

土壤含水率对蓝莓叶片生理及果实品质的影响

宋泽君,李培培,袁斓方,郭小兰,王德炉*

(贵州大学林学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:【目的】了解土壤含水率对蓝莓(*Vaccinium corymbosum*)叶片生理及果实品质的影响特征和规律。【方法】以 5 年生兔眼蓝莓(*V. ashei*)为试材,通过人工控制设置不同土壤含水率梯度,分析不同土壤含水率对蓝莓植株生理及果实品质的影响。【结果】随着土壤含水率增加,蓝莓叶片中丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)和可溶性糖含量先降低后升高,超氧化物歧化酶(SOD)活性呈“M”形变化趋势,叶绿素含量先升高后下降;蓝莓果实单果质量呈“S”形变化趋势,果实中花青素和维生素 C(VC)含量先升高后下降,可溶性固形物(SSC)含量先降低后增加。当土壤相对含水率低于 35%~40%或高于 95%时,蓝莓叶片生理和果实品质都会受到显著影响,叶片中 MDA、Pro 和可溶性糖含量均显著升高;叶绿素含量和 SOD 活性均出现下降趋势,其中叶绿素含量显著降低。果实中花青素和 VC 积累显著降低,SSC 含量升高,蓝莓果实的质量随着土壤含水率的升高而增加,当土壤含水率达到 65%~70%后,果实的质量不再显著增加。采用隶属函数计算得出,土壤含水率处于 65%~70%时适合蓝莓生长。4 个蓝莓品种中,‘园蓝’(‘Gardenblue’)和‘巴尔德温’(‘Baldwin’)在土壤相对含水率 65%~70%(T3 处理)正常生长的梯度与土壤相对含水率 35%~40%(T1 处理)、95%~100%(T5 处理)强逆境条件下的差异性大于‘灿烂’(‘Brightwell’)和‘S13’,‘园蓝’和‘巴尔德温’对土壤水分过多的抗性略差,‘灿烂’和‘S13’抗性略好。在果实生长期,适度增加土壤含水率有利于‘园蓝’和‘灿烂’果实品质的提高。综合分析,在 T3 梯度下,各品种植株处于最适水分环境。【结论】过高或过低土壤含水率均能影响蓝莓叶片生理生化及果实品质,综合高产及果实品质的要求,蓝莓生长最适宜土壤含水率为 65%~70%。

关键词:蓝莓;土壤含水率;生理特性;果实品质;贵州

中图分类号:S727

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2023)03-0147-10



Effects of soil water content on leaf physiology and fruit quality of blueberry

SONG Zejun, LI Peipei, YUAN Lanfang, GUO Xiaolan, WANG Delu*

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: 【Objective】The effects of soil water content on the leaf physiology and fruit quality of blueberries were studied. 【Method】In this study, a 5-year-old *Vaccinium ashei* plant was used to analyze the effects of different soil water content on the plant physiology and fruit quality of blueberries using a manual control test. 【Result】The results showed that the contents of malondialdehyde (MDA), proline and soluble sugar in blueberry leaves initially decreased and then increased with an increase in soil water content, while the activity of the superoxide dismutase (SOD) showed an “M”-type trend, and the chlorophyll content initially increased and then decreased. The single fruit weight of blueberry fruits showed an “S”-type change trend, the contents of anthocyanin and vitamin C (VC) in fruits increased initially and then decreased, and the content of soluble solids (SSC) decreased initially and then increased. The leaf physiology and fruit quality of blueberries were significantly affected when the soil relative water content was lower than 35%–40% or higher than 95%. The MDA, proline and soluble sugar contents in the leaves significantly increased; however, the chlorophyll and SOD contents decreased, and the chlorophyll content decreased significantly. The accumulation of anthocyanins and VC in fruits decreased significantly, whereas SSC increased. The weight of the blueberry fruits increased with soil water

收稿日期 Received: 2021-07-28

修回日期 Accepted: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760205)。

第一作者: 宋泽君(1049356837@qq.com)。*通信作者: 王德炉(1539349567@qq.com), 教授。

引文格式: 宋泽君, 李培培, 袁斓方, 等. 土壤含水率对蓝莓叶片生理及果实品质的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(3): 147–156. SONG Z J, LI P P, YUAN L F, et al. Effects of soil water content on leaf physiology and fruit quality of blueberry [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(3): 147–156. DOI: 10.12302/j.issn.1000–2006.202107039.

content. When the soil water content reached 65%–70%, the weight of the blueberry fruits did not increase significantly. Based on the membership function method, a soil moisture content of 65%–70% was considered suitable for the blueberry growth. Among the four blueberry varieties, the difference between the normal growth gradient of ‘Gardenblue’ and ‘Baldwin’ in T3 treatment (65%–70%) and strong stress conditions of T1 (35%–40%) and T5 (95%–100%) was greater than that of ‘Brightwell’ and ‘S13’. ‘Gardenblue’ and ‘Baldwin’ had slightly lower stress resistance to soil water, while ‘Brightwell’ and ‘S13’ had slightly better stress resistance. In the fruit growing stage, the increasing soil water content was beneficial to improve the quality of ‘Gardenblue’ and ‘Brightwell’ fruits. A comprehensive analysis showed that plants of all varieties were in the optimum water environment in T3 treatment. 【Conclusion】 Both too high and too low soil water content could affect the physiological and biochemical characteristics of blueberry leaves and fruit quality. Considering the requirements of the high yield and fruit quality, the optimal soil water content was 65%–70%.

Keywords: blueberry; soil water content; physiological index; fruit quality; Guizhou

蓝莓(*Vaccinium corymbosum*)引入我国已有 30 余年,众多学者在蓝莓栽培技术、良种选育、苗木培养、果实品质提升等方面开展了大量的研究^[1-5],成效显著。蓝莓属于浅根系无根毛植物,种植时对土壤水分的要求较高。我国南方地区受中亚热带季风湿润气候的影响,降水分布不均匀,常出现极端天气,雨季会连续降雨,夏季又常出现短暂的干旱,从而使蓝莓生长发育及果实品质受到影响^[6]。因此在蓝莓培育和栽培管理过程中,合理的水分管理是促进蓝莓生长、提高果实品质和获取稳产高产的必要条件。

目前,国内关于水分逆境条件对蓝莓的影响方面在北方研究较多^[7-10],而南方就蓝莓叶片生理及果实品质对水分需求规律方面研究鲜见报道,南北方降雨量、降雨季节、空气湿度、热量条件等气候因子差异大,生产中推广种植的蓝莓品种也不相同,在南方气候与土壤条件下,开展蓝莓对土壤水分的需求及其响应特征研究,对实现蓝莓增产增质具有重要意义。因此,本研究以贵州 5 年生兔眼蓝莓‘园蓝’‘灿烂’‘巴尔德温’和‘S13’为研究对象,对不同土壤含水率条件下蓝莓叶片生理响应、果实品质特征进行测定分析,旨在探究蓝莓适宜的土壤含水率范围,以期为蓝莓生产中水分管理提供理论依据,为果农提供切实可行的技术指导,丰富贵州蓝莓栽培技术体系,达到节水、增产增质的目的。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地基本情况

