

## 不同水分梯度下垂盆草生长发育、品质及抗氧化活性关系研究

杨金凤, 郭巧生, 朱再标\*, 张文霞, 陈珊珊, 苏登科

南京农业大学 中药材研究所, 江苏 南京 210095

**摘要:**目的 研究水分对垂盆草生长发育、有效成分积累及体外抗氧化能力的影响, 探索高产优质垂盆草的水分条件。方法 设置 5 个水分处理, 分别为田间持水量的 15%~20% (S1)、35%~40% (S2)、55%~60% (S3)、75%~80% (S4)、95%~100% (S5), 收获时测定生长指标、产量、多种活性成分含量及多种体外抗氧化能力。结果 S4 处理显著提高垂盆草最大分枝长、叶片层数、分枝数, 而 S1 处理导致植株生长受抑。总黄酮含量以 S4 处理最高, S3 处理次之, S5 处理最低。总酚含量以 S3 处理最高, 但与 S4 处理无显著差异。各处理槲皮素、山柰素、异鼠李素及三者总含量的差异达到显著水平, 均以 S1 处理最高, S4、S3 处理次之, S5 处理最低。S4 处理获得最高活性成分产量, S5 处理次之, S1 处理最低。垂盆草水提物清除 DPPH 自由基、抑制脂质过氧化能力 (TBARS 法) 及还原能力均以 S4 处理最强。抑制脂质过氧化能力与槲皮素含量、异鼠李素含量、3 种黄酮类成分总含量均呈显著正相关。结论 综合比较垂盆草药材产量、活性成分含量和抗氧化能力, 75%~80%田间持水量的土壤水分利于垂盆草高产优质兼得。

**关键词:** 垂盆草; 槲皮素; 山柰素; 异鼠李素; 总黄酮; TBARS 法; 槲皮素; 山柰素; 异鼠李素

中图分类号: R282.21 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2018)14-3382-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2018.14.026

## Relationship among growth, quality, and anti-oxidant activities of *Sedum sarmentosum* under different soil moisture

YANG Jin-feng, GUO Qiao-sheng, ZHU Zai-biao, ZHANG Wen-xia, CHEN Shan-shan, SU Deng-ke

Institute of Chinese Medicinal Materials, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

**Abstract: Objective** To explore the effect of soil moisture on growth, bioactivity compounds accumulation, and anti-oxidative activity of *Sedum sarmentosum*. **Methods** The changes of growth, yield, contents of total flavonoids, total phenolic, quercetin, kaempferol and isorhamnetin, and anti-oxidant activities were assessed in *S. sarmentosum* under five water gradient, namely 15%—20% FC (field capacity, S1), 35%—40% FC (S2), 55%—60% FC (S3), 75%—80% FC (S4), and 95%—100% FC (S5). **Results** S4 treatment greatly promoted the growth and yield while severe drought suppressed growth. The highest total flavonoids content was obtained in S4 treatment, while the lowest was found in S5 treatment. The total phenolic content in S3 treatment was the largest, but there was no significant difference comparing with S4 treatment. Meanwhile, the highest quercetin, kaempferol, and isorhamnetin content were obtained from S1, while S5 treatment showed the lowest values. Besides, the yield of three flavone ingredients per plant peaked in S4 treatment, followed by S5 treatment, and the S1 treatment resulted in the smallest yields. In addition, S4 treatment resulted in the highest anti-oxidant activities of the aqueous extracts based on DPPH, TBARS, and FRAP methods. There was a significantly positive relationship among the antioxidant activities of the aqueous extracts based on TBARS, contents of quercetin, isorhamnetin. **Conclusion** In summary, the results indicated that 75%—80% FC was the optimum soil moisture condition to achieve high yield and quality of *S. sarmentosum*.

**Key words:** *Sedum sarmentosum* Bunge; quercetin; kaempferol; isorhamnetin; total flavonoids; TBARS method; quercetin; kaempferol; isorhamnetin

垂盆草 *Sedum sarmentosum* Bunge 为景天科景天属多年生草本植物<sup>[1]</sup>。全草入药, 具利湿退黄、清热解毒功效, 用于治疗湿热黄疸、小便不利、痈肿疮疡<sup>[2]</sup>。垂盆草含有黄酮类、三萜类、生物碱类、

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (KYZ201734)

