

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0512

阎尚博, 钱永强, 张艳, 闫丽, 董丽. 土壤含水量对4种委陵菜属植物生长及生理影响. 草业科学, 2020, 37(1): 98-105.

YAN S B, QIAN Y Q, ZHANG Y, YAN L, DONG L. Effects of soil moisture content on morpho-physiological of four *Potentilla*. Pratacultural Science, 2020, 37(1): 98-105.

土壤含水量对4种委陵菜属植物生长及生理影响

阎尚博¹, 钱永强¹, 张艳², 闫丽², 董丽²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所 / 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 北京林业大学园林学院 / 城乡生态环境实验室, 北京 100083)

摘要: 委陵菜属 (*Potentilla*) 植物具有较强的抗逆性和观赏价值, 是我国华北地区极具发展潜力的乡土植物。本研究以绢毛匍匐委陵菜 (*P. reptans* var. *sericophylla*)、匍匐委陵菜 (*P. reptans*)、匍枝委陵菜 (*P. flagellaris*) 和鹅绒委陵菜 (*P. anserina*) 为材料, 研究了不同土壤含水量对4种委陵菜生长及生理的影响, 为这类植物的可持续发展提供参考。本研究设置田间持水量 (FC) 为 25%、50% 和 75% 3 个水分梯度, 在试验第 15 天测定其生长及生理指标。4 种委陵菜在 75% FC 和 50% FC 处理均长势良好。匍枝委陵菜 50% FC 处理长势最好, 75% FC 叶片相对含水量降低, 过氧化物酶 (POD) 活性增强。25% FC 处理下, 绢毛匍匐委陵菜长势良好; 鹅绒委陵菜总生物量下降, 超氧化物歧化酶 (SOD) 和类胡萝卜素含量升高; 匍匐委陵菜和匍枝委陵菜株高降低, SOD 和过氧化氢酶 (CAT) 活性均增加。结果表明, 绢毛匍匐委陵菜因较强的水分维持能力在各处理下长势良好; 水分亏缺下, 匍枝委陵菜、鹅绒委陵菜及匍匐委陵菜均通过激活抗氧化防御系统缓解水分胁迫。

关键词: 委陵菜属; 土壤含水量; 叶片相对含水量; 抗氧化防御系统

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)01-0098-08

Effects of soil moisture content on morpho-physiological of four *Potentilla*

YAN Shangbo¹, QIAN Yongqiang¹, ZHANG Yan², YAN Li², DONG Li²

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry / Key Laboratory of Forest Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University / Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: In north China, *Potentilla* are potentially important indigenous plants recognized for their ornamental value along with strong stress resistance characteristics. To provide a reference for the sustainable development of these plants, we studied the response mechanisms of four *Potentilla* species (*P. reptans* var. *sericophylla*, *P. reptans*, *P. flagellaris*, and *P. anserina*) to changes in soil moisture content, and their ability to retain their visual appeal under these conditions. Three water treatments conditions were investigated: 25%, 50% and 75% of the field water capacity. At the end of the study period, the leaves were harvested for physiological analysis and their growth index monitored. These 4 *Potentilla* were growing well at both 75% and 50% field capacity. *P. reptans* var. *sericophylla* grew well at 25% field capacity. However, biomass decreased, and superoxide dismutase activity and carotenoid content increased in *P. anserine*, *P. reptans* and *P. flagellaris* was through

收稿日期: 2019-10-11 接受日期: 2019-11-13

基金项目: 中国林科院中央公益性科研院所基本科研业务费重点项目“草地退化过程植被与土壤互作机制研究”(CAFYBB2019ZE001); 北京市科技计划项目“北京城市生态廊道植物景观营建技术 (D171100007217003)”

第一作者: 阎尚博 (1991-), 女, 山西孟县人, 在读硕士生, 研究方向为草业科学。E-mail: yanshangbo91@163.com

通信作者: 钱永强 (1979-), 男, 山东日照人, 副研究员, 博士, 研究方向为草业科学。E-mail: qianyq@caf.ac.cn

increase in superoxide dismutase and catalase activity to relieve the decline of plant height, respectively. These results suggest that *P. reptans* var. *sericophylla* is a drought tolerant species due to its higher leaf-water content. High antioxidant capacity under water stress plays a crucial role in resisting oxidative damage, and helps to relieve water stress in *P. anserina*, *P. reptans* and *P. flagellaris*.