试验地位于贵州省麻江县杏山镇两板凳村蓝莓种植园(107°54'E,26°37'N)。海拔 930 m,属亚热带季风湿润气候,有半年以上时间(4—9 月)受来自西太平洋偏南暖湿气流影响,具有冬无严寒、夏无酷暑、雨量充沛、四季分明的特点。全年平均

降水量为 1 190~1 560 mm,无霜期为 285 d。

1.2 试验材料

兔眼蓝莓是美国佐治亚洲的主要品种系列。该系列的蓝莓品种具有树势强、树体高大、产量高、寿命长的特点;其果实大小中等,风味佳;对土壤的适应性强,但抗寒能力较差。

选择长势基本一致、健康的 5 年生兔眼蓝莓(*V. ashei*),包含‘园蓝’(‘Gardenblue’)、‘灿烂’(‘Brightwell’)、‘巴尔德温’(‘Baldwin’)和‘S13’4 个品种,露天大田种植。种植株行距约为 1.5 m×2.0 m,地径 18.4~44.0 mm,树高 1.3~1.6 m。

1.3 试验设计与方法

1.3.1 土壤含水量的设定及保持

以待植株树干基部为中心,在树冠投影处外围四周开沟,沟深 40~50 cm、宽 20 cm,取出的土壤用塑料薄膜包住再回填至原位,形成隔离;树冠下部土壤用塑料薄膜覆盖,防止雨水渗入,使测定植株处于相对独立的土体中。土壤含水率设 5 个梯度处理(表 1),每个处理 3 个重复,每重复 5 株。各处理除土壤控水外,其他管理措施一致。每 7 d 使用 SK-100 型土壤水分仪(Sanleu,日本)测定各处理的土壤含水量,若低于设定值则人工补水,若高于设定值则及时翻土晾晒,使之能够保持所设定的水分含量。控水试验自休眠期(11 月下旬)开始至果实成熟(翌年 7 月中旬)后结束。

表 1 土壤不同含水率梯度设计

Table 1 Blueberry soil with different water contents %		
处理号 treatment	土壤相对含水率 soil relative water content	土壤绝对含水率 soil absolute water content
T1	35~40	13.62~15.56
T2	50~55	19.45~21.40
T3	65~70	25.29~27.23
T4	80~85	31.12~33.07
T5	95~100	36.96~38.90

1.3.2 样品采集

7月中旬在树体的东、西、南、北4个方向随机采集蓝莓植株上部成熟功能叶片,每个重复采集16片,装入自封袋;7月中旬在果实成熟期进行采收,在树体的东、西、南、北4个方向随机采集同期成熟的健康果实,装入自封袋,每个重复采集果实60颗。采集的叶片和果实样品在冰浴条件下带回实验室,清洗干净后置于超低温冰箱保存,用于测定叶片生理指标及果实品质。

1.3.3 生理指标的测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)法,丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法,叶绿素含量测定采用乙醇提取比色法,脯氨酸(Pro)含量测定采用茚三酮比色法,可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝法,可溶性糖含量测定采用蒽酮法测定^[11]。

1.3.4 果实指标的测定

每个处理随机选取30颗果实,采用精度为0.01g的电子天平测定单果质量,取算术平均值;花青素含量测定采用盐酸-甲醇法^[11],维生素C(VC)含量测定采用2,6-二氯酚滴定法^[11],可溶性固形物(SSC)含量测定采用手持折光仪法^[11]。

1.4 数据处理

用Origin制图,用SPSS 20.0、Excel对测定的各项指标进行方差分析。

1.5 综合评价方法

采样隶属函数法对蓝莓叶片生理及果实品质指标进行综合评价。隶属函数值计算公式:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}); \quad (1)$$

$$U(X_i) = 1 - [(X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})]。 \quad (2)$$

式中: $U(X_i)$ 为隶属函数值, X_i 为*i*指标测定值, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为某一指标的最大值和最小值,将每种材料各指标的隶属函数值累加求平均值,根据平均值大小来确定蓝莓适宜的土壤含水率^[12]。

2 结果与分析

2.1 土壤含水率对蓝莓叶片生理的影响

2.1.1 土壤含水率对蓝莓叶片MDA含量的影响

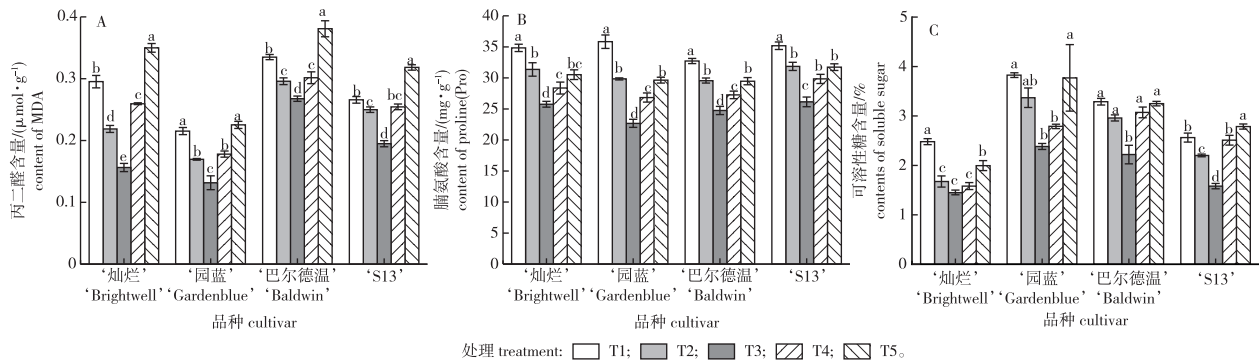
土壤含水率对蓝莓叶片MDA含量的影响情况(图1A)可以看出,不同土壤含水率条件下,4个品种蓝莓叶片中MDA含量表现出一致的规律,均在T3处理最低,土壤含水率低于或高于T3处理,MDA含量均会显著增加($P < 0.05$),与土壤含水率减少或增加的幅度呈正相关。5个处理中,T1和T5处理MDA含量均高于其他处理,说明土壤含水

率过高或过低均使蓝莓植株受到生理伤害。从4个不同品种来看,虽然MDA含量随着不同土壤含水率的变化趋势相同,但不同品种间还是表现出在响应程度上差异显著。‘灿烂’‘园蓝’‘巴尔德温’和‘S13’4个品种蓝莓叶片MDA含量T5处理最高,分别比T3最低值增加了123.93%、71.07%、42.29%和63.31%,说明‘灿烂’受到土壤水分的变化影响最大,‘巴尔德温’影响最小,表现出品种间明显差异。

