

戚金存, 刘大泉, 刘泓, 等. 干旱胁迫及复水对槟榔幼苗形态和生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(4): 615-624.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.04.005

干旱胁迫及复水对槟榔幼苗形态和生理特性的影响

戚金存, 刘大泉, 刘泓, 金鑫, 陈明婉, 吕猛, 杨福孙, 李昌珍
(海南大学热带农林学院, 海南 海口 570228)

摘要: 本研究采用盆栽控水法, 对槟榔幼苗在干旱胁迫和复水过程中发生的形态和生理特性变化进行研究, 以评价干旱胁迫和复水对槟榔幼苗的影响。以正常浇水为对照(CK), 设置干旱时间分别为5 d、10 d、15 d、20 d、25 d、30 d, 在每个干旱时间节点取样后立即进行复水, 并在复水后1 d、4 d、7 d分别取样。研究结果表明: 干旱后, 槟榔幼苗根冠比增加; 复水后, 根冠比除干旱5 d恢复到CK水平外, 其余处理均未恢复到CK水平。根、茎、叶和种核含水量以及净光合速率(A)、蒸腾速率(E)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)均随着干旱时间的延长呈现递减趋势; 在干旱胁迫30 d时根、茎、叶和种核含水量以及 A 、 E 、 C_i 和 G_s 达到最低, 与CK相比分别下降了21.87%、28.97%、75.01%、34.24%、100.00%、92.64%、75.05%和95.70%; 复水后, 根、茎、叶和种核含水量以及 A 、 E 、 C_i 和 G_s 均在干旱20 d前复水后恢复效果明显, 但在干旱25 d复水后效果不明显。过氧化物酶(POD)活性呈现先升后降再升高趋势, 过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量则随着干旱时间的延长呈现先升后降趋势; SOD 活性在干旱10 d时达到最大值, 与CK相比增加了9.48%; CAT 和 POD 活性则在干旱15 d达到最大值, 与CK相比分别增加317.99%和44.88%; MDA在干旱25 d时达到最高, 与CK相比增加了59.99%。综上所述, 槟榔幼苗能维持正常生长的最长干旱时间是20 d, 当持续干旱超过20 d后, 将对槟榔幼苗造成无法逆转的伤害, 故在持续干旱20 d内必须对槟榔幼苗进行灌溉。

关键词: 槟榔幼苗; 干旱胁迫; 复水; 形态指标; 生理特性

中图分类号: S792.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)04-0615-10

Effects of drought stress and rehydration on the morphology and physiological characteristics of betel nut seedlings

QI Jin-cun, LIU Da-quan, LIU Hong, JIN Xin, CHEN Ming-wan, LYU Meng, YANG Fu-sun, LI Chang-zhen

(College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In this study, changes in morphological and physiological characteristics of betel nut seedlings during drought stress and rehydration were investigated by using potting water control method to evaluate the effects of drought stress and rehydration on betel nut seedlings. Normal watering was used as the control (CK) and the drought time was set to 5 d, 10 d, 15 d, 20 d, 25 d, and 30 d. Rewatering was performed immediately after sampling at each drought time node, and sam-

pling was performed on 1 d, 4 d, and 7 d after rewatering, respectively. The results showed that the root-crown ratio of betel nut seedlings increased after drought. After rewatering, the root-crown ratio did not return to the CK level except for the 5 d drought treatment. The water content of roots, stems, leaves and seed kernels, net photosynthetic rate (A), transpiration rate (E), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stomatal conductance (G_s) showed de-

收稿日期: 2023-08-05

基金项目: 海南省棕榈类(槟榔)现代农业产业技术体系项目(HNARS-1-G3)