Keywords: *Potentilla*; soil moisture content; relative water content of leaves; antioxidant defense system

Corresponding author: QIAN Yongqiang E-mail: qianyq@caf.ac.cn

水分胁迫是限制植物生长、生存和性能最重要的环境因素之一^[1]。近年来,随着园林绿地面积的不断增长,北京市环境用水量已占城市总用水量的 28.60%,仅次于生活用水^[2],丰富抗旱观赏植物资源、提高水资源利用效率已成为现代园林绿地建设的重要方向。观赏植物抗逆性评价的重要标准是不丧失其视觉品质,而不同于非观赏植物抗逆性评价要求^[3]。因此,在保持植物视觉品质的前提下,了解观赏植物对不同土壤含水量的形态和生理响应是准确筛选适宜园林植物材料的重要基础^[4]。

委陵菜属 (*Potentilla*) 植物隶属蔷薇科,以多年生宿根草本花卉为主,大部分该属植物具有景观野趣、抗逆性强、管理粗放等特点^[5-6],是退化草地或次生演替地的先锋物种之一,在城市园林绿地应用中是不可替代的植物材料^[7]。目前,对委陵菜属植物的研究主要集中在化学成分和药理作用^[8]以及其对退化生态系统的生态适应性^[9],其观赏价值保持及其适应性环境阈值等鲜有报道。基于此,本研究将在保持委陵菜景观视觉质量的前提下^[10],研究不同土壤含水量对 4 种委陵菜生长及生理的影响,揭示不同处理下 4 种委陵菜属植物生长差异的内在生理机制,为这类植物的可持续发展提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本试验以 2016 年 4 月 - 10 月在北京及周边地区引种的绢毛匍匐委陵菜 (*P. reptans* var. *sericophylla*)、匍匐委陵菜 (*P. reptans*)、匍枝委陵菜 (*P. flagellaris*) 和鹅绒委陵菜 (*P. anserina*) 4 种委陵菜属植物为研究对象,于 2018 年 5 月通过匍匐茎无性扦插繁殖获得生长势一致的扦插苗,扦插基质为草炭:蛭石 =

1:1。培养 2 个月后,挑选长势良好、根系发育状态一致的委陵菜扦插苗定植于塑料盆内(规格:长 14 cm,宽 12 cm,每盆栽培基质重 0.60 kg,栽植 3~5 株)。栽培基质为复合基质(园土:草炭:蛭石 = 2:2:1),土壤饱和含水量 74.16%,田间持水量 (field water capacity, FC) 33.64%,土壤 pH 7.28,有机质含量为 2.63%。试验期间,环境温度 20~35 °C,白天光照强度 25 000~35 000 lx,空气湿度 40%~70%。

1.2 试验设计

在定植后第 20 天充分浇水,待土壤水分含量自然降至试验要求时,保留盆内长势良好的植株,每盆 3 株,并剪除全部新生匍匐茎。试验采用裂区设计,主要因子为 4 种不同委陵菜属植物,即绢毛匍匐委陵菜、匍匐委陵菜、匍枝委陵菜和鹅绒委陵菜,安排在副区;次要因子为不同土壤含水量,设置土壤含水量为田间持水量的 25%、50% 和 75% 3 个处理,即 25% FC、50% FC 和 75% FC (表 1),安排在主区(图 1)。采用称重法补水,补充每天失去的水分,确保土壤含水量变化不超过目标水平的 2%。主次因子均采用随机区组排列,每个小区 6 盆植物,共有 12 个处理组合,每个处理组合设置 3 个重复。

表 1 不同土壤水分含量处理

Table 1 Soil moisture contents under treatments

处理 Treatment	土壤相对含水量 Relative soil moisture contents/%	土壤含水量 Soil moisture contents/%
75% FC	75.00	25.23
50% FC	50.00	16.82
25% FC	25.00	8.41

FC, 田间持水量。下同。

FC, Field water capacity; similarly for the following tables and figures.