2.1.2 土壤含水率对蓝莓叶片渗透调节物质的影响

土壤含水率对蓝莓叶片Pro含量的影响情况(图1B)显示,不同土壤含水率显著影响了4个品种蓝莓叶片中Pro含量的积累。随着土壤含水率的增加,叶片中Pro含量变化呈“V”形变化,即先下降后上升的趋势。当土壤水分梯度处于T1时,4个品种蓝莓叶片中Pro含量最高,分别为34.84(‘灿烂’)、35.84(‘园蓝’)、32.73(‘巴尔德温’)和35.18 mg/g(‘S13’);当土壤水分梯度处于T3时,4个品种蓝莓叶片Pro含量最低,与T1相比,T3处理4个品种蓝莓叶片Pro含量分别下降了26.07%、36.73%、24.39%、25.72%。4个品种叶片中Pro含量受土壤水分含量的影响顺序从大到小依次为‘园蓝’>‘灿烂’>‘S13’>‘巴尔德温’,且‘园蓝’最为敏感,其变化幅度分别是其余3个品种的1.4倍、1.5倍、1.4倍。从图1B发现,4个品种蓝莓叶片中Pro含量随着土壤水分变化的特点与MDA含量变化有所差异,即对于干旱胁迫的响应明显大于渍水胁迫响应。

从土壤含水量对蓝莓叶片可溶性糖含量的影响情况(图1C)可以看出,4个品种蓝莓叶片中可溶性糖含量受到土壤含水量影响显著,其变化规律与Pro一致,呈“V”形。T3处理时,各品种蓝莓叶片可溶性糖含量最低,T1处理最高。分析发现,虽然变化趋势一致,但变化的幅度大于Pro。T3与T1相比,4个品种蓝莓叶片Pro含量降幅为24.39%~36.73%,平均降幅为30.56%,可溶性糖含量降幅32.52%~41.42%,平均降幅为36.97%;表明蓝莓叶片中可溶性糖含量比Pro含量对土壤水分变化更敏感,体现了叶片中可溶性糖对水分胁迫的调节能力。品种间的可溶性糖含量存在较大差异,‘园蓝’可溶性糖含量变化最大,与‘S13’相比,‘园蓝’的可溶性糖含量变化幅度是‘S13’的1.47倍。



图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 土壤含水率对蓝莓叶片丙二醛、脯氨酸和可溶性糖含量的影响

Fig.1 Effects of soil water contents on MDA, Pro and soluble sugar content in blueberry leaves

2.1.3 土壤含水率对蓝莓叶片 SOD 活性的影响

从土壤含水率对蓝莓叶片 SOD 活性的影响情况 (图 2A) 可知,整体上 4 个品种蓝莓叶片 SOD 活性均随着水分梯度升高呈现出先升高后降低再升高再降低的波动趋势。除‘灿烂’与‘巴尔德温’外,与 T1 相比,其他两个品种在 T2、T3 土壤水分处理下 SOD 值显著升高;T4 处理时,叶片 SOD 酶活性达到最高值,与 T1 相比 4 个品种分别增加了 18.00%、28.18%、10.19%、46.25%,尤其品种‘S13’变化最显著,说明 T4 处理植株受到了一定程度的水分胁迫。在 T5 处理时,所有品种叶片中 SOD 活性迅速下降,说明细胞受损严重,SOD 已经受到了破坏。从图 2A 还可以看出,4 个蓝莓品种中,‘灿烂’和‘巴尔德温’对土壤水分的适应范围较广,耐受干旱的能力较强。此外,4 个蓝莓品种叶片 SOD 活性在渍水时受到的影响显著大于

干旱。

2.1.4 土壤含水率对蓝莓叶片中叶绿素含量的影响

由土壤含水率对蓝莓叶片叶绿素含量的影响情况 (图 2B) 可以看出,土壤含水率对蓝莓叶片中叶绿素含量产生了显著影响。4 个蓝莓品种叶片中叶绿素含量均随着土壤含水率的增加而表现出先升高后降低的趋势。在 T3 处理条件下,4 个蓝莓品种叶片中叶绿素含量均达到最高值,在 T5 条件下含量最低,分别比最高值降低了 32.90%、36.75%、31.30%和 33.70%。不同品种叶绿素含量受到土壤水分影响顺序从大到小依次为‘园蓝’>‘S13’>‘灿烂’>‘巴尔德温’。从叶绿素含量变幅数据看,4 个蓝莓品种中,水分过多时,‘园蓝’下降最多,‘巴尔德温’最少,相差近 7 个百分点,品种间差异明显。

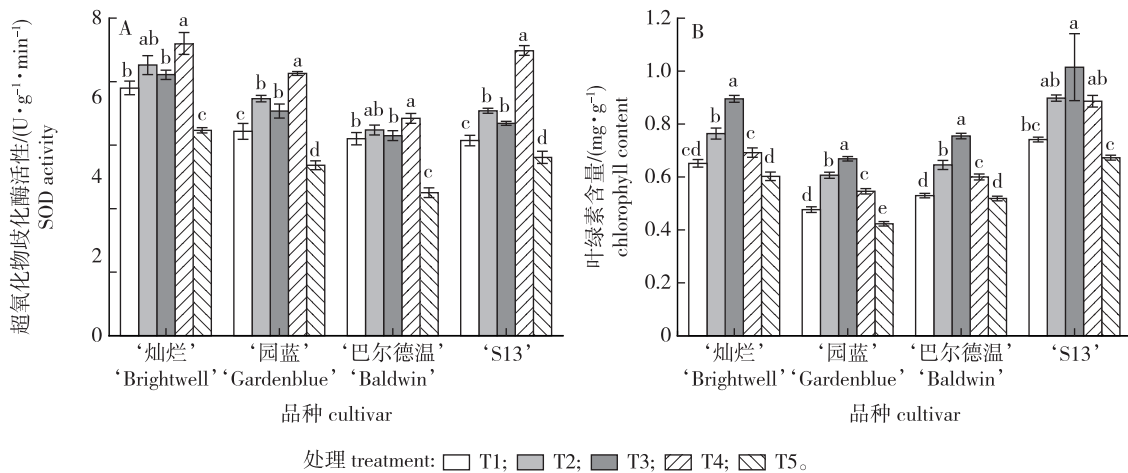


图2 土壤含水率对蓝莓叶片 SOD 活性和叶绿素含量的影响

Fig.2 Effects of soil water contents on SOD activity and chlorophyll contents in blueberry leaves

2.2 土壤含水率对蓝莓果实品质的影响

2.2.1 土壤含水率对蓝莓果实 VC 含量的影响

从土壤含水率对蓝莓果实中 VC 含量的影响情况(图 3A)可知,蓝莓果实中 VC 含量受到土壤含水率影响显著。随着土壤含水率的升高,4 个蓝莓品种果实中 VC 含量在处理间差异显著,‘巴尔德温’各处理下果实 VC 含量均最高;但总体上 4 个蓝莓品种均呈现先升高后降低的趋势,即土壤含水率在 T3 或 T4 条件下,蓝莓果实中 VC 含量较高,低于或高于这个含水率范围,果实中 VC 含量

显著减少。从蓝莓果实中 VC 含量变化幅度看,4 个品种间有较大差异。‘巴尔德温’‘园蓝’和‘灿烂’3 个品种果实 VC 含量变幅较大,最高含量和最低含量的差异达到了 48.76%~108.72%;比较而言,‘S13’果实中 VC 含量受到土壤含水率影响变化较小,差异仅达到了 29.61%。表明土壤水分过多或过少都不利于蓝莓果实内 VC 含量的积累,土壤水分不足对 VC 含量的影响显著大于水分过多的。