作者简介: 戚金存(1998-), 男, 甘肃宕昌人, 硕士研究生, 研究方向为热带作物绿色高效栽培。(E-mail) 1186009250@qq.com

通讯作者: 李昌珍, (E-mail) lichangzhen029@163.com

creasing trends with the extension of drought time. The water content of roots, stems, leaves and seed kernels, as well as A , E , C_i and G_s reached the minimum at 30 d of drought stress, decreasing by 21.87%, 28.97%, 75.01%, 34.24%, 100.00%, 92.64%, 75.05% and 95.70%, respectively, compared with CK. The water content of roots, stems, leaves and seed kernels, and A , E , C_i and G_s all recovered significantly after rewatering before 20 days of drought, but the recovery effect was not obvious at 25 days of drought. Peroxidase (*POD*) activity showed a trend of increasing first, then decreasing and then increasing, while catalase (*CAT*) activity, superoxide dismutase (*SOD*) activity and malondialdehyde (*MDA*) content increased first and then decreased with the extension of drought time. The activity of *SOD* reached the maximum at 10 d of drought, increasing by 9.48% compared with that in CK. The activities of *CAT* and *POD* reached the maximum at 15 d of drought, increasing by 317.99% and 44.88%, respectively, compared with CK. The content of *MDA* reached the highest at 25 d of drought, which increased by 59.99% compared with CK. In summary, the longest drought time for betel nut seedlings to maintain normal growth was 20 days. When the continuous drought exceeded 20 days, it would cause irreversible damage to betel nut seedlings. Therefore, betel nut seedlings must be irrigated within 20 days of continuous drought.

Key words: betel nut seedlings; drought stress; rehydration; morphological index; physiological characteristics

植物生长受到干旱、盐碱、高温、低温等非生物因素胁迫的影响极大,这些因素在植物整个生长发育过程中起着重要作用^[1],干旱对植物的影响尤为突出,往往是植物最容易受到的一种胁迫。水分与作物生长密切相关,干旱会使作物形态、生理、生化等指标发生明显变化,甚至引起作物萎蔫死亡^[2]。遭受干旱胁迫时,作物分配到根系的营养会增加,地上部分生长受到抑制,导致根冠比变大^[3];作物过氧化物酶(*POD*)、超氧化物歧化酶(*SOD*)和过氧化氢酶(*CAT*)活性总体呈现先增加后下降的趋势^[4-5],脯氨酸(Pro)、可溶性蛋白(SP)和丙二醛(MAD)含量会随着干旱胁迫强度的增加逐渐提高;同时,作物叶绿素含量下降导致气孔导度(G_s)、净光合速率(A)和蒸腾速率(E)呈现先下降后上升的趋势,进而抑制光合作用。也有研究发现,轻度和中度干旱胁迫后进行复水,作物根系对水分和养分的吸收能力能够明显提高,可逆转叶片光反应中心所受到的干旱胁迫影响,同时,还可迅速弥补由干旱胁迫造成的损伤,出现补偿效应^[6-7],但重度干旱胁迫后进行复水,作物细胞膜因膜脂过氧化遭到破坏,光合器官受损,恢复至正常水平需要的时间可能会延长,甚至无法恢复到正常水平^[8-9]。如姜鹏等研究结果显示,玉米在拔节期和灌浆期持续遭受中度干旱胁迫时,乳熟期恢复浇水后各项指标能回到CK状态,但在重度干旱胁迫后复水,各项指标均无法回到CK水平^[9]。因此,掌握作物耐干旱的时长以及复水后的生长情况,对作物生产具有实际指导意义。