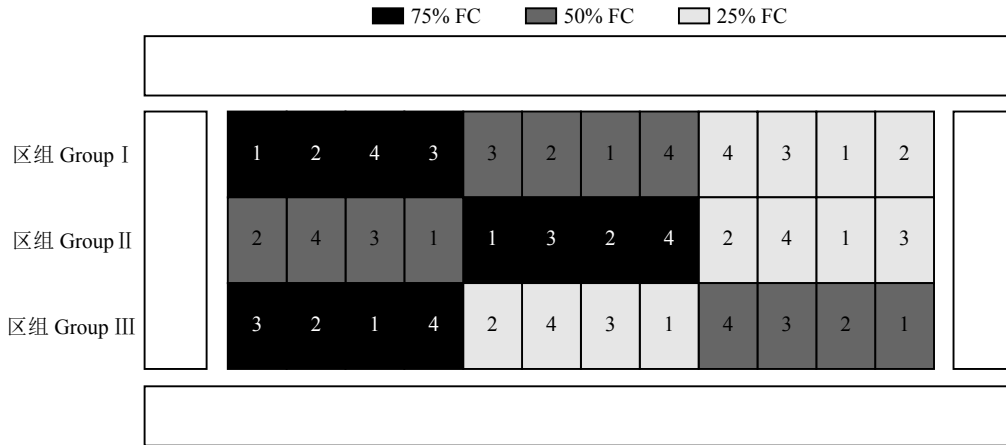


图 1 裂区试验设计图

Figure 1 Split plot design

1, 匍枝委陵菜; 2, 绢毛匍匐委陵菜; 3, 鹅绒委陵菜; 4, 匍匐委陵菜。

1, *P. flagellaris*; 2, *P. reptans* var. *sericophylla*; 3, *P. anserina*; 4, *P. reptans*.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长发育指标测定

培养至第 15 天, 选取每个处理组合的 10 株植株, 测定其株高、匍匐茎数量; 小心将植株根部的泥土洗净后擦干水分, 分别测定根系长度和植物单株生物量。

1.3.2 生理指标测定

叶片相对含水量采用 Weatherley 方法测定^[11]; 类胡萝卜素含量采用 95% 乙醇直接浸提法测定^[12]; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑光还原法测定^[13]; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用紫外吸收法测定^[14]; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定^[15]。吸光度采用 Biomate 3S 紫外分光光度计测定吸光值。生理指标测定均重复 3 次。

1.4 数据统计与分析

数据利用 Microsoft Office Excel 2013 整理绘制, 利用 SPSS 20.0 统计分析软件对同种植物不同处理间及同一处理不同植物间差异进行单因素方差分析, 多重比较采用 Duncan 检验。

2 结果与分析

2.1 不同土壤含水量对委陵菜属植物生长发育的影响

土壤含水量对匍匐委陵菜属植物的株高生长有显著影响 ($P < 0.05$)。在 25% FC 处理下 4 种委陵菜生长缓慢, 其中匍匐委陵菜的株高最低, 显著低

于其他两种土壤含水量 (75% FC 和 50% FC), 分别减少 30.34% 和 34.74%; 除鹅绒委陵菜外, 50% FC 条件下植株株高均表现出快速生长 (表 2)。

不同土壤含水量处理下, 4 种委陵菜的根长均没有显著差异 ($P > 0.05$)。其中, 匍枝委陵菜 25% FC 根长最短 (11.77 cm); 匍匐委陵菜 25% FC 最长, 为 26.87 cm (表 2)。

土壤含水量对 4 种委陵菜总生物量的影响与其对植物株高的影响一致, 4 种委陵菜 25% FC 植株总生物量均为最低; 除鹅绒委陵菜外, 50% FC 的植株生物量最高。25% FC 对鹅绒委陵菜的生长的抑制显著 ($P < 0.05$), 与 75% FC 相比降低 58.96% (表 2)。

匍匐茎生长的差异主要表现在植物种类间。鹅绒委陵菜在试验期间未长出匍匐茎, 匍匐委陵菜的平均生长量为每盆 4.67, 并且在 25% FC 处理下, 相较 50% FC 显著抑制匍匐茎的生长 ($P < 0.05$), 仅为 50% FC 匍匐茎数量的 44.50% (表 2)。

2.2 不同土壤含水量对委陵菜属植物叶片相对含水量的影响

不同土壤水分状况下, 4 种委陵菜的叶片相对含水量不同 (图 2)。首先, 在 25% FC 条件下, 相较 75% FC 和 50% FC 4 种委陵菜植物的叶片相对含水量有明显的下降趋势。其中, 匍枝委陵菜在 25% FC 条件下叶片含水量与其在 50% FC 条件下相比下降 17.01% ($P < 0.05$); 匍匐委陵菜下降 10.73% ($P < 0.05$); 绢毛匍匐委陵菜和鹅绒委陵菜分别下降 6.71% 和 8.34%, 但均无显著差异 ($P > 0.05$)。