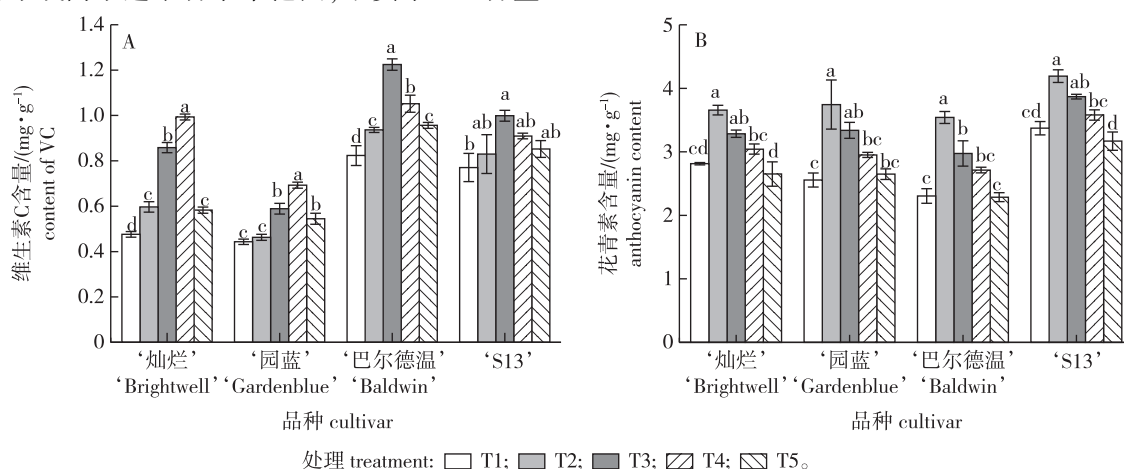


图3 土壤含水率对蓝莓果实中维生素 C、花青素含量的影响

Fig.3 Effects of soil moisture contents on VC and anthocyanin contents in blueberry fruits

2.2.2 土壤含水率对蓝莓果实花青素含量的影响

由土壤含水率对蓝莓果实花青素含量的影响结果(图 3B)可知,随着土壤含水率的升高,4 个蓝莓品种果实中花青素含量整体呈现先升高后降低的趋势,处理间差异显著。土壤水分 T2 梯度时,4 个蓝莓品种果实花青素含量积累最多, T5 最少,分别比 T2 处理减少了 29.98%、46.46%、53.59%和 24.30%。从花青素含量变化幅度来看,不同土壤水分对花青素含量的影响从大到小依次为‘巴尔德温’>‘园蓝’>‘灿烂’>‘S13’。从图 3B 看出,蓝莓果实中花青素含量在 T2 水分梯度达到最大值,与其他指标最大值所处的土壤含水率均有所不同,说明适度降低土壤含水率有利于蓝莓果实中花青素的合成和积累。进一步分析发现,4 个品种 T3 水分条件下蓝莓果实中花青素含量虽低于 T2 条件下,除‘巴尔德温’外,其余品种 T3、T2 处理间差异并不显著。图 3B 数据还表现出与其他指标相一致的特点,果实中花青素含量受到渍水的影响大于

缺水的影响。

2.2.3 土壤含水率对蓝莓单果质量的影响

由土壤含水率对蓝莓单果质量的影响结果(表 2)看出,4 个蓝莓品种果实大小受到土壤水分的影响显著,单果质量均随着土壤含水率的增加而增加。随着土壤含水率的增加,果实的质量增加过程有两个阶段:第 1 阶段,从 T1—T3 梯度果实质量增加迅速,4 个蓝莓品种单果质量增加了 18.22%~33.64%,处理间差异显著;第 2 阶段,从 T3—T5 梯度,果实质量基本维持稳定,没有显著增加,4 个蓝莓品种单果质量仅增加了 1.25%~2.10%。4 个蓝莓品种中,蓝莓果实单果质量增加最明显的是‘园蓝’,T3 水分梯度比 T1 水分梯度增加了 33.64%,其余 3 个品种仅增加了 25.66%、18.97%和 18.23%,说明‘园蓝’果实对水分需求比其他 3 个品种大,‘巴尔德温’‘S13’单果质量受水分影响较小。从表 2 还发现,蓝莓果实单果质量并没有受到土壤水分过多的影响,这一点与其他指标不一致。

表 2 土壤含水率对蓝莓单果质量的影响

Table 2 Effects of different soil water contents on fruit weights

单位:g

品种 cultivar	T1	T2	T3	T4	T5
‘园蓝’ ‘Gardenblue’	1.07±0.05 c	1.29±0.08 b	1.43±0.09 a	1.45±0.08 a	1.46±0.10 a
‘灿烂’ ‘Brightwell’	1.52±0.12 c	1.76±0.09 b	1.91±0.10 a	1.93±0.11 a	1.95±0.17 a
‘巴尔德温’ ‘Baldwin’	1.95±0.12 c	2.17±0.13 b	2.32±0.10 a	2.34±0.12 a	2.35±0.16 a
‘S13’	2.03±0.11 c	2.26±0.14 b	2.40±0.13 a	2.41±0.12 a	2.43±0.13 a

注:表中同行不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same line in the table indicate significant differences between treatments at the level of 0.05.下同。The same below.

2.2.4 土壤含水率对蓝莓果实 SSC 的影响

由土壤含水率对蓝莓果实 SSC 的影响结果(表 3)可知,随着土壤含水率的升高,4 个蓝莓品种果实中的 SSC 含量均呈现“V”形变化趋势,不同处理之间差异较大。当含水率处于 T3 时,蓝莓果实中的 SSC 含量最低。由于品种不同,蓝莓果实中 SSC 积累有较大差异,T3 处理与 T1 处理相比,4 个蓝莓品种果实中 SSC 含量分别降低了 21.18%、8.97%、18.40%和 12.75%,T5 较 T3 处理分别增加了 16.60%、7.58%、8.82%、12.36%,表明干旱对果实中 SSC 含量的影响略大于渍水。4 个品种中,‘园蓝’变化最大,‘灿烂’变化最小,说明不同蓝莓品种果实 SSC 对土壤水分响应有较大差异。

表 3 土壤含水率对蓝莓果实可溶性固形物含量的影响

Table 3 Effects of soil water contents on SSC in blueberry fruits

%

品种 cultivar	T1	T2	T3	T4	T5
‘园蓝’ ‘Gardenblue’	13.60±0.52 a	12.00±0.62 bc	10.72±0.53 d	11.50±0.55 c	12.50±0.84 b
‘灿烂’ ‘Brightwell’	14.50±0.54 a	13.80±0.46 bc	13.20±0.54 b	13.50±0.65 b	14.20±0.51 a
‘巴尔德温’ ‘Baldwin’	12.50±0.62 a	10.90±0.59 b	10.20±0.61 bc	10.30±0.52 bc	11.10±0.65 b
‘S13’	10.20±0.71 a	9.50±0.59 bc	8.90±0.45 c	9.40±0.49 bc	10.00±0.69 a