作者简介: 杨金凤 (1990—), 女, 河南南阳人, 硕士在读, 研究方向为药用植物栽培与生理。

\*通信作者 朱再标 Tel: (025)84395980 E-mail: zhuzaibiao@njau.edu.cn

甾萜等成分,是垂盆草颗粒、护肝宁片等多种中成药的主要原料,同时也可做汤、凉拌、炒食等,集药、食、观赏于一身,具有良好的开发价值与应用前景。

垂盆草的活性成分和抗氧化活性是影响其药用和保健功效的重要因素。目前关于垂盆草的研究集中在成分和药理方面<sup>[3-7]</sup>,栽培方面<sup>[8]</sup>也有一些报道,但环境条件对垂盆草药材品质及抗氧化活性影响的研究鲜见报道,因此加强垂盆草栽培生产薄弱环节的研究、提高管理水平,对实现垂盆草品质稳定可控尤为重要。本研究通过盆栽实验,比较不同水分处理下垂盆草生长、药材产量和有效成分含量等的差异,结合抗氧化活性评价,探索获得高产优质垂盆草的水分条件,为其栽培管理及进一步品质调控研究提供依据。

## 1 材料

材料栽培于南京农业大学中药材研究所试验大棚,经郭巧生教授鉴定为景天科景天属植物垂盆草 *S. sarmentosum* Bunge。

## 2 方法

试验于 2016 年 5~8 月在南京农业大学中药材研究所试验大棚中进行。选取健康、长势均一的垂盆草茎段(4 个茎节),去侧芽和顶芽,种植于塑料花盆(直径 15.0 cm,高 12.1 cm,底径 10.6 cm)中,每盆 10 株。实验用土为营养土-园土 1:3(体积比),盆中土壤质量为 1.000 kg。环刀法测得田间持水量为 38.13%。于 5 月 17 日浇透水于阴凉处缓苗 4 周,之后进行水分处理。设置 5 个水分梯度:土壤含水量分别为田间持水量的 15%~20%(S1)、35%~40%(S2)、55%~60%(S3)、75%~80%(S4)、95%~100%(S5),每个处理 15 盆。用称重补水法来控制水分,每隔 1 d 于 17:00~18:00 补水 1 次。随机排列,实验期间每周随机变换位置,以减少环境不均匀对其生长的影响。处理 60 d 后测定各项指标。

### 2.1 生长指标测定

每处理挑选 15 株具代表性的植株,直尺和游标卡尺测其最大分枝长、叶长、叶宽、茎粗,并记录分枝数、新生芽数、叶片层数。

### 2.2 生物量测定

收获时每个处理随机挑选 30 株,测定根长、鲜质量。然后将植株样品于 60 ℃烘干至恒定质量,称取干质量,之后粉碎过 3 号筛备用。

根冠比=地下干质量/地上干质量

折干率=干质量/鲜质量

单株有效成分产量=单株生物量×活性成分含量

## 2.3 化学成分指标测定

总黄酮含量测定时取样品粉末适量,按料液比 1:25 加入 50%乙醇,60 ℃超声提取 40 min,滤过,加 50%乙醇定容至 10 mL,以芦丁为对照品,采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法<sup>[9]</sup>测定 510 nm 波长处吸光度;总酚含量测定时取样品粉末适量加蒸馏水回流提取 2 h,滤液经旋转蒸发仪浓缩,用蒸馏水定容至 10 mL,以没食子酸为对照品,采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[10]</sup>测定;槲皮素、山柰素、异鼠李素含量参照《中国药典》2015 年版<sup>[2]</sup>HPLC 法测定。

## 2.4 体外抗氧化能力测定

将样品粉末加蒸馏水回流提取 2 h,滤液经旋转蒸发仪浓缩,用蒸馏水定容至 10 mL,置 4 ℃冰箱保存,测定抗氧化活性时稀释至 250 μg/mL。清除 DPPH 自由基能力测定<sup>[11]</sup>以 BHT 为对照,用清除自由基的百分比(RP)表示。

$$RP=1-(A_1-A_2)/A_0$$

$A_0$  代表水代替被测样品溶液的吸光度值, $A_1$  代表样品或 BHT 溶液的吸光度值, $A_2$  代表无水乙醇代替 DPPH 溶液的吸光度值

硫氰酸铁(FTC)法和硫代巴比妥酸反应物法(TBARS)参照 Kim 等<sup>[10]</sup>方法,其中 FTC 法 24、48 h 分别测定 1 次。铁还原能力(FRAP)法测定<sup>[11]</sup>以  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  浓度当量来表示还原能力大小,定义为 FRAP 值,其值越大,还原能力越强。

## 2.5 数据分析

数据采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 进行统计与分析,不同处理相同指标进行 Duncan 0.05 比较。不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 水分处理对垂盆草植株形态的影响

不同水分处理对垂盆草生长影响显著(表 1)。随着土壤水分含量升高,最大分枝长、叶宽、茎粗、叶片层数、分枝数、根长呈先升后降趋势;叶长、叶片长宽比、新生芽数呈升高趋势。其中,S4 处理下植株生长优势明显,最大分枝长、茎粗、叶片层数、分枝数、新生芽数比 S1 处理分别增加 3.35、1.88、2.70、4.97、25.44 倍,S5 处理次之,说明充足水分(田间持水量 75%~80%)能促进垂盆草