表 2 不同土壤含水量对委陵菜属植物生长发育的影响

指标 Index	植物种类 Species	处理 Treatment		
		75% FC	50% FC	25% FC
株高 Height/cm	匍枝委陵菜 <i>P. flagellaris</i>	12.93 ± 1.91ABab	15.43 ± 1.23Aa	12.53 ± 1.01Ab
	绢毛匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i> var. <i>sericophylla</i>	10.87 ± 1.07BCa	11.93 ± 0.76BCa	10.47 ± 0.85Aa
	鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	15.50 ± 2.33Aa	13.80 ± 2.60ABa	12.63 ± 1.45Aa
	匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i>	8.90 ± 1.85Cb	9.50 ± 1.47Ca	6.20 ± 0.46Bc
根长 Root length/cm	匍枝委陵菜 <i>P. flagellaris</i>	15.70 ± 2.66Ba	14.73 ± 1.10Ca	11.77 ± 2.01Ca
	绢毛匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i> var. <i>sericophylla</i>	20.27 ± 1.72ABa	17.73 ± 3.59BCa	18.07 ± 1.03BCa
	鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	22.03 ± 5.78ABa	23.73 ± 2.63ABa	23.83 ± 3.01ABa
	匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i>	23.07 ± 3.34Aa	25.23 ± 4.21Aa	26.87 ± 5.70Aa
总生物量 Total biomass/g	匍枝委陵菜 <i>P. flagellaris</i>	1.78 ± 2.26Ba	1.91 ± 0.22Ba	1.42 ± 0.51Aa
	绢毛匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i> var. <i>sericophylla</i>	2.46 ± 0.92Ba	2.56 ± 0.29Ba	2.16 ± 0.75Aa
	鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	5.19 ± 1.55Aa	4.04 ± 0.48Aa	2.13 ± 0.68Ab
	匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i>	1.60 ± 0.51Ba	1.66 ± 0.73Ba	1.08 ± 0.18Aa
匍匐茎数量 Stolon number	匍枝委陵菜 <i>P. flagellaris</i>	3.00 ± 2.00ABa	4.00 ± 2.00ABa	1.00 ± 1.00Aa
	绢毛匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i> var. <i>sericophylla</i>	3.00 ± 3.46ABa	2.67 ± 2.09BCa	2.67 ± 1.53Aa
	鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	0.00Ba	0.00Ca	0.00Aa
	匍匐委陵菜 <i>P. reptans</i>	5.33 ± 1.53Aab	6.00 ± 1.00Aa	2.67 ± 0.58Ab

同列同一指标不同大写字母表示相同土壤含水量不同植物间差异显著($P < 0.05$)，同行同一指标不同小写字母表示相同植物不同土壤含水量处理间差异显著($P < 0.05$)。

Different capital letters within the same column of same index indicated significant differences between the same soil moisture treatments for the different plant species at the 0.05 level, and different lowercase letters within the same row of same index indicated significant differences between the different soil moisture treatments for the same plant at the 0.05 level.

其次，4 种委陵菜在 75% FC 与 50% FC 条件下均无显著差异($P > 0.05$)。

叶片相对含水量是反映植物自身水分状态的直接指标。其中，相对含水量下降 8%~10% 表明植物受到轻度水分胁迫，下降 10%~20% 植物受到中度水分胁迫。因此，上述结果表明：匍枝委陵菜和匍匐委陵菜在 25% FC 条件下受到中度水分胁迫；鹅绒委陵菜在 25% FC 条件下受到轻度水分胁迫；绢毛匍匐委陵菜未受到水分胁迫。

2.3 不同土壤含水量对委陵菜属植物抗氧化防御系统的影响

匍匐委陵菜在 25% FC 水分条件下(图 3)，SOD 活性显著提高($P < 0.05$)，与 50% FC 相比，提高 76.41%；鹅绒委陵菜在 25% FC 轻度水分胁迫下，

SOD 活性与 50% FC 相比，提高 15.48% ($P > 0.05$)；匍枝委陵菜和绢毛匍匐委陵菜在各个水分条件下无显著差异($P > 0.05$)。

在不同土壤含水量条件下 POD 活性差异显著($P < 0.05$)，除鹅绒委陵菜外，其余委陵菜 75% FC 含量最高，25% FC 含量次之，50% FC 含量最少。与 50% FC 相比，匍枝委陵菜、绢毛匍匐委陵菜和匍匐委陵菜 POD 活性在 75% FC 处理下显著升高($P < 0.05$)，其中，匍枝委陵菜升高 219.70%；绢毛匍匐委陵菜和匍匐委陵菜分别升高 187.75% 和 26.48% (图 3)。

除匍枝委陵菜外，不同的土壤含水量对其 CAT 含量无显著差异($P > 0.05$)。而匍枝委陵菜在 25% FC 水分胁迫下显著升高($P < 0.05$)，与 50% FC