2.3 不同品种蓝莓的生理指标和果实品质相关性分析

由不同品种蓝莓的生理指标和果实品质相关性分析(表 4)可知,不同蓝莓品种的 SOD 活性与 MDA 及叶片可溶性糖含量呈显著的负相关。MDA 含量与花青素含量存在显著负相关关系,与单果质量存在显著的正相关关系。叶片叶绿素含量与单果质量存在显著的正相关关系,与果实花青素含量呈极显著正相关关系,与叶片可溶性糖含量呈极显著负相关关系。叶片可溶性糖含量与花青素含量呈显著的负相关。单果质量与 VC 含量存在极显著的正相关关系。

表 4 蓝莓生理与果实品质指标相关分析

Table 4 The correlation analysis of blueberry physiology and fruit quality indicators

指标 index	SOD	MDA	叶绿素 chlorophyll	叶片可溶性糖 leaf soluble sugar	Pro	VC	花青素 antho-cyanin	单果质量 weight of single fruit
MDA	-0.478 *	1						
叶绿素 chlorophyll	0.425	-0.285	1					
叶片可溶性糖 leaf soluble sugar	-0.545 *	0.202	-0.781 **	1				
Pro	-0.157	0.415	-0.259	0.363	1			
VC	-0.059	0.326	0.408	-0.28	-0.378	1		
花青素 anthocyanin	0.419	-0.503 *	0.762 **	-0.477 *	-0.154	0.088	1	
单果质量 weight of single fruit	-0.181	0.524 *	0.521 *	-0.348	-0.18	0.832 **	0.186	1
SSC	0.195	-0.237	0.024	0.033	0.349	-0.327	0.129	-0.421

注:*.P<0.05;*.P<0.01。表中指标除单果质量外均为含量。下同。The indices in the table are content except for the single fruit weight. The same below.

2.4 不同处理蓝莓叶片生理及果实品质综合评价

不同处理蓝莓叶片生理及果实品质综合评价结果(表 5)可知,在不同土壤含水率条件下,4 个蓝莓品种叶片生理和果实指标存在一定波动,品种

间变化幅度差异大,但隶属函数平均值均在 T3 处理时最大,表现出一致性规律。说明最适蓝莓生长及果实品质提高的土壤相对含水率为 T3 处理(65%~70%)。

表 5 不同处理蓝莓叶片生理及果实品质综合评价

Table 5 The comprehensive evaluation of physiology and fruit quality of blueberry leaves under different treatments											
品种 cultivar	处理 treatment	SOD	MDA	叶绿素 chlorophyll	叶片 可溶性糖 leaf soluble sugar	脯氨酸 pro	花青素 anthocyanin	单果质量 weight of single fruit	VC	隶属函数 平均值 membership function mean	排序 rank
‘灿烂’ ‘Brightwell’	T1	0.51	0.28	0.17	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.14	5
	T2	0.25	0.68	0.55	0.78	0.38	1.00	0.56	0.23	0.55	3
	T3	0.36	1.00	1.00	1.00	1.00	0.63	0.90	0.74	0.83	1
	T4	0.00	0.47	0.31	0.87	0.71	0.39	0.95	1.00	0.59	2
	T5	1.00	0.00	0.00	0.47	0.47	0.00	1.00	0.21	0.39	4
‘园蓝’ ‘Gardenblue’	T1	0.63	0.11	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	5
	T2	0.28	0.59	0.75	0.32	0.46	1.00	0.56	0.08	0.51	3
	T3	0.41	1.00	1.00	1.00	1.00	0.66	0.93	0.59	0.86	1
	T4	0.00	0.50	0.50	0.72	0.68	0.33	0.97	1.00	0.59	2
	T5	1.00	0.00	0.00	0.04	0.47	0.08	1.00	0.41	0.37	4
‘巴尔德温’ ‘Baldwin’	T1	0.27	0.41	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.09	5
	T2	0.16	0.75	0.54	0.31	0.39	1.00	0.54	0.28	0.50	2
	T3	0.23	1.00	1.00	1.00	1.00	0.55	0.93	1.00	0.84	1
	T4	0.00	0.70	0.34	0.20	0.68	0.34	0.97	0.57	0.48	3
	T5	1.00	0.00	0.00	0.04	0.41	0.00	1.00	0.33	0.35	4
‘S13’	T1	0.84	0.42	0.20	0.19	0.00	0.20	0.00	0.00	0.23	5
	T2	0.56	0.55	0.66	0.49	0.37	1.00	0.60	0.26	0.56	2
	T3	0.68	1.00	1.00	1.00	1.00	0.68	0.93	1.00	0.91	1
	T4	0.00	0.52	0.62	0.23	0.59	0.40	0.95	0.61	0.49	3
	T5	1.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	1.00	0.36	0.34	4

3 讨 论

3.1 不同土壤含水率对植物叶片生理特征的影响

正常的生理状态下,细胞内环境相对稳定,逆境胁迫植物 MDA 含量增加。MDA 含量与细胞质膜的膜脂过氧化作用密切相关^[13],逆境时质膜会发生生物相变化,这是大量产生活性氧自由基加剧了膜脂过氧化,使植物细胞膜系统受到破坏细胞内物质大量向外渗漏的结果^[14]。李畅等^[15]对杜鹃花(*Rhododendron simsii*)的研究以及古丽江·许库尔汗等^[16]对越橘(*Vaccinium* spp.)的研究结果表明,干旱与渍水时,MDA 含量增加;本研究结果与此结果相一致,4 个品种 MDA 含量在 T3 处理时均显著低于 T1 和 T5 处理。说明土壤中水分含量过多或过少都会导致蓝莓植株内自由基产生和清除失衡而出现自由基的积累,并由此引发和加剧细胞的膜

脂过氧化,造成膜的损伤。在不同的土壤水分条件下,植物通过增加体内渗透调节物质(Pro、可溶性糖等)来提高细胞液浓度,降低渗透势以抵抗环境胁迫^[17]。Pro 就是一种细胞亲和溶质,是重要的渗透调节物质,在植物受到胁迫,细胞水分含量降低时,能稳定原生质胶体及组织内的代谢过程来降低凝固点,起到防止细胞脱水的作用^[18-19]。可溶性糖也是一种重要的渗透调节物质,逆境时可以维持细胞膨压继续从外界吸水,防止细胞脱水。本研究中,T1、T5 处理时蓝莓叶片 Pro、可溶性糖含量显著升高,说明蓝莓在受到干旱和渍水胁迫时,植株体内能产生大量的渗透调节物来缓解干旱胁迫与渍水胁迫对树体带来的损伤,这一结果与多数逆境胁迫下的研究结果一致^[20-21]。

SOD 作为植物内源活性氧清除剂,是植物细胞在长期进化过程中形成防御活性氧离子毒害的

保护酶系统之一,它能清除超氧自由基,对脂质过氧化引起的DNA损伤有一定程度的保护作用^[22]。一般情况下,植物受到逆境胁迫时间较短时,酶活性会升高,而当植物受到逆境胁迫时间较长时,酶活性会先升高后降低。本研究结果表明,随着土壤含水率的增加,蓝莓叶片中SOD活性呈现先升高后降低再升高再降低的趋势,在T4土壤含水率条件下,酶活性最高,T2其次。说明T2和T4土壤含水率已经使蓝莓植株受到了一定程度胁迫,植株通过增强SOD活性以清除由此而产生的超氧自由基;也表明蓝莓植株对这两种土壤含水率有一定的耐受能力,这与曹昀等^[23]实验研究结果相一致。

