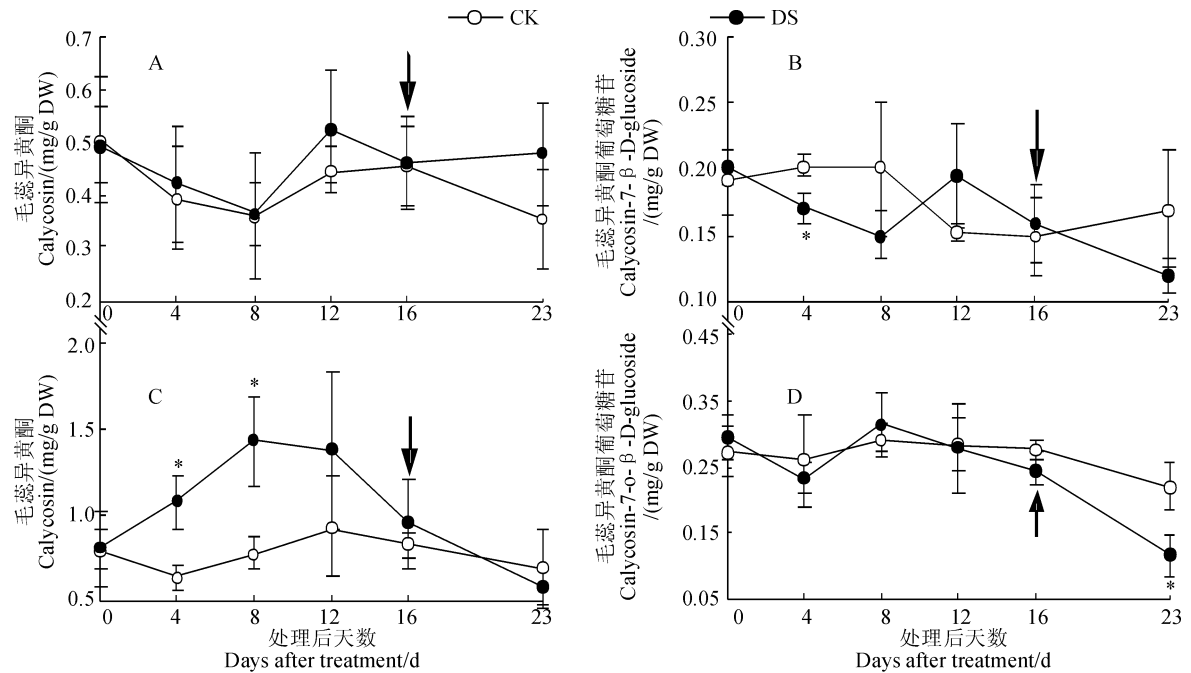


图 4 干旱胁迫对黄芪茎(A、B)和叶(C、D)中毛蕊异黄酮葡萄糖苷和毛蕊异黄酮含量的影响

Fig. 4 Effect of drought stress on the contents of calycosin-7-O-β-D-glucoside and calycosin in stems(A,B) and leaves(C,D) of *A. membranaceus* var. *mongholicus*

因进行干旱诱导,发现黄酮类化合物(总黄酮和花青素)的积累量增加^[18]。这说明黄酮类化合物在植物抗逆中具有重要作用。本试验中,随着干旱胁迫程度的增加,根中的毛蕊异黄酮含量呈现下降趋势,而毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量呈现先增加后下降的趋势,这与梁建萍等^[19]的结果相类似。这种现象的产生可能是由于毛蕊异黄酮葡萄糖苷具有较强的抗氧化活性导致的,同时在黄芪冷胁迫的研究中发现,毛蕊异黄酮葡萄糖苷在植株体内具有较强的抗氧化活性^[20]。叶片是光合作用的主要场所,干旱胁迫导致活性氧含量增加,植株可通过降低类胡萝卜素含量来清除叶绿体中的活性氧,维持膜质稳定性。本试验中黄芪植株叶片毛蕊异黄酮含量先增加后降低,于第8天达到最大值,比对照增加86.9%,这可能是由于植株通过黄酮类化合物的抗氧化性来维持其细胞稳定性。这些都说明干旱胁迫对黄芪黄酮类成分具有一定的调控作用,且同一器官中不同的黄酮类化合物对干旱的响应具有差异。同时,已有研究表明干旱胁迫同样会引起黄芪植株中活性氧的大量积累^[12],因此黄酮类化合物作为一种非酶抗氧化剂对植物应对干旱胁迫的具体生理过程仍有待于进一步研究。

本研究对黄芪不同器官间毛蕊异黄酮葡萄糖苷和毛蕊异黄酮含量进行比较发现,根、茎和叶中黄酮类成分的积累存在显著差异,根中毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量显著高于茎和叶,而毛蕊异黄酮则在叶中含量最高,茎和根中次之,这与 Kim 等^[21]的研究结果一致;而茎和叶中没有检测到芒柄花素和芒柄花苷这2种黄酮类物质,可能是由于在毛蕊异黄酮的代谢途径中,芒柄花素位于毛蕊异黄酮的上游,茎和叶大量合成毛蕊异黄酮从而导致芒柄花素和芒柄花苷在同样的检测条件下未被检测到。这进一步证实了黄酮类化合物的积累在植物不同器官间具有差异性。同时,在正常的生理条件下,毛蕊异黄酮葡萄糖苷合成的关键基因表达量与主要的积累部位并不一致,叶中参与合成毛蕊异黄酮葡萄糖苷的相关基因表达量要显著高于茎和根^[21-22]。本试验结果显示,干旱处理的第4~12天,黄芪叶中毛蕊异黄酮含量积累较多,根中的毛蕊异黄酮葡萄糖苷在处理第8~12天有一定的积累,而茎中2种黄酮类化合物呈现波动的积累状态,这可能是干旱胁迫促进了叶片中合成的毛蕊异黄酮被转运至根中,并合成毛蕊异黄酮葡萄糖苷,但也可能是由于不同器官对干旱的响应不同所致,具体原因亟待于进一步研究。