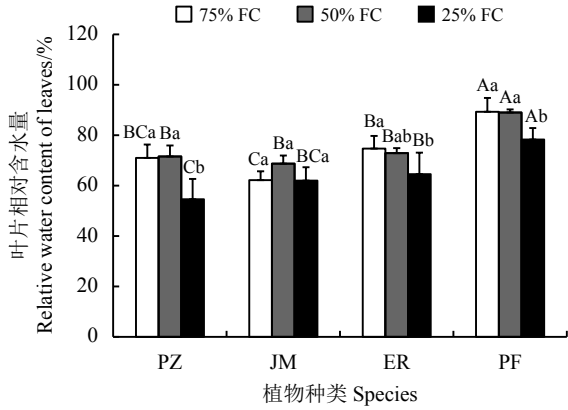


图 2 不同土壤含水量对委陵菜属植物叶片相对含水量的影响
 Figure 2 Effects of different soil moisture contents on relative water content of leaves of 4 *Potentilla* species

PZ, 匍枝委陵菜; JM, 绢毛匍匐委陵菜; ER, 鹅绒委陵菜; PF, 匍匐委陵菜。不同大写字母表示相同土壤含水量处理下不同植物种间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同植物在不同土壤含水量处理间差异显著 ($P < 0.05$)。图 3 同。

PZ, *P. flagellaris*; JM, *P. reptans* var. *sericophylla*; ER, *P. anserina*; PF, *P. reptans*. Different capital letters indicated that there are significant differences between the same soil moisture treatments for the different plant species at the 0.05 level, and different lowercase letters indicated that there are significant differences between the different soil moisture treatments for the same plant at the 0.05 level; similarly for Figure 3.

相比升高 47.94% (图 3)。

在类胡萝卜素含量方面, 匍枝委陵菜和绢毛匍匐委陵菜在 75% FC 和 25% FC 处理下与 50% FC 无显著差异 ($P > 0.05$); 鹅绒委陵菜在 25% FC 水分胁迫下, 类胡萝卜素含量显著高于 75% FC 和 50% FC ($P < 0.05$); 匍匐委陵菜在 25% FC 水分胁迫下, 类胡萝卜素含量与鹅绒委陵菜相反, 显著低于 75% FC 和 50% FC ($P < 0.05$) (图 3)。

3 讨论与结论

水是植物维持自身生长和发育的物质基础。土壤水分含量直接影响植物生长速度^[16]和营养体繁殖能力。幼苗的高度以及单株生物量作为植物生长状况的基本特征值, 其高低能较好地反映植物的物质积累和生长势强弱; 根长被用来衡量植物从深层土壤中获取水分的能力^[17]。在缺水条件下 (25% FC), 4 种委陵菜幼苗的高度、单株生物量和匍匐茎数量均呈现一定程度的下降, 这与 Rafi 等^[18]对蜀葵 (*Alcea rosea*) 和马鞭草 (*Verbena officinalis*) 水分亏缺的研究一致。水分供应不足导致叶片光合