叶绿素是植物进行光合作用最重要的色素,逆境条件下容易降解^[24]。张任凡等^[25]对枇杷(*Eriobotrya japonica*)的研究结果表明,过多或过少的土壤水分均会导致叶绿素含量下降,叶绿素生物合成受到阻碍,已形成的叶绿素加速分解,光合作用受到影响。本实验结果显示,随着土壤含水率的增多或减少,蓝莓叶片叶绿素含量逐渐下降,并且多数与T3处理达到了显著差异,这与其研究结果一致,说明干旱或渍水都不适合蓝莓的生长,但干旱时叶绿素含量明显高于渍水,尤其是‘园蓝’干旱与渍水处理叶片叶绿素含量有显著差异。且有研究发现^[22],一些抗旱性强的树种,即使在较低的土壤含水率下,也能保持较高的叶绿素含量,从而保持较高的生长速率。这与本试验的研究结果一致,也进一步证明了蓝莓是一种抗旱性较强的植物。

综上所述,在植物受到水分胁迫,尤其是在T1及T5处理下,植物产生大量活性氧自由基,MDA含量迅速上升,加剧膜脂过氧化,从而抗氧化酶系统受到破坏,SOD酶活性因此下降,自由基积累不断增加,光合器官结构与功能损坏,植物叶绿素含量显著降低。蓝莓迅速产生抗旱机制,使得液泡中溶质浓度上升,同时,胞质通过增加Pro、可溶性糖等可溶性溶质来维持渗透平衡,从而调节渗透势,降低水势以增强植株对水分的吸收,达到补偿效应。从综合上述生理指标的情况来看,反映植株受逆境胁迫的指标,如SOD、MDA、Pro等,在5种土壤含水率条件下4个蓝莓品种均在T3处理最低;而反映植株正常生长的指标,如叶绿素,均在T3处理最高。充分说明T3处理的土壤含水率对蓝莓植株生长最为适宜,而T2和T4处理的土壤含水率是蓝莓植株正常生长能够忍受的水分范围。

3.2 土壤含水率对果实品质的影响

土壤水分是影响果实产量及品质的重要因素,

过多或过少的土壤水分都会降低果实品质^[26]。本研究中,随着土壤含水率的增加,蓝莓果实的单果质量呈现“S”型生长曲线规律,果实中花青素、VC含量先升高后降低,但SSC含量先降低后增加;可溶性糖含量呈升高—降低—升高的变化,且各处理间差异显著。VC是果实中重要的营养物质,本实验研究表明,土壤水分梯度在T3—T4处理期间,有利于蓝莓果实中VC含量的积累,过高与过低的含水量不利于蓝莓果实中VC的积累,这与杨昌钰等^[27]在葡萄上的研究结果一致。花青素是一种强有力的抗氧化剂,同时也是一种自由基清除剂,能和蛋白质结合防止过氧化。张帅等^[28]、Acevedoopazo等^[29]研究发现,适当的水分亏缺会促进葡萄中花青素含量的积累,而本实验研究表明,在土壤含水率处于T2时,蓝莓果实中花青素含量积累最多,与之研究结果一致。这是由于水分是果实的主要成分,占整个果实质量的80%~90%,当土壤含水率充足时,促进了果实的生长。本研究中,土壤水分处于T3处理时,蓝莓果实的单果质量趋于稳定,土壤含水率增加到T4、T5状态,蓝莓果实单果质量基本不再增加,说明在土壤含水率达到T3水平时,已经能够满足蓝莓果实对水分的需求,这与苏学德等^[30]在葡萄上的研究结果一致。SSC是评价果实品质的综合性指标,包含能溶于水的可溶性糖、可滴定酸及矿物质等多种成分,作为营养物质的一个指标,其含量直接关系到果实的口感^[31]。张玥等^[32]研究表明适度的水分胁迫可以提高葡萄果实中SSC、可溶性糖的含量,本实验研究表明含水率处于T2条件时,蓝莓果实中的SSC含量相对较高,这是水分胁迫增加了蔗糖合成酶和磷酸盐合成酶的活性^[33],扩大了果实之间蔗糖浓度的梯度,将更多的同化物运入果实,从而提高了果实的SSC^[34]。而土壤水分处于T2条件时,蓝莓果实糖分最高,而蔗糖对类黄酮和花青素的生物合成有明显的正向调控作用,因此,在T2处理时花青素含量达到最大值,说明适当的水分胁迫可以提高果实的风味品质,与之研究结果相一致。严重的水分胁迫导致叶绿素的合成受阻,光合器官结构与功能损坏等非气孔限制因素也会抑制其光合作用,即抑制了糖类合成和转运,而蔗糖对类黄酮和花青素的生物合成有明显的正向调控作用,重度水分胁迫就会影响花青素的合成^[35]。

不同品种对不同土壤含水率的响应略有差异,轻度水分胁迫及重度水分胁迫下,可溶性固形物的含量均高于T3处理;但重度水分胁迫处理的蓝莓

单果质量和 VC 含量均较低。在 T4 处理下,‘园蓝’‘灿烂’果实 VC 含量、单果质量、SSC 均高于 T3 处理,且‘园蓝’‘灿烂’果实 VC 含量显著高于 T3 处理,虽花青素含量低于 T3 处理,但差异并不显著,说明‘园蓝’‘灿烂’在果实生长期适度增加土壤含水率有利于果实品质的提高,李双双等^[36]对蓝莓的研究结果表明适当的增加灌水量,有利于果实内在品质的形成,这与之研究结果一致。‘S13’进入果实生长期,果实中 VC 含量、花青素含量、单果质量、SSC 受土壤水分影响较小,T2、T4 与 T3 处理除单果质量外均无显著性差异。在 T3 处理下‘巴尔德温’果实中 VC、花青素含量均高于 T4 处理,且 VC 含量显著高于 T4 处理;单果质量、SSC 含量虽低于 T4 处理但差异并不显著,可见‘巴尔德温’T3 处理要优于 T4 处理;在 T2 处理下‘巴尔德温’果实中 VC 含量、单果质量均低于 T3 处理,但花青素的含量高于 T2 处理。说明在果实生长期适度的水分亏缺有利于花青素的积累。

蓝莓是须根系,对土壤条件尤其是土壤的疏松程度和 pH 要求较高,土壤水分过多,空气含量减少(土壤固、液、气三相比),氧气不足,根系呼吸不畅,都会影响蓝莓根系的生长;且蓝莓适宜的土壤 pH 范围为 4.5~5.5,由于水的 pH 为 7.0,当土壤水分过多时,超出了适宜范围,不利于蓝莓生长。本实验结果表明,土壤水分过多或过少都会降低果实品质,但土壤水分过多对蓝莓生理和果实的影响大于水分不足,Ribera-Fonseca 等^[37]对蓝莓的研究结果表明,轻度水分亏缺显著降低了蓝莓植株的光合性能,但与完全灌溉的果实相比,轻度水分亏缺的果实表现出更大的果实硬度和可溶性固体含量,这与本研究结果一致。

结合上述因子的隶属函数分析结果可知,当土壤含水率处于 T3(65%~70%)时,4 个蓝莓品种均可以实现蓝莓的高效生产,有利于蓝莓植株和果实的生长。在果实生长期,不同品种略有差异,‘S13’对土壤含水率不敏感,适度降低土壤含水率可显著提高‘巴尔德温’的花青素含量,适度增加土壤含水率有利于‘灿烂’‘园蓝’果实中各种营养物质的积累,改善果实品质。4 个蓝莓品种对土壤含水率多少的响应程度有显著差异,对土壤水分的需求和适应范围,以及响应规律基本一致。

参考文献(reference):

[1] ZHENG Y P, LI R, SUN Y, et al. The optimal temperature for the growth of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. Pak J Bot, 49(3): 965–979, 2017. DOI: 10.3969/j.issn.1672–8289.