槟榔(*Areca catechu* L.)是棕榈科槟榔属常绿乔木,中国主要产区在海南,具有四大南药之称^[10],具

有祛除体内细菌和害虫以及治疗痢疾的功效。同时,它也是一种重要的热带经济作物。目前,国内主要种植槟榔的地区集中在山地,灌溉条件较差。槟榔幼苗的移植一般在当年9-10月份和次年3-4月份,而当年11月到次年4月是槟榔种植区的干旱季节,槟榔幼苗移栽后极易出现干旱缺水问题。如何在节约用水和降低劳动成本的情况下保证槟榔幼苗正常生长是目前亟待解决的一个难题。现在仅有少量关于槟榔干旱胁迫的研究,如曹红星等研究发现,槟榔幼苗Pro和MAD含量在受到干旱胁迫后增加了34.61倍和32.82倍^[11];陈歆的研究结果表明,槟榔幼苗*SOD*和*POD*等酶活性随干旱时间加长呈现先升再降趋势,并在14 d和28 d时达到最大值^[12]。但这些试验均未进行槟榔幼苗干旱复水后的观测和研究。那么槟榔幼苗移植后可耐干旱时长具体是多少,复水后是否可恢复至CK水平,遭遇干旱胁迫以及复水后槟榔幼苗形态、生理和光合作用会发生怎样的变化?这些目前都不清楚。鉴于此,本研究以槟榔幼苗为材料,利用盆栽土培方式,通过自然干旱控水法进行不同干旱胁迫时长及复水处理对槟榔幼苗形态和生理特性的影响进行研究,以期对槟榔幼苗生长期耐干旱栽培提供理论参考与实际指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2022年4-6月在海南大学海甸校区农业科学研究基地大棚内完成。该基地气候类型为热带季风性气候,年平均日照时数超过2 000 h,试

验期内气温为21~29℃,平均气温为26.5℃;年平均降水量1 696.6 mm,年平均蒸发量1 834 mm。本试验供试材料为三叶一针且健康的海南本地槟榔幼苗,采用盆栽土培方式进行,花盆口径25.4 cm,底径17.8 cm,高19.6 cm。供试土壤为砖红壤,基本理化特性为:土壤含水量10.14%,容重2.528 g/cm³,有机质含量6.28 g/kg,最大持水量20.07%,pH值5.08。称取7 kg土壤装入花盆后,每盆种植1株,第1次浇水量为1 500 ml,之后每5 d浇1次水,每次浇水量为1 000 ml,等试验材料适应生长14 d后统一进行干旱和复水试验。

1.2 试验设计

试验共设6个干旱时长,分别为5 d、10 d、15 d、20 d、25 d和30 d,以正常浇水为对照(CK),共计7个处理。当达到干旱时间节点时,取相应处理及CK植株,取完植株后立即进行复水,并在复水后第1 d、4 d、7 d分别取样进行复水后的指标测定。复水后按照正常浇水处理进行,每5 d浇1次水,每次浇水量为1 000 ml。每次取样每个干旱处理及CK至少取3株,共计取样30次。为保证槟榔幼苗取样的整齐度,每个干旱处理种植20株,每盆种植1株,共计种植120盆;CK处理种植了26盆,每盆种植1株,共计26株。

1.3 测定项目与方法

叶绿素含量通过分光光度法进行测定;槟榔各器官和土壤含水量使用烘干法进行测定;9:00-11:00通过CIRAS-3便携式光合仪测定 A 、 G_s 、 C_i (胞间CO₂浓度)和 E ^[13]。使用氮蓝四唑光还原法、愈创木酚显色法和紫外吸收法分别测定SOD、POD和CAT活性,酸性茚三酮显色法和硫代巴比妥酸法测定Pro和MDA含量^[14]。

1.4 数据处理

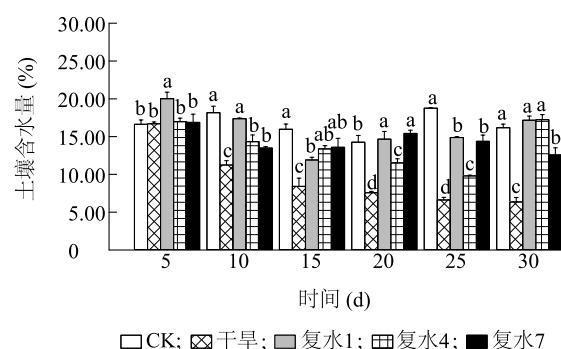
所测数据采用WPS office XLSX进行试验数据的汇总、整理和计算,采用SPSS 28.0对试验数据进行方差分析、多重比较(显著性水平 $P<0.05$)和相关性分析,运用SigmaPlot 14.0软件绘制图、表。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫及复水处理对土壤含水量的影响