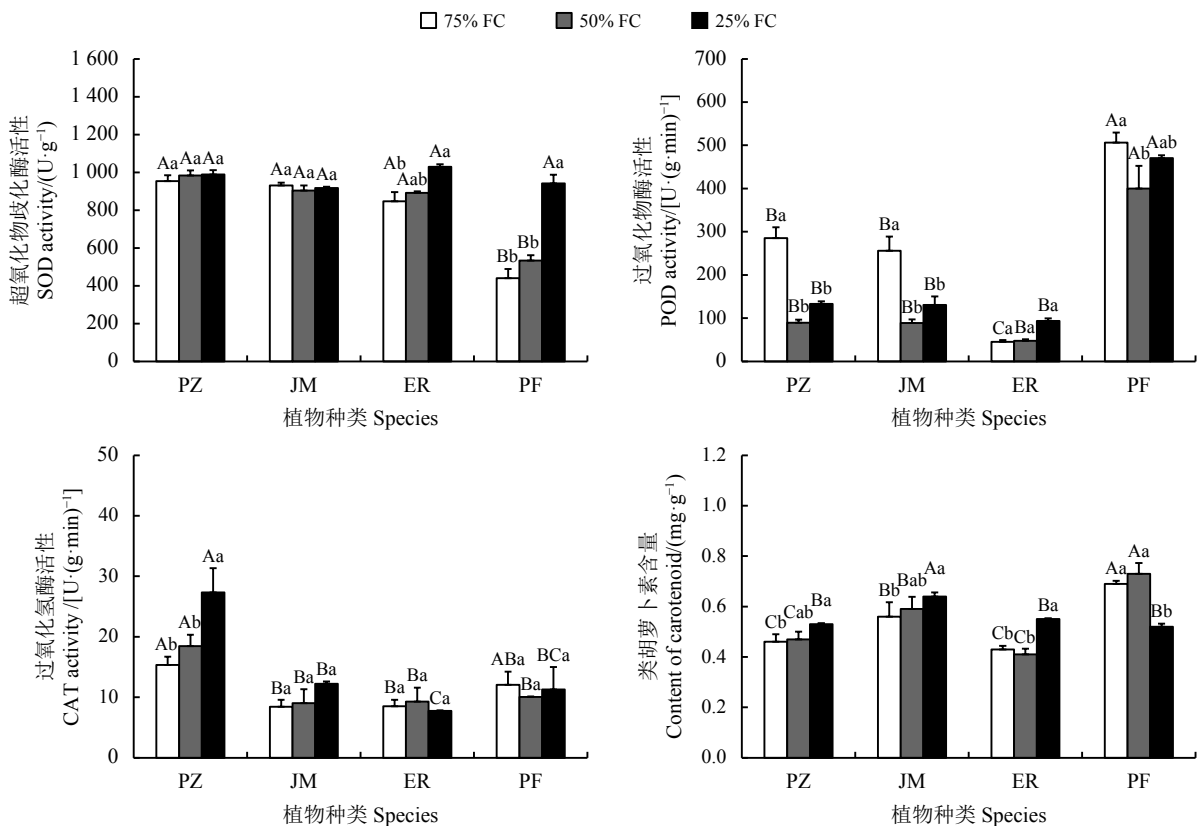


图 3 不同土壤含水量对委陵菜属植物抗氧化防御系统的影响

Figure 3 Effects of different soil moisture contents on antioxidant defense system of 4 *Potentilla* species

速率下降, 进而降低叶片出苗率和生物量同化率^[19]。在本研究中, 4 种委陵菜幼苗的根长在不同土壤水分处理下无显著差异 ($P > 0.05$), Sánchez-Blanco 等^[20] 在黄连木 (*Pistacia chinensis*) 和连翘 (*Forsythia suspensa*) 的研究中曾有过类似的报道, 认为这可能是由于根系的渗透调节较快^[21], 干旱胁迫对根系生长的影响小于对枝条生长的影响导致^[17]。

叶片的致死水势和相对含水量是衡量观赏作物叶片脱水耐性的一个重要指标^[22-24]。在不同土壤含水量处理下, 4 种委陵菜叶片的相对含水量不同。与其他 3 种委陵菜相比, 绢毛匍匐委陵菜相对含水量在不同土壤水分处理下相对稳定, 代谢活性良好, SOD、CAT 等抗氧化防御物质未被激活。这与 Rafi 等^[3] 发现黑心金光菊 (*Rudbeckia hirta*) 和蜀葵叶片相对含水量可以在缺水条件下基本保持不变的结果一致, 可以认为该因子是这些物种耐旱性的良好指标。

氧化应激可能是植物营养生长、繁殖和防御之间的主要调节因子, 在植物的生存中具有关键作用^[25]。过多的活性氧, 对蛋白质、脂类和核酸具有高度反应性和毒性, 可导致细胞损伤和死亡^[26], 而植物进化出的包含酶和非酶体系的抗氧化防御系统, 对植物体内的活性氧平衡至关重要^[27-28]。在本研究中, 匍枝委陵菜在不同土壤含水量处理下 CAT 的显著增加与早前圆果化香 (*Platycarya longipestages*) 的研究结果相近^[29], 这是由于植物在胁迫下对 H_2O_2 猝灭的高需求所致。鹅绒委陵菜

和匍匐委陵菜在缺水条件下, 主要依靠 SOD 清除超氧阴离子自由基 ($\cdot O_2^-$), 这一现象在许多其他植物中也有发现^[27, 30-31]。这些结果均表明, 抗氧化酶活性的增加是委陵菜在水分亏缺下的重要响应机制。

类胡萝卜素作为疏水性抗氧化剂, 可直接猝灭单线态氧或吸收叶绿素的激发能减少单线态氧的产生, 减少细胞膜中的活性氧含量^[32]。鹅绒委陵菜在轻度缺水条件下含量增加 34.15%, Kadkhodaie 等^[33] 研究发现干旱胁迫下芝麻 (*Sesamum indicum*) 的类胡萝卜素含量增加, Jisha 和 Puthur^[34] 在绿豆 (*Vigna radiata*) 的研究中也有同样的发现。同时, 本研究中, 匍匐委陵菜叶片的类胡萝卜素含量显著减少, 与前人的研究矛盾, 但这可能由于应激条件下调节光合和光保护色素系统之间的平衡导致^[35]。