表 1 不同水分处理对垂盆草生长的影响 ( $\bar{x} \pm s, n = 15$ )Table 1 Effects of water treatments on growth indexes of *S. sarmentosum* ( $\bar{x} \pm s, n = 15$ )

| 处理 | 最大分枝长/cm     | 叶长/cm       | 叶宽/cm       | 叶片长宽比        | 茎粗/mm        | 叶片层数/层       | 分枝数/个        | 新生芽数/个       | 根长/mm         |
|----|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| S1 | 6.68±1.36 d  | 0.95±0.13 d | 0.48±0.05 d | 1.97±0.24 c  | 0.75±0.23 d  | 4.08±0.67 d  | 1.83±0.94 c  | 0.75±0.87 c  | 36.94±7.79 d  |
| S2 | 9.25±1.73 c  | 1.43±0.27 c | 0.60±0.08 c | 2.39±0.20 b  | 1.23±0.21 c  | 6.50±1.88 c  | 2.92±1.08 c  | 2.50±1.51 c  | 44.82±11.19 c |
| S3 | 22.07±3.48 b | 2.06±0.38 b | 0.78±0.12 b | 2.64±0.45 ab | 1.93±0.28 b  | 13.17±2.21 b | 8.92±2.43 b  | 11.00±3.30 b | 94.65±16.42 a |
| S4 | 29.06±3.08 a | 2.57±0.32 a | 0.96±0.08 a | 2.70±0.42 ab | 2.16±0.24 a  | 15.08±1.56 a | 10.92±2.31 a | 19.83±5.15 a | 92.00±16.88 a |
| S5 | 27.32±2.38 a | 2.64±0.43 a | 0.91±0.14 a | 2.93±0.53 a  | 2.02±0.25 ab | 14.75±1.76 a | 10.50±1.68 a | 23.08±8.93 a | 83.36±17.53 b |

同列不同小写字母表示差异显著,  $P < 0.05$ , 下同

Values in same column followed by lowercase letters represent significant differences at  $P < 0.05$ , same as below

生长,但更高的土壤含水量导致各生长指标下降。而 S1 处理垂盆草各项生长指标值最小,与 S3、S4、S5 处理各指标均差异显著;S1 处理与 S2 处理分枝数、新生芽数并无显著差异,其他指标差异显著。根长则以 S3 处理最长,其次是 S4 处理,二者未达到显著差异水平,但与其他处理差异显著,其中 S3 处理根长比 S1 处理增加 1.56 倍。在实验进行第 40 d 时,S1 处理(田间持水量 15%~20%)植株萎蔫,叶片极度卷曲发黄,植株枯萎、倒苗甚至部分植株出现死亡现象。

### 3.2 水分处理对垂盆草生物量的影响

从表 2 可以看出,随着土壤水分含量提高,垂盆草生物量大幅增加,呈先升后降趋势,各处理之

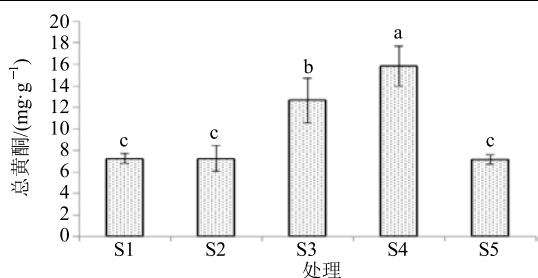
间差异达到显著水平。单株鲜质量、干质量以 S4 处理最佳,分别为 13.93、0.801 g,比 S1 处理增加 57.04 和 20.65 倍,比 S5 处理提高 18.65%和 13.14%。可见充足水分(75%~80%田间持水量)利于垂盆草生物量的积累,干旱胁迫会显著降低其生物量,但过于湿润的环境(95%~100%田间持水量)也会抑制其生长。随着土壤水分含量递减,根冠比、折干率呈大幅上升趋势,S1 处理根冠比和折干率达到最大值,显著大于其他处理。

### 3.3 水分处理对垂盆草化学成分含量的影响

不同水分处理对垂盆草总黄酮含量影响见图 1。随着土壤含水量升高,总黄酮含量呈现先升后降趋势,最高值出现在 S4 处理,达到 15.84 mg/g

表 2 不同水分处理对垂盆草生物量的影响 ( $\bar{x} \pm s, n = 30$ )Table 2 Effects of water treatments on biomass of *S. sarmentosum* ( $\bar{x} \pm s, n = 30$ )

| 处理 | 鲜质量/(g·株 <sup>-1</sup> ) | 干质量/(g·株 <sup>-1</sup> ) | 根冠比           | 折干率/%        |
|----|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|
| S1 | 0.24±0.08 d              | 0.037±0.011 d            | 0.344±0.090 a | 15.86±2.80 a |
| S2 | 0.95±0.26 d              | 0.068±0.019 d            | 0.233±0.074 b | 7.27±1.07 b  |
| S3 | 5.98±1.35 c              | 0.358±0.102 c            | 0.077±0.019 c | 6.02±1.21 c  |
| S4 | 13.93±3.04 a             | 0.801±0.189 a            | 0.049±0.012 d | 5.74±0.50 c  |
| S5 | 11.74±2.59 b             | 0.708±0.151 b            | 0.043±0.012 d | 6.05±0.39 c  |