由图1可知,随着干旱胁迫时间的递进,槟榔幼苗土壤含水量呈逐渐递减的趋势,在干旱10 d、15 d、20 d、25 d和30 d时土壤含水量和同时期CK相

比差异显著;在干旱30 d时,土壤含水量最小为6.35%,与同时期CK相比较下降了67.75%。分别在干旱10 d、15 d、20 d、25 d和30 d进行复水处理后,土壤含水量明显上升。



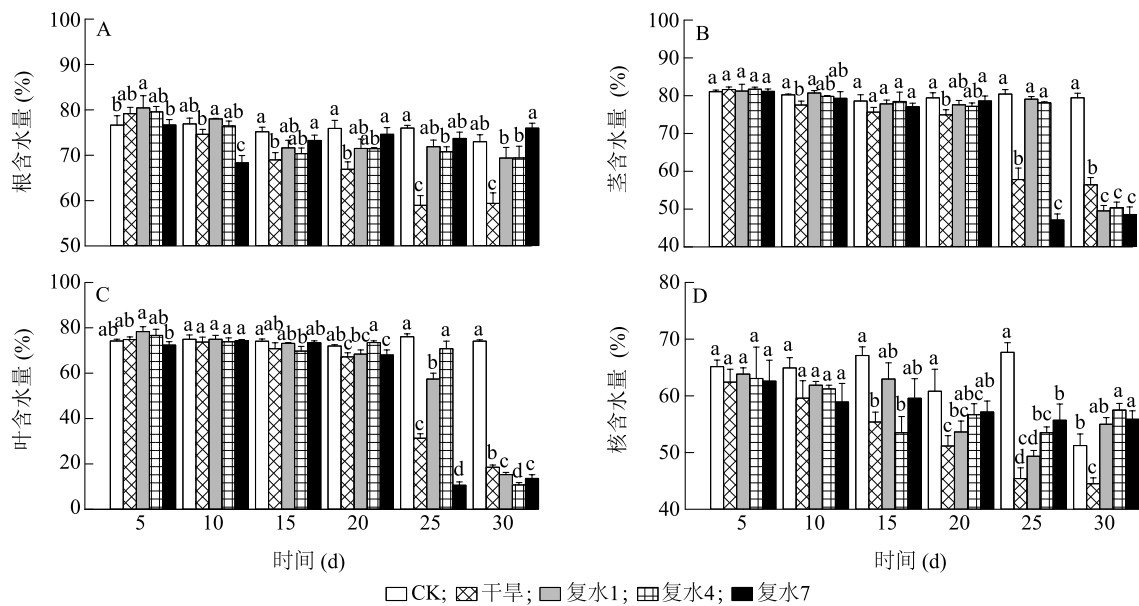
时间为干旱时间节点,分别为干旱5 d、10 d、15 d、20 d、25 d和30 d,复水1、复水4、复水7分别表示达到干旱时间节点进行复水后的第1 d、第4 d、第7 d;不同小写字母表示同一干旱时间下不同复水时间处理间差异达显著水平($P<0.05$)。

图1 干旱胁迫及复水处理对土壤含水量的影响

Fig.1 Effects of drought stress and rehydration treatment on soil moisture content

2.2 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗各器官含水量的影响

从图2可知,随着干旱胁迫时间的延长,槟榔幼苗各器官含水量均下降。在干旱15 d、20 d、25 d和30 d时槟榔幼苗根和核的含水量与CK间存在显著差异,在干旱20 d、25 d和30 d时,槟榔幼苗茎和叶含水量与CK之间存在显著差异。与干旱20 d相比,干旱25 d时槟榔幼苗根、茎、叶和核含水量下降明显,分别降低了11.87%、22.84%、53.41%和11.23%;在干旱30 d时,槟榔幼苗根、茎、叶和核含水量为最低,与同时期CK相比分别下降了18.65%、28.97%、75.01%和13.15%(图2)。在干旱25 d和30 d进行复水处理后,槟榔幼苗根和核含水量明显上升,在干旱30 d进行复水处理后第7 d槟榔幼苗根和核含水量分别为75.98%和55.87%,比同时期CK处理分别增加了3.95%和8.30%(图2A和图2D)。在干旱30 d进行复水处理后,槟榔幼苗茎和叶的含水量与CK相比显著降低,在干旱20 d进行复水处理后,槟榔幼苗茎含水量能恢复到同时期CK水平;但在干旱30 d进行复水处理7 d,槟榔幼苗茎和叶含水量分别为48.59%和13.59%,与同时期CK相比下降了38.85%和81.67%(图2B和图2C)。