本研究中不同土壤含水量条件下, 4 种委陵菜叶片相对含水量的高低直接反映植物自身水分状态, 水分亏缺刺激 SOD、POD、CAT 活性及类胡萝卜素含量的增加, 以缓解水分胁迫的破坏作用。但 4 种委陵菜在相同土壤含水量条件下, 自身水分状态的维持能力不同。绢毛匍匐委陵菜因较强的水分维持能力在不同处理下长势良好。匍枝委陵菜、鹅绒委陵菜及匍匐委陵菜通过激活抗氧化防御系统增强了自身的抗胁迫能力, 在 25% FC 条件下, 虽受到一定的生长抑制但维持了正常的植物功能。

参考文献 References:

- [1] FERNANDEZ J A, BALENZATEGUI L, BANON S, FRANCO J A. Induction of drought tolerance by paclobutrazol and irrigation deficit in *Phillyrea angustifolia* during the nursery period. *Scientia Horticulturae*, 2006, 107(3): 277-283.
- [2] 白鹏, 刘昌明. 北京市用水结构演变及归因分析. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 1-6, 34.
BAI P, LIU C M. Evolution law and attribution analysis of water utilization structure in Beijing. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4): 1-6, 34.
- [3] RAFI Z N, KAZEMI F, TEHRANIFAR A. Morpho-physiological and biochemical responses of four ornamental herbaceous species to water stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2019: 41.
- [4] ZOLLINGER N, KJELGREN R, CERNY-KOENIG T, KOPP K, KOENIG R. Drought responses of six ornamental herbaceous perennials. *Scientia Horticulturae*, 2006, 109(3): 267-274.
- [5] WHITMAN C M, RUNKLE E S. Flowering of newly introduced herbaceous perennial ornamentals in response to photoperiod and low-temperature treatments. *Acta Horticulturae*, 2013(1000): 353-360.

- [6] 尤凤丽, 梁彦涛, 曲丽娜, 胡敏, 张国发. 大庆地区委陵菜属植物花粉形态研究. 中国农学通报, 2010, 26(16): 337-340.
YU F L, LIANG Y T, QU L N, HU M, ZHANG G F. Study on pollen morphology of *Potentilla* species in Daqing area. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(16): 337-340.
- [7] 王艳荣, 张玮, 赵利君, 赵利清. 典型草原 7 种植物的放牧退化敏感度的比较研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2005, 36(4): 432-436.
WANG Y R, ZHANG W, ZHAO L J, ZHAO L Q. A comparative study on relative sensibility of 7 species to different grazing degradation in the typical steppe. Journal of Inner Mongolia University (Natural science), 2005, 36(4): 432-436.
- [8] 许雪贇, 秦燕燕, 曹建军. 青藏高原东北部二裂委陵菜叶片生态化学计量随海拔变化的特征. 生态学报, 2019, 39(24): 1-8.
XU X B, QIN Y Y, CAO J J. Variation characteristics of *Potentilla bifurca* leaf stoichiometry along the elevation gradient on the northeastern Qinghai Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 1-8.
- [9] 王旭峰. 5 种根蘖型植物根系构型对草甸草原放牧退化演替的生态适应性研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2013.
WANG X F. Study of ecological adaptation of root architecture of 5 creeping-rooted plants to degradation succession in the meadow steppe. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [10] CAMERON R W F, HARRISON-MURRAY R S, ATKINSON C J, JUDD H L. Regulated deficit irrigation-a means to control growth in woody ornamentals. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2006, 81(3): 435-443.
- [11] WEATHERLEY P E. Studies in the water relations of the cotton plant 1. The field measurement of water deficits in leaves. *New Phytologist*, 1950, 49(1): 81-97.
- [12] XU L, PAN Y, YU F. Effects of water-stress on growth and physiological changes in *Pterocarya stenoptera* seedlings. *Scientia Horticulturae*, 2015, 190: 11-23.
- [13] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant physiology*, 1977, 59(2): 309-314.
- [14] BISWAS A K, CHOUDHURI M A. Differential behaviour of the flag leaf of intact rice plant during ageing. *Biochemie Und Physiologie Der Pflanzen*, 1978, 173(3): 220-228.
- [15] KAR R K, CHOUDHURI M A. Possible mechanisms of light-induced chlorophyll degradation in senescing leaves of *Hydrilla verticillata*. *Physiologia Plantarum*, 1987, 70(4): 729-734.
- [16] 马利民, 唐燕萍, 张明, 滕衍行, 刘东燕, 赵建夫. 三峡库区消落区几种两栖植物的适生性评价. 生态学报, 2009, 29(4): 1885-1892.
MA L M, TANG Y P, ZHANG M, TENG Y Y, LIU D Y, ZHAO J F. Evaluation of adaptability of plants in Water-Fluctuation-Zone of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1885-1892.
- [17] FRANCO J A, BANON S, VICENTE M J, MIRALLES J, MARTINEZ-SANCHEZ J J. Root development in horticultural plants grown under abiotic stress conditions: A review. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2011, 86(6): 543-556.
- [18] RAFI Z N, KAZEMI F, TEHRANIFAR A. Effects of various irrigation regimes on water use efficiency and visual quality of some ornamental herbaceous plants in the field. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 78-87.
- [19] NAVARRO A, ÁLVAREZ S, CASTILLO M, BAÑÓN S, SÁNCHEZBLANCO M J. Changes in tissue-water relations photosynthetic activity and growth of plants in response to different conditions of water availability. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2015, 84(5): 541-547.
- [20] SÁNCHEZ-BLANCO M J, ÁLVAREZ S, ORTUÑO M F, RUIZ-SÁNCHEZ M C. Root system response to drought and salinity: Root distribution and water transport. Root Engineering. Berlin Heidelberg: Springer, 2014: 325-352.
- [21] SHARP R E, POROYKO V, HEJLEK L G, SPOLLEN W G, SPRINGER G K, BOHNERT H J, NGUYEN H T. Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2343-2351.
- [22] CHYLINSKI W K, LUKASZEWSKA A J, KUTNIK K. Drought response of two bedding plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2007, 29(5): 399-406.