图 1 不同水分处理对垂盆草总黄酮含量的影响 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )Fig. 1 Effects of water treatments on total flavonoids concentration of *S. sarmentosum* ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

比 S3 和 S5 处理分别提高 0.20 倍和 1.22 倍,3 个处理差异均达到显著水平。S5 处理总黄酮含量最低,与 S1、S2 处理无显著差异。不同土壤水分含量对垂盆草总酚含量有显著影响(图 2)。S3 处理总酚含量最高,为 23.31 mg/g, S4 处理(23.16 mg/g)次之,二者差异不显著。总酚含量最低的是 S2 处理,比 S3 处理降低 40.88%,且与 S5 处理无显著差异。结果表明 S3、S4 处理利于垂盆草总酚合成和积累。

不同水分处理对垂盆草槲皮素、山柰素、异鼠

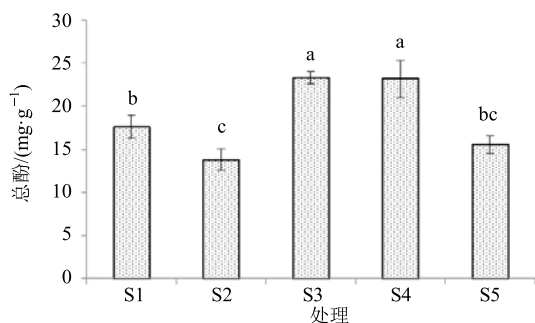


图 2 不同水分处理对垂盆草总酚含量的影响 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )  
Fig. 2 Effects of water treatments on total phenolic concentration of *S. sarmentosum* ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

李素含量影响见图 3。5 组处理的上述 3 种黄酮类成分总含量均达到《中国药典》2015 年版规定的含量标准 (不少于 0.10%)。随着土壤含水量升高, 山柰素含量呈降低趋势, 而槲皮素、异鼠李素及 3 种黄酮类成分总含量呈先降后升再降趋势。3 种黄酮类成分含量最高值均出现在 S1 处理, 其次为 S4 处理; 其中 S1 和 S4 处理槲皮素和异鼠李素含量没有显著差异, 但 S1 处理山柰素含量显著高于 S4 处理。S5 处理槲皮素、山柰素、异鼠李素含量均最低, 分别为 S1 处理的 64.86%、33.33% 和 77.78%。说明重度干旱胁迫 (15%~20% 田间持水量) 和适宜水分 (75%~80% 田间持水量) 均有助于垂盆草黄酮类成分积累。

不同水分处理对垂盆草单株有效成分产量影响见图 4。随着土壤含水量升高, 单株有效成分产量呈明显先升后降趋势, S4 处理达最大值, 单株槲皮素、山柰素、异鼠李素产量及三者总产量分别是 0.270、0.016、0.063、0.349 mg, 显著高于其他处理。S5 处理次之, S1 处理各成分产量最低。可见水分处理显著影响垂盆草有效成分产量, 充足水分 (75%~80% 田间持水量) 利于促进单株黄酮类

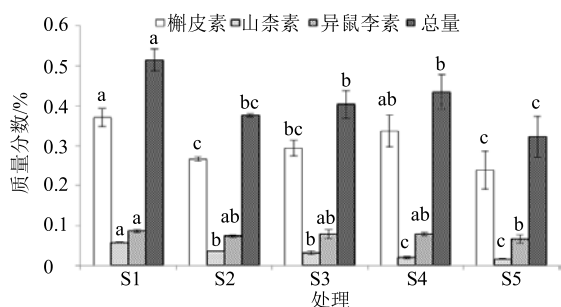


图 3 不同水分处理对垂盆草黄酮类成分含量的影响 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )  
Fig. 3 Effects of water treatments on contents of three flavone ingredients of *S. sarmentosum* ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

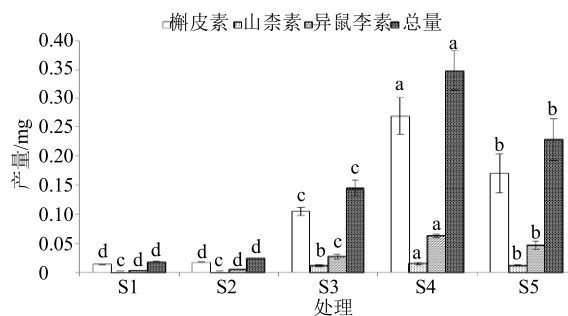


图 4 不同水分处理对垂盆草单株黄酮类成分产量的影响 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )  
Fig. 4 Effects of water treatments on yield of three flavone ingredients of *S. sarmentosum* ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