时间为干旱时间节点,分别为干旱 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 和 30 d,复水 1、复水 4、复水 7 分别表示达到干旱时间节点进行复水后的第 1 d、第 4 d、第 7 d;不同小写字母表示同一干旱时间下不同复水时间处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

图 2 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗各器官含水量的影响

Fig.2 Effects of drought stress and rehydration treatments on water content in different organs of betel nut seedlings

2.3 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗根冠比的影响

随着干旱胁迫时间的延长,槟榔幼苗根冠比呈现增长趋势,在干旱 25 d 时达到最大。干旱 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 和 30 d 槟榔幼苗根冠比与同期 CK 处理相比,分别增加了 13.56%、31.48%、31.58%、41.46%、50.88%和 55.10%,均达到显著差异(表 1)。从表 1 还可看出,干旱复水后槟榔幼苗根冠比均有不

同程度的改变;除干旱 5 d 复水后 7 d 槟榔幼苗根冠比能恢复到 CK 水平,其余复水处理槟榔幼苗根冠比均大于同时期 CK,其中干旱 20 d 复水后 7 d 与同时期 CK 相比增加最大,为 78.05%,而干旱 15 d、25 d 和 30 d 处理在复水后 7 d 与同时期 CK 处理相比较分别增大了 10.53%、17.54%和 48.98%,复水效果不明显。

表 1 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗根冠比的影响

Table 1 Effects of drought stress and rehydration treatment on the root-shoot ratio of betel nut seedlings

干旱时间(d)	根冠比				
	对照	干旱结束时	复水 1 d	复水 4 d	复水 7 d
5	0.59±0.03bc	0.67±0.02a	0.64±0.03ab	0.66±0.02a	0.57±0.02c
10	0.54±0.01b	0.71±0.03a	0.74±0.03a	0.74±0.03a	0.74±0.03a
15	0.57±0.03c	0.75±0.02a	0.66±0.03b	0.64±0.01b	0.63±0b
20	0.41±0.05c	0.58±0.02b	0.68±0.08ab	0.64±0.05ab	0.73±0.02a
25	0.57±0.04c	0.86±0.02a	0.86±0.02a	0.70±0.03b	0.67±0.03b
30	0.49±0.05b	0.76±0.06a	0.76±0.02a	0.71±0.03a	0.73±0.01a

数据表示为平均值±标准差,不同小写字母表示同一干旱时间不同复水时间处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