- [23] 卢少云, 陈斯平, 陈斯曼, 梁潇, 郭振飞. 三种暖季型草坪草在干旱条件下脯氨酸含量和抗氧化酶活性的变化. *园艺学报*, 2003, 30(3): 303-306.
- LU S Y, CHEN S P, CHEN S M, LIANG X, GUO Z F. Responses of proline content and activity of antioxidant enzymes in warmseason turfgrasses to soil drought stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(3): 303-306.
- [24] AUGER R M, STODOLA A J W, MOORE J L, KLINGEMAN W E, DUAN X R. Comparative dehydration tolerance of foliage of several ornamental crops. *Scientia Horticulturae*, 2003, 98(4): 511-516.
- [25] MORALES M, MUNNE-BOSCH S. Oxidative Stress: A master regulator of plant trade-offs? *Trends in Plant Science*, 2016, 21(12): 996-999.
- [26] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930.
- [27] TÜRKAN İ, BOR M, ÖZDEMİR F, KOCA H. Differential responses of lipid peroxidation and antioxidants in the leaves of drought-tolerant *P. acutifolius* Gray and drought-sensitive *P. vulgaris* L. subjected to polyethylene glycol mediated water stress. *Plant Science*, 2005, 168(1): 223-231.
- [28] DARVIZHEH H, ZAHEDI M, ABBASZADEH B, RAZMJOO J. Changes in some antioxidant enzymes and physiological indices of purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.) in response to water deficit and foliar application of salicylic acid and spermine under field condition. *Scientia Horticulturae*, 2019, 247: 390-399.
- [29] LIU C, LIU Y, GUO K, FAN D, LI G, ZHENG Y, YU L, YANG R. Effect of drought on pigments, osmotic adjustment and antioxidant enzymes in six woody plant species in karst habitats of southwestern China. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 71(2): 174-183.
- [30] CHEN J W, CAO K F. Changes in activities of antioxidative system and monoterpene and photochemical efficiency during seasonal leaf senescence in *Hevea brasiliensis* trees. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2008, 30(1): 1-9.
- [31] ZHU Z, LIANG Z, HAN R. Saikosaponin accumulation and antioxidative protection in drought-stressed *Bupleurum chinense* DC. plants. *Environmental & Experimental Botany*, 2009, 66(2): 326-333.
- [32] CHEN X, HAN H, JIANG P, NIE L, BAO H, FAN P, LV S, FENG J, LI Y. Transformation of beta-lycopene cyclase genes from *Salicornia europaea* and *Arabidopsis* conferred salt tolerance in *Arabidopsis* and tobacco. *Plant & Cell Physiology*, 2011, 52(5): 909-921.
- [33] KADKHODAIE A, ZAHEDI M, RAZMJOO J, PESSARAKLI M. Changes in some anti-oxidative enzymes and physiological indices among sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) in response to soil water deficits under field conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 36(3): 641-650.
- [34] JISHA K C, PUTHUR J T. Halopriming of seeds imparts tolerance to NaCl and PEG induced stress in *Vigna radiata* (L.) Wilczek varieties. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2014, 20(3): 303-312.
- [35] SIRCELJ H, TAUSZ M, GRILL D, BATIĆ F. Biochemical responses in leaves of two apple tree cultivars subjected to progressing drought. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(12): 1308-1318.

(责任编辑 苟燕妮)