活性成分积累, 但进一步提高的土壤水分含量不利于其黄酮类活性成分积累; 严重干旱胁迫抑制其积累。

### 3.4 水分对垂盆草体外抗氧化活性的影响

不同水分处理的垂盆草水提物体外抗氧化活性具有较大差异 (表 3)。随着土壤含水量增加, 垂盆草水提物对 DPPH 自由基清除能力先降低后升高再降低。清除率以 S4 处理最大, 为 37.38%, 与 S1、S5、S3 处理无显著差异。S2 处理清除率最低, 但与 S1、S3、S5 处理无显著差异。5 组处理的 DPPH 清除作用均强于 BHT 对照组。

FTC 法测得的吸光度越小, 表示抗脂质过氧化能力越强。当亚油酸自氧化反应进行 24 h 时, 用硫氰酸铁检测脂质氧化形成的过氧化物, 发现 S1 和 S4 处理的吸光度显著高于对照 BHT, 而与其他处理差异不显著。亚油酸氧化反应进行 48 h 时, S1、S4 和 S5 处理的吸光度显著高于对照 BHT, 而与其他处理差异不显著。

TBARS 法测定的不同水分处理之间抑制脂质过氧化能力差异显著。抗氧化能力以 S1 处理最强, 抑制率达 53.96%, 比对照组高 31.32%, S5 处理最低, 比对照组低 25.60%。S1、S3 和 S4 处理之间没有显著差异。

FRAP 法测得的垂盆草还原能力以 S4 处理最强, 显著高于 S2、S3 和 S5 处理, 而与 S1 处理差异不显著; S2 处理最弱。各处理间还原能力强弱为 S4 处理 > S1 处理 > S3 处理 > S5 处理 > S2 处理。

### 3.5 垂盆草生物量、化学成分及抗氧化活性相关性分析

垂盆草生物量 (干质量)、化学成分及抗氧化活性相关性分析如表 4 所示。垂盆草生物量与总黄

表 3 不同水分处理对垂盆草水提物体外抗氧化活性的影响 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )Table 3 Effects of water treatments on *in vitro* anti-oxidant activities of *S. sarmentosum* aqueous extracts with different methods ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

| 处理  | DPPH 自由基清除率/%       | FTC 法-24 h 吸光度     | FTC 法-48 h 吸光度     | TBARS 法抑制率/%        | FRAP 值/( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |
|-----|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------------------|
| BHT | 18.63 $\pm$ 0.99 c  | 0.19 $\pm$ 0.04 b  | 0.15 $\pm$ 0.00 b  | 41.09 $\pm$ 2.81 bc | —                                              |
| S1  | 35.43 $\pm$ 2.16 ab | 0.23 $\pm$ 0.01 a  | 0.18 $\pm$ 0.01 a  | 53.96 $\pm$ 3.40 a  | 21.36 $\pm$ 2.40 ab                            |
| S2  | 34.13 $\pm$ 2.03 b  | 0.22 $\pm$ 0.00 ab | 0.17 $\pm$ 0.02 ab | 35.15 $\pm$ 5.05 cd | 7.80 $\pm$ 0.00 b                              |
| S3  | 35.97 $\pm$ 0.56 ab | 0.21 $\pm$ 0.01 ab | 0.18 $\pm$ 0.02 ab | 49.50 $\pm$ 5.94 ab | 15.43 $\pm$ 5.99 b                             |
| S4  | 37.38 $\pm$ 1.85 a  | 0.24 $\pm$ 0.00 a  | 0.19 $\pm$ 0.01 a  | 48.51 $\pm$ 4.09 ab | 34.93 $\pm$ 11.99 a                            |
| S5  | 35.64 $\pm$ 1.42 ab | 0.21 $\pm$ 0.01 ab | 0.18 $\pm$ 0.01 a  | 30.57 $\pm$ 3.68 d  | 11.19 $\pm$ 2.40 b                             |

同列不同小写字母表示差异显著,  $P<0.05$ ; S1、S2、S3、S4 和 S5 分别代表田间持水量的 15%~20%、35%~40%、55%~60%、75%~80%、95%~100%

Values in the same column followed by lowercase letters represent significant differences at  $P<0.05$ ; S1, S2, S3, S4, S5 indicate 15%—20% FC, 35%—40% FC, 55%—60% FC, 75%—80% FC, and 95%—100% FC, respectively