2016.01.072.

- [2] 韦继光,贾明云,蒋佳峰,等.不同生物质炭对蓝莓幼苗叶片光合性能和生长的影响[J].植物资源与环境学报,2023,32(1):69–76. WEI J G, JIA M Y, JIANG J F, et al. Effects of different biochars on leaf photosynthetic characteristics and growth of blueberry (*Vaccinium* spp.) seedlings [J]. J Plant Resour Environ, 2023, 32(1): 69–76. DOI: 10.3969/j.issn.1674–7895.2023.01.08.
- [3] 聂飞,文光琴,朱忠荣,等.蓝莓优质苗组培技术研究[J].贵州农业科学,2010,38(11):41–43. NIE F, WEN G Q, ZHU Z R, et al. Study on tissue culture of quality blueberry plantlets [J]. Guizhou Agric Sci, 2010, 38(11): 41–43. DOI: 10.3969/j.issn.1001–3601.2010.11.012.
- [4] 王亮,韦继光,葛春峰,等.基于 SSR 标记分析蓝莓品种‘蓝美 1 号’自由授粉子代遗传多样性及群体遗传结构[J].植物资源与环境学报,2022,31(3):35–43. WANG L, WEI J G, GE C F, et al. Analysis on genetic diversity and population genetic structure of open-pollinated progenies of *Vaccinium corymbosum* ‘Lanmei 1’ based on SSR marker [J]. J Plant Resour Environ, 2022, 31(3): 35–43. DOI: 10.3969/j.issn.1674–7895.2022.03.05.
- [5] 古咸彬,郭书艳,黄武权,等.设施栽培对蓝莓光合作用与果实品质的影响[J].浙江农业科学,2020,61(10):2033–2036, 2080. GU X B, GUO S Y, HUANG W Q, et al. Effects of facility cultivation on photosynthesis and fruit quality of blueberry [J]. J Zhejiang Agric Sci, 2020, 61(10): 2033–2036, 2080. DOI: 10.16178/j.issn.0528–9017.20201024.
- [6] 韦继光,曾其龙,姜燕琴,等.干旱和淹水处理对蓝浆果生长和光合特性的影响[J].植物资源与环境学报,2015,24(1):54–60. WEI J G, ZENG Q L, JIANG Y Q, et al. Influence of drought and flooding treatments on growth and photosynthetic characteristics of blueberry (*Vaccinium* spp.) [J]. J Plant Resour Environ, 2015, 24(1): 54–60. DOI: 10.3969/j.issn.1674–7895.2015.01.08.
- [7] 吴林,李亚东,张志东,等.三种类型越桔在淹水逆境下生理及形态反应的比较[J].园艺学报,1997,24(3):287–288. WU L, LI Y D, ZHANG Z D, et al. A comparison of physiological and morphological reactions of three types of blueberries to flooding stresses [J]. Acta Horti Sin, 1997, 24(3): 287–288.
- [8] 吴林,李亚东,张志东,等.三种类型越桔对干旱胁迫的生理反应[J].吉林农业大学学报,1998,20(2):1–4. WU L, LI Y D, ZHANG Z D, et al. Physiological responses of three types of blueberries on water stress [J]. J Jilin Agric Univ, 1998, 20(2): 1–4.
- [9] 马琳娜,吴林,刘海广.水分胁迫下越橘品种‘北陆’和‘蓝丰’的生理反应[J].安徽农业科学,2010,38(16):8434–8435, 8461. MA L N, WU L, LIU H G. Physiological responses of blueberries cv. northland and bluecrop under water stress [J]. J Anhui Agric Sci, 2010, 38(16): 8434–8435, 8461. DOI: 10.13989/j.cnki.0517–6611.2010.16.124.
- [10] 李根柱,张自川,郑云普,等.五种北高丛蓝莓对干旱胁迫的生理响应及其耐旱性评价[J].北方园艺,2016(24):10–14. LI G Z, ZHANG Z C, ZHENG Y P, et al. Physiological response to drought stress and drought tolerance evaluation of five north high-bush blueberry varieties [J]. North Horti, 2016(24): 10–14. DOI: 10.11937/bfy.201624003.
- [11] 李小方,张志良.植物生理学实验指导[M].5版.北京:高等教育出版社,2016. LI X F, ZHANG Z L. Experimental instruction of plant physiology [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [12] 胡小京,刘玉彩,裴芸,等.水分胁迫对野百合幼苗生理特性的影响[J].河南农业科学,2020,49(1):111–117. HU X J, LIU Y C, PEI Y, et al. Effects of soil water stress on physiological characteristics of *Lilium brownii* seedlings [J]. J Henan Agric Sci, 2020, 49(1): 111–117. DOI: 10.15933/j.cnki.1004–3268.2020.01.015.
- [13] 梁文斌,聂东伶,吴思政,等.水分胁迫对短梗大参生理生化特征的影响[J].经济林研究,2016,34(3):99–104, 186. LIANG W B, NIE D L, WU S Z, et al. Effects of water stress on physiological and biochemical characteristics in *Macropanax rosthornii* [J].