参考文献:

- [1] FAROOQ M, WAHID A, KOBAYASHI N, *et al.* Plant drought stress: effects, mechanisms and management [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, **29** (1): 185-212.
- [2] GENG Q L, WU P T, *et al.* Dry/wet climate zoning and delimitation of arid areas of Northwest China based on a data-driven fashion [J]. *Journal of Arid Land*, 2014, (3):47-58.
- [3] ZHU J K. Salt And drought stress signal transduction In plants [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2002. **53**(1): 247-273.
- [4] 黄林芳,李文涛,王 珍,等. 濒危高原植物羌活化学成分与生态因子的相关性 [J]. 生态学报,2013,**33**(24): 7 667-7 678. HUANG L F, LI W T, WANG Z, *et al.* Correlative study between chemical constituents and ecological factors of *Notopterygii Rhizoma* Et Radix of endangered plate au plant [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,**33**(24): 7 667-7 678.
- [5] RAMAKRIISHNA A, RAVISHANKAR G A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants[J]. *Plant signaling & behavior*, 2011,**6**(11):1 720-1 731.
- [6] KOOTSTRA A. Protection from UV-B-induced DNA damage by flavonoids[J]. *Plant Molecular Biology*, 1994, **26** (2): 771-774.
- [7] DEL V J C, BUIDE M L, CASIMIO-SORIGUER I, *et al.* On flavonoid accumulation in different plant parts: variation patterns among individuals and populations in the shore campion (*Silene littorea*) [J]. *Front Plant Sci.*, 2015, **6**:1-13.
- [8] ANA M G-C, GIOVANNA I, ANTONELLA L, *et al.* Phenolic compounds and saponins in quinoa samples (*Chenopodium quinoa* Willd.) grown under different saline and nonsaline irrigation regimens [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, **60**(18):4 620-4 627.
- [9] MARINA D M, ANGELES G M, DAVID S G, *et al.* Organ-specific metabolic responses to drought in *Pinus pinaster* Ait [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016,102:17-26.
- [10] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2010: 283-285.
- [11] 韩 凯,梁宗锁,段琦梅. 水分胁迫对蒙古黄芪生理特性的影响 [J]. 西北农业学报,2010,**19**(5):100-104. HAN K, LIANG Z S, DUAN Q M. Physiological characteristics of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao under water stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010,**19**(5):100-104.
- [12] JIA X, SUN C S, LI G Y, *et al.* Effects of progressive drought stress on the physiology, antioxidative enzymes and secondary metabolites of radix astragali [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, **37**(12):1-14.
- [13] JIA X, SUN C S, ZUO R C, *et al.* Integrating transcriptomics and metabolomics to characterise the response of *Astragalus membranaceus* Bge. var. *mongolicus* (Bge.) to progressive drought stress [J]. *BMC Genomics*, 2016, **17** (188): 1-16.
- [14] 刘 艳,陈贵林,蔡贵芳,等. 干旱胁迫对甘草幼苗生长和渗透调节物质含量的影响 [J]. 西北植物学报,2011,**31**(11): 119-124. LIU Y, CHEN G L, CAI G F, *et al.* Growth and osmoregulation substances accumulation of *Glycyrrhiza uralensis* seedling under drought stress [J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2011,**31**(11):119-124.
- [15] 李国斌,李光跃,等. 干旱胁迫对蒙古黄芪生物量及其根际微生物种群数量的影响[J]. 西北植物学报,2015,**35**(9):1 868-1 874. LI G B, LI G Y, *et al.* Rhizosphere microbe quantity and biomass accumulation of *Astragalus mongholicus* under drought stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2015,**35**(9):1 868-1 874.
- [16] HSIAO T C. Plant responses to water stress [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1973,24:519-570.
- [17] MA D Y, SUN D X, WANG C Y, *et al.* Expression of flavonoid biosynthesis genes and accumulation of flavonoid in wheat leaves in response to drought stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, **80**: 60-66.
- [18] LIUA M, LI X R, LIUA Y. Regulation of flavanone 3-hydroxylase gene involved in the flavonoid biosynthesis pathway in response to UV-B radiation and drought stress in the desert plant, *Reaumuria soongorica* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, **73**: 161-167.
- [19] 梁建萍,贾小云,刘亚令,等. 干旱胁迫对蒙古黄芪生长及根部次生代谢物含量的影响 [J]. 生态学报,2016,**36**(14): 4 415-4 422. LIANG J P, JIA X Y, LIU Y L, *et al.* Effects of drought stress on seedling growth and accumulation of secondary metabolites in the roots of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36** (14): 4 415-4 422.
- [20] PAN H Y, LI X B, CHENG X W, *et al.* Evidence of calycosin-7-O-d-glucoside's role as a major antioxidant molecule of *Astragalus membranaceus* Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao plants under freezing stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, **109**: 1-11.
- [21] KIM Y B, THWE A A, LI X H, *et al.* Accumulation of flavonoids and related gene expressions in different organs of *Astragalus membranaceus* Bge [J]. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 2014, **173**: 2 076-2 085.
- [22] CHEN J, WU X T, XU Y Q, *et al.* Global transcriptome analysis profiles metabolic pathways in traditional herb *Astragalus membranaceus* Bge. var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao [J]. *BMC Genomics*, 2014, **16**:1-20.

(编辑:裴阿卫)