表 4 垂盆草生物量、成分含量及抗氧化活性的相关性分析 ( $n=5$ )Table 4 Correlation analysis of biomass, chemical composition, and anti-oxidant activities for *S. sarmentosum* ( $n=5$ )

| 项目         | 生物量    | 总酚     | 总黄酮    | 槲皮素     | 山柰素    | 异鼠李素    | 总含量    | DPPH 法 | TBARS 法 | FTC 法-24 h | FTC 法-48 h | FRAP 法 |
|------------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|------------|------------|--------|
| 生物量        | 1.000  |        |        |         |        |         |        |        |         |            |            |        |
| 总酚         | 0.428  | 1.000  |        |         |        |         |        |        |         |            |            |        |
| 总黄酮        | 0.576  | 0.909* | 1.000  |         |        |         |        |        |         |            |            |        |
| 槲皮素        | -0.248 | 0.445  | 0.314  | 1.000   |        |         |        |        |         |            |            |        |
| 山柰素        | -0.878 | -0.190 | -0.420 | 0.633   | 1.000  |         |        |        |         |            |            |        |
| 异鼠李素       | -0.454 | 0.439  | 0.245  | 0.953*  | 0.762  | 1.000   |        |        |         |            |            |        |
| 总含量        | -0.429 | 0.330  | 0.161  | 0.980** | 0.773  | 0.980** | 1.000  |        |         |            |            |        |
| DPPH 法     | 0.768  | 0.830  | 0.841  | 0.388   | -0.431 | 0.217   | 0.211  | 1.000  |         |            |            |        |
| TBARS 法    | -0.228 | 0.682  | 0.471  | 0.913*  | 0.567  | 0.953*  | 0.901* | 0.447  | 1.000   |            |            |        |
| FTC 法-24 h | 0.116  | 0.439  | 0.532  | 0.842   | 0.223  | 0.677   | 0.742  | 0.573  | 0.660   | 1.000      |            |        |
| FTC 法-48 h | 0.779  | 0.425  | 0.565  | 0.329   | -0.446 | 0.050   | 0.147  | 0.846  | 0.168   | 0.665      | 1.000      |        |
| FRAP 法     | 0.462  | 0.705  | 0.761  | 0.720   | -0.078 | 0.535   | 0.569  | 0.869  | 0.645   | 0.904*     | 0.837      | 1.000  |

\*表示显著相关,  $P<0.05$ ; \*\*表示极显著相关,  $P<0.01$

\* level represents a significant correlation at  $P<0.05$ ; \*\* level represents a greatly significant correlation at  $P<0.01$

酮、总酚含量呈正相关,与槲皮素、山柰素、异鼠李素含量呈负相关,但均没有达到显著水平。生物量与清除 DPPH 自由基能力,抗脂质过氧化能力 FTC 法、FRAP 法呈正相关,与抗脂质过氧化能力 (TBARS 法) 呈负相关,但均没有达到显著水平。抗脂质过氧化能力 (TBARS 法) 与槲皮素含量、异鼠李素含量,3 种黄酮类总含量均呈显著正相关。而 FTC 和 FRAP 法测得的抗氧化活性与总黄酮、总酚、槲皮素、山柰素、异鼠李素含量均没有显著相关性。

#### 4 讨论

##### 4.1 水分对垂盆草形态及生物量的影响

水分亏缺或过量一般情况下会抑制植物生长,

并直接反应在植物形态改变方面。张蕾等<sup>[12]</sup>研究发现,基质含水量越高,垂盆草新生芽数、最大芽长、平均节间距等越大,且基质含水量在 90%和 70%田间持水量时,垂盆草外观形态表现较好。当垂盆草遭受干旱时,枝条数、最大枝条长度、叶宽等综合质量不高,严重影响外观质量<sup>[13]</sup>。本实验发现,对于垂盆草植株,总体上水分充足 (S4 处理,土壤含水量为田间持水量的 75%~80%) 适宜于生长,植株健壮,最大分枝长、分枝数、新生芽数等显著优于其他处理,与《本草纲目拾遗》中垂盆草“生阴湿地,其年雨水多,其草必茂,叶大者曰虎牙”等记载一致<sup>[14]</sup>,并与前人研究结果相符。同时严重干

旱胁迫导致垂盆草植株矮小, 叶片卷曲、发黄, 茎干枯萎蔫, 这是垂盆草对干旱环境的适应性表现。

#### 4.2 水分对垂盆草次生代谢和抗氧化活性的影响

很多次生代谢产物的合成与积累受水分条件诱导。前人研究中土壤水分对黄酮类物质影响的报道不一<sup>[15-16]</sup>。杨莉等<sup>[17]</sup>发现蒺藜 *Tribulus terrestris* L. 总黄酮含量与灌水量呈显著正相关关系, 灌水量增加会促进总黄酮含量积累。Gharibi 等<sup>[18]</sup>发现干旱胁迫提高 3 种蓍属 *Achillea* L. 植物总黄酮含量, 而葡萄 *Vitis vinifera* L. 总黄酮含量在灌溉和无灌溉处理之间无显著差异<sup>[19]</sup>。本实验结果表明, S4 处理垂盆草总黄酮含量最大, 轻度干旱 S3 处理也可提高总黄酮含量, 而随着干旱或水湿程度加重, 总黄酮含量骤减。