- Nonwood For Res, 2016, 34(3): 99-104. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2016.03.014.
- [14] 刘国银. 不同土壤含水量对芒果叶片及果实的影响[D]. 海口: 海南大学, 2014. LIU G Y. Effects of different soil water content on mango leaves and fruits [D]. Haikou: Hainan University, 2014.
- [15] 李畅, 苏家乐, 刘晓青, 等. 旱涝交替胁迫对杜鹃花生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 412-419. LI C, SU J L, LIU X Q, et al. Effects of alternate flooding and drought stress on physiological characteristics in Azalea [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2019, 35(2): 412-419. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.02.023.
- [16] 古丽江·许库尔汗, 孙雅丽, 阿依古丽·铁木儿, 等. 不同越橘品种在新疆干旱条件下的光合生理响应[J]. 南方农业学报, 2015, 46(12): 2153-2158. Gulijiang Xukuerhan, SUN Y L, Ayihuli iemuer, et al. Photosynthetic physiological responses of *Vaccinium* spp. under drought stress in Xinjiang [J]. J South Agric, 2015, 46(12): 2153-2158. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2015.12.2153.
- [17] 石超, 唐婉, 马玉磊, 等. 4种连翘属植物对土壤含水量变化的生理反应[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 8-11, 37. SHI C, TANG W, MA Y L, et al. Physiological responses of four *Forsythia* species to soil moisture [J]. J Northwest For Univ, 2012, 27(6): 8-11, 37. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2012.06.02.
- [18] 徐云岭, 余叔文. 苜蓿愈伤组织盐适应过程中的溶质积累[J]. 植物生理学报, 1992, 18(1): 93-99. XU Y L, YU S W. Solute accumulation in the process of adaptation of alfalfa callus to NaCl [J]. Physiol Mol Biol Plants, 1992, 18(1): 93-99. DOI: CNKI: SUN: ZWSL.0.1992-01-013.
- [19] 蒲光兰, 胡学华, 周兰英, 等. 水分胁迫下乌柏离体叶片的生理生化特性[J]. 经济林研究, 2004, 22(2): 20-23. PU G L, HU X H, ZHOU L Y, et al. Physiological and biochemical characteristics of tallowtree *in vitro* under moisture stress condition [J]. Econ For Res, 2004, 22(2): 20-23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8981.2004.02.006.
- [20] 曾艳. 3个榉树品种对水分胁迫的生理响应[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018. ZENG Y. The physiological response of three *Zelkova schneideriana* varieties to water stress [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2018.
- [21] 李乃伟, 束晓春, 张明霞, 等. 土壤含水量对红豆杉紫杉醇含量及相关生理指标的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 75-78. LI N W, SHU X C, ZHANG M X, et al. Effects of soil moisture on taxol content and related physiological indexes of *Taxus media* cv. Hicksii [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2011, 35(3): 75-78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2011.03.015.
- [22] 焦娟玉, 陈珂, 尹春英. 土壤含水量对麻疯树幼苗生长及其生理生化特征的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4460-4466. JIAO J Y, CHEN K, YIN C Y. Effects of soil moisture content on growth, physiological and biochemical characteristics of *Jatropha curcas* L. [J]. Acta Ecol Sinica, 2010, 30(16): 4460-4466. DOI: doi:http://210.75.237.14/handle/351003/22414.
- [23] 曹昀, 纪欣圣, 国志昌, 等. 土壤水分含量对藜草幼苗保护酶与渗透调节物质的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 780-785. CAO Y, JI X S, GUO Z C, et al. Effects of soil moisture content on antioxidant and osmoregulation substrate content of *Phalaris arundinacea* seedlings [J]. Arid Land Geogr, 2018, 41(4): 780-785. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.04.013.
- [24] 黄晓蓉, 李玮婷, 刘刚, 等. 水分胁迫对楠木幼苗抗逆生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2015(7): 68-71. HUANG X R, LI W T, LIU G, et al. Effect of water stress on growth and physiological characteristics of *Phoebe zhennan* S. Lee et F. N. Wei [J]. North Hortic, 2015(7): 68-71. DOI: 10.11937/bfy.201507022.
- [25] 张任凡, 樊美丽, 魏凌云, 等. 水分条件对陕西安康地区枇杷幼果期生理的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(4): 778-784. ZHANG R F, FAN M L, WEI L Y, et al. Effects of moisture conditions on the physiological indexes of young-fruit stage loquat in north marginal area [J]. Acta Hort Sin, 2015, 42(4): 778-784. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2014-1031.
- [26] 刘洁, 万仲武, 曹兵, 等. 不同滴灌水肥处理对灵武长枣果实品质的影响[J]. 节水灌溉, 2014(8): 25-28. LIU J, WAN Z W, CAO B, et al. Effects of drip irrigation water and fertilizer treatment on fruit quality of Lingwu jujube [J]. Water Sav Irrigation, 2014(8): 25-28. DOI: CNKI: SUN: JSGU.0.2014-08-009.
- [27] 杨昌钰, 张芮, 蔺宝军, 等. 水分胁迫对鲜食葡萄果实品质影响的研究进展[J]. 农业工程, 2020, 10(1): 86-91. YANG C Y, ZHANG R, LIN B J, et al. Review of effects of water stress on fruit quality of table grapes [J]. Agric Eng, 2020, 10(1): 86-91. DOI: CNKI: SUN: NYGE.0.2020-01-022.
- [28] 张帅, 张芮, 张小艳, 等. 全生育期水分胁迫对设施葡萄果实品质的影响[J]. 水利规划与设计, 2019(6): 82-86. ZHANG S, ZHANG R, ZHANG X Y, et al. Effects of water stress on grape quality during whole growth period [J]. Water Resour Plan Des, 2019(6): 82-86. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2019.06.022.
- [29] ACEVEDO-OPAZO C, ORTEGA-FARIAS S, FUENTES S. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation [J]. Agric Water Manag, 2010, 97(7): 956-964. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.01.025.
- [30] 苏学德, 李铭, 郭绍杰, 等. 不同灌水处理对克瑞森无核葡萄光合特性及果实品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(30): 18649-18652. SU X D, LI M, GUO S J, et al. Effect of different irrigation treatment on the photosynthetic characteristics and fruit quality of crimson seedless grape in Gobi soil [J]. J Anhui Agric Sci, 2011, 39(30): 18649-18652. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2011.30.230.
- [31] 赵金梅, 高贵田, 薛敏, 等. 不同品种猕猴桃果实的品质及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 118-122. ZHAO J M, GAO G T, XUE M, et al. Fruit quality and antioxidant activity of different kiwifruit varieties [J]. Food Sci, 2014, 35(9): 118-122. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201409024.
- [32] 张钥, 王呈阳, 周嘉玲, 等. 不同水分调亏处理对葡萄果皮酚类物质的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(8): 1296-1307. ZHANG Y, WANG C Y, ZHOU J L, et al. Effects of different regulated deficit irrigation treatments on phenols in grape berries [J]. J Fruit Sci, 2021, 38(8): 1296-1307. DOI: 10.13925/j.cnki.gsxb.20200483.
- [33] QI H Y, LI T L, ZHANG J, et al. Effects on sucrose metabolism, dry matter distribution and fruit quality of tomato under water deficit [J]. Agric Sci China, 2003, 2(11): 1253-1258.
- [34] KAN I. Yield quality and irrigation with saline water under environmental limitations: The case of processing tomatoes in California [J]. Agric Econ, 2007, 38(1): 57-66. DOI: 10.1111/j.1574-0862.2007.00281.x.
- [35] 孙莹, 侯智霞, 苏淑钗, 等. ABA、GA₃ 和 NAA 对蓝莓生长发育和花青苷积累的影响[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(1): 6-11. SUN Y, HOU Z X, SU S C, et al. Effects of ABA, GA₃ and NAA on fruit development and anthocyanin accumulation in blueberry [J]. J South China Agric Univ, 2013, 34(1): 6-11. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.2013.01.002.
- [36] 李双双, 王德炉, 赵迪. 水肥耦合对蓝莓果实产量及品质的影响[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 131-139. LI S S, WANG D L, ZHAO D. Effects of water-fertilizer coupling on yield and fruit quality of blueberry [J]. J Northwest For Univ, 2017, 32(6): 131-139. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.06.20.
- [37] RIBERA-FONSECA A, JORQUERA-FONTENA E, CASTRO M, et al. Exploring VIS/NIR reflectance indices for the estimation of water status in highbush blueberry plants grown under full and deficit irrigation [J]. Sci Hortic, 2019, 256: 108557. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.108557.