槲皮素、山柰素、异鼠李素是垂盆草的主要黄酮类化合物, 其含量高低与药材内在品质密切相关。本实验中, 干旱胁迫有利于槲皮素、山柰素、异鼠李素的生成与积累, 而且垂盆草水提物的抗脂质过氧化能力 (TBARS 法) 与槲皮素含量、异鼠李素含量、3 种黄酮类 (槲皮素、山柰素、异鼠李素) 总含量均呈显著正相关, 说明垂盆草可能通过积累黄酮类化合物作为非酶促抗氧化剂, 减轻细胞膜脂过氧化程度, 增强自身抗性来应对外界不良环境刺激。

酚类物质与植物适应环境胁迫有关, 如紫外光、病原菌、氧化胁迫等。程春龙等<sup>[20]</sup>研究表明额济纳绿洲胡杨 *Populus euphratica* Oliv. 叶中酚类物质含量与土壤含水量呈显著负相关关系。本研究显示, S3、S4 处理垂盆草总酚含量显著高于其他 3 个处理, 结合相关性分析结果, 垂盆草总酚含量与抗氧化活性呈正相关, 可能是轻度干旱条件对垂盆草造成氧化胁迫, 植株合成和积累较多次生代谢物质来适应周围环境变化。但当环境严重胁迫时, 植株次生代谢会受阻<sup>[21]</sup>。

研究表明, 干旱胁迫会增强植株对 DPPH 自由基的清除能力和清除  $H_2O_2$  能力<sup>[22-23]</sup>。而体外抗氧化能力与黄酮、酚酸类成分含量存在相关关系<sup>[24]</sup>, 干旱提高酚酸成分含量从而增强孜然芹 *Cuminum cyminum* L. 抗氧化能力<sup>[25]</sup>。本研究发现, 水分处理影响垂盆草的体外抗氧化活性, 当土壤含水量为 75%~80% 时, 垂盆草清除 DPPH 自由基、抑制脂质过氧化能力及还原能力佳, 结合相关性分析结果, 垂盆草抗氧化能力与总黄酮、总酚含量呈正相关。S4 处

理抗氧化活性高, 与其总酚、总黄酮含量高有关。

#### 4.3 不同水分梯度下垂盆草产量和次生代谢物含量的关系

对次生代谢产物在植株体内形成和积累的诱导有不同的诱导机制假说, 但几乎所有的假说都认为有利于初生代谢的环境条件不利于次生代谢, 不利于初生代谢的条件反而增加次生代谢, 即药用植物产量与次生代谢物含量之间存在负相关关系。次生代谢产物积累与生长在环境条件需求方面存在矛盾, 是药用植物种植的难题<sup>[21]</sup>。但也有研究提出不同观点。如夏枯草营养生长期, 80%~85% 的田间持水量下, 果穗生长量和活性成分熊果酸含量均佳<sup>[26]</sup>。轻度干旱时丹参的生物量显著提高, 同时丹参酮类及丹酚酸 B 等成分也得到显著促进<sup>[27]</sup>。本研究中, 相关性分析结果表明, 垂盆草生物量 (干重) 与总黄酮、总酚含量呈正相关, 垂盆草生长良好时, 也有利于这 2 种次生代谢物数量增加。可能不同的次生代谢物及其诱导机制存在多样性和复杂性, 关于次生代谢产物合成积累与环境的内在本质的关系还需进一步探索。

综上所述, 垂盆草对不同水分条件表现出明显的响应, 且对于干旱胁迫具有一定耐受能力。当土壤含水量为田间持水量的 75%~80% 时, 垂盆草药材产量和活性成分可兼得, 同时具有较高的抗氧化活性, 可为定向培育高产优质垂盆草生长调控提供依据。至于水分条件如何影响垂盆草药效, 正在进行进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 (第 34 卷第 1 分册) [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 中国药典 [S]. 一部. 2015.
- [3] 梁侨丽, 徐连民, 庄颖健, 等. 垂盆草的化学成分研究 [J]. 中草药, 2001, 32(4): 305-305.
- [4] 潘金火, 潘 萍. 垂盆草总黄酮的保肝降酶作用及其化学成分的鉴别研究 [J]. 时珍国医国药, 2010, 21(8): 1930-1934.
- [5] Bai Y H, Lu H, Zhang G, et al. *Sedum sarmentosum* Bunge extract exerts renal anti-fibrotic effects *in vivo* and *in vitro* [J]. *Life Sci*, 2014, 105(1/2): 22-30.
- [6] Kim W H, Park Y J, Park M R, et al. Estrogenic effects of *Sedum sarmentosum* Bunge in ovariectomized rats [J]. *J Nutr Sci Vitaminol*, 2004, 50(2): 100-105.
- [7] Bai Y H, Lu H, Hu L P, et al. Effect of *Sedum sarmentosum* Bunge extract on aristolochic acid-induced

- renal tubular epithelial cell injury [J]. *J Pharmacol Sci*, 2014, 124(4): 445-456.
- [8] Lee S Y, Kim H J, Bae J H. Growth, vitamin C, and mineral contents of *Sedum sarmentosum* in soil and hydroponic cultivation [J]. *Kor J Hort Sci Technol*, 2011, 29(3): 195-200.
- [9] Chen Y J, Wang J, Wan D R. Determination of total flavonoids in three *Sedum* crude drugs by UV-Vis spectrophotometry [J]. *Pharmacogn Mag*, 2010, 6(24): 259-263.
- [10] Kim C Y, Lee M, Park I. Antioxidant activities of fractions from *Sedum sarmentosum* [J]. *J Food Sci Nutr*, 2006, 11(1): 6-9.
- [11] Mo E K, Kim S M, Yang S A, et al. Assessment of antioxidant capacity of *Sedum* (*Sedum sarmentosum*) as a valuable natural antioxidant source [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2011, 20(4): 1061-1067.
- [12] 张 蕾, 江海东, 田 娜, 等. 不同温度和基质含水量对垂盆草建植初期生长的影响 [J]. 草业学报, 2008, 17(3): 59-64.
- [13] 田 娜. 氮素和水分对垂盆草生长和草坪质量的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [14] 董亚男, 陈逸云, 张富永, 等. 垂盆草的现代实验和临床研究综述 [J]. 云南中医学院学报, 2014, 37(1): 93-96.
- [15] 汪贵斌, 郭旭琴, 常 丽, 等. 温度和土壤水分对银杏叶黄酮类化合物积累的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3077-3083.
- [16] Hernandez I, Alegre L, Munne-Bosch S. Drought-induced changes in flavonoids and other low molecular weight antioxidants in *Cistus clusii* grown under Mediterranean field conditions [J]. *Tree Physiol*, 2004, 24(11): 1303-1311.
- [17] 杨 莉, 韩忠明, 杨利民, 等. 水分胁迫对蒺藜光合作用 <https://sports.mini.eastday.com/theme/worldcup.html> 用、生物量和药材质量的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2523-2528.
- [18] Gharibi S, Tabatabaei B E S, Saeidi G, et al. Effect of drought stress on total phenolic, lipid peroxidation, and antioxidant activity of *Achillea* species [J]. *Appl Biochem Biotech*, 2016, 178(4): 796-809.
- [19] Sofo A, Nuzzo V, Tataranni G, et al. Berry morphology and composition in irrigated and non-irrigated grapevine (*Vitis vinifera* L.) [J]. *J Plant Physiol*, 2012, 169(11): 1023-1031.
- [20] 程春龙, 刘 松, 廖容苏, 等. 额济纳绿洲胡杨 (*Populus euphratica*) 酚类物质含量和分布及其与土壤水分的关系 [J]. 生态学报, 2008, 28(1): 69-75.
- [21] 苏文华, 张光飞, 李秀华, 等. 植物药材次生代谢产物的积累与环境的关 系 [J]. 中草药, 2005, 36(9): 1415-1418.
- [22] Bettaieb I, Hamrouni-Sellami I, Bourgou S, et al. Drought effects on polyphenol composition and antioxidant activities in aerial parts of *Salvia officinalis* L. [J]. *Acta Physiol Plant*, 2011, 33(4): 1103-1111.
- [23] Saeidnejad A H, Kafi M, Khazaei H R, et al. Effects of drought stress on quantitative and qualitative yield and antioxidative activity of *Bunium persicum* [J]. *Turk J Bot*, 2013, 37(5): 930-939.
- [24] Wojdyło A, Oszmiański J, Czemerys R. Antioxidant activity and phenolic compounds in 32 selected herbs [J]. *Food Chem*, 2007, 105(3): 940-949.
- [25] Rebey I B, Zakhama N, Karoui I J, et al. Polyphenol composition and antioxidant activity of cumin (*Cuminum Cyminum* L.) seed extract under drought [J]. *J Food Sci*, 2012, 77(6): C734-C739.
- [26] 郭巧生, 周黎君, 龚伟慧, 等. 不同水分处理对夏枯草果穗产量和品质的影响 [J]. 中国中药杂志, 2010, 35(14): 1795-1798.
- [27] 刘大会, 郭兰萍, 黄璐琦, 等. 土壤水分含量对丹参幼苗生长及有效成分的影响 [J]. 中国中药杂志, 2011, 36(3): 321-325.