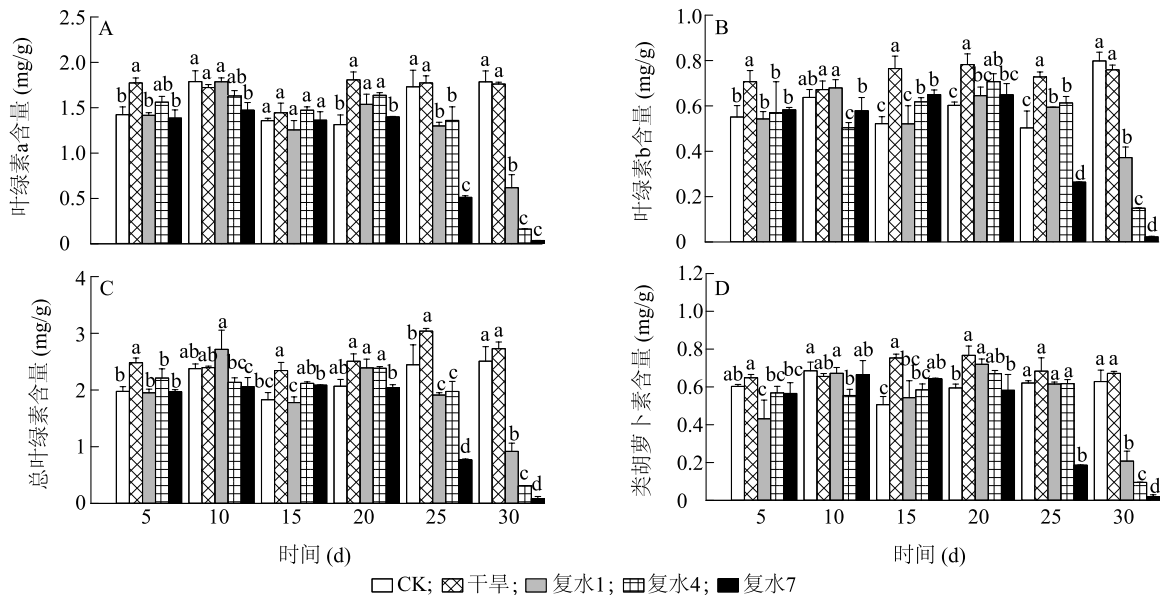
2.4 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗光合生理特性的影响

在干旱试验周期内,较 CK 处理相比,叶绿素 a (Chl.a)、叶绿素 b(Chl.b)、总叶绿素 (TChl.) 和类胡萝卜素 (Car.) 含量的变化趋势存在一定的波动。随

着干旱时间的延长,Chl.a 含量呈现先下降后升高再下降的趋势,在干旱胁迫 5 d 和 20 d 时与同时期 CK 相比差异显著,与 CK 相比分别增加了 24.55%和 37.51%,其余干旱处理与 CK 相比差异不明显(图 3A)。复水后,干旱 5 d、10 d、15 d 和 20 d Chl.a 含

量复水效果显著,但干旱 25 d 和 30 d 的复水效果不明显,复水后 7 d 与同时期 CK 相比下降了 70.40% 和 97.95%。随着干旱时间的延长,不同干旱处理时间之间槟榔幼苗 Chl.b 含量差异不明显,在干旱 5 d、15 d、20 d 和 25 d 时与同时期 CK 相比差异显著,与 CK 相比分别增加了 22.05%、31.75%、23.02% 和 30.88%,其余处理与 CK 相比差异不明显(图 3B)。干旱 5 d、10 d、15 d 和 20 d Chl.b 含量在复水后 7 d 均与 CK 相差明显,但干旱 25 d 和 30 d 的复水后 7 d 与同时期 CK 相比下降了 47.53% 和 97.17%。Tchl.含量随干旱时间延长呈现先下降后上升再下降的趋势,在干旱 25 d 时达到最高;在干旱 5 d、15 d 和 25 d 时与 CK 相比差异显著,与 CK 相比分别增加

了 25.59%、28.20% 和 24.25%,其余处理与 CK 相比差异不显著(图 3C)。干旱 5 d、15 d Tchl.含量在复水后 7 d 均与 CK 相差明显,但干旱 25 d 和 30 d 的复水后 7 d 与同时期 CK 相比 Tchl.含量下降了 70.03% 和 97.03%。Car.在整个干旱试验周期内随着干旱时间增加呈现先上升后下降的趋势;在干旱 15 d 和 20 d 时与 CK 相比差异显著,与 CK 相比分别增加了 22.00% 和 17.59%,其余处理与 CK 相比差异不明显(图 3D)。干旱 5 d、10 d 和 20 d 的 Car.含量在复水后 7 d 均与 CK 差异不明显,但干旱 25 d 和 30 d 的复水后 7 d 与同时期 CK 相比下降了 68.64% 和 96.57%。



时间为干旱时间节点,分别为干旱 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 和 30 d,复水 1、复水 4、复水 7 分别表示达到干旱时间节点进行复水后的第 1 d、第 4 d、第 7 d;不同小写字母表示同一干旱时间不同复水时间处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。

图 3 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗叶绿素含量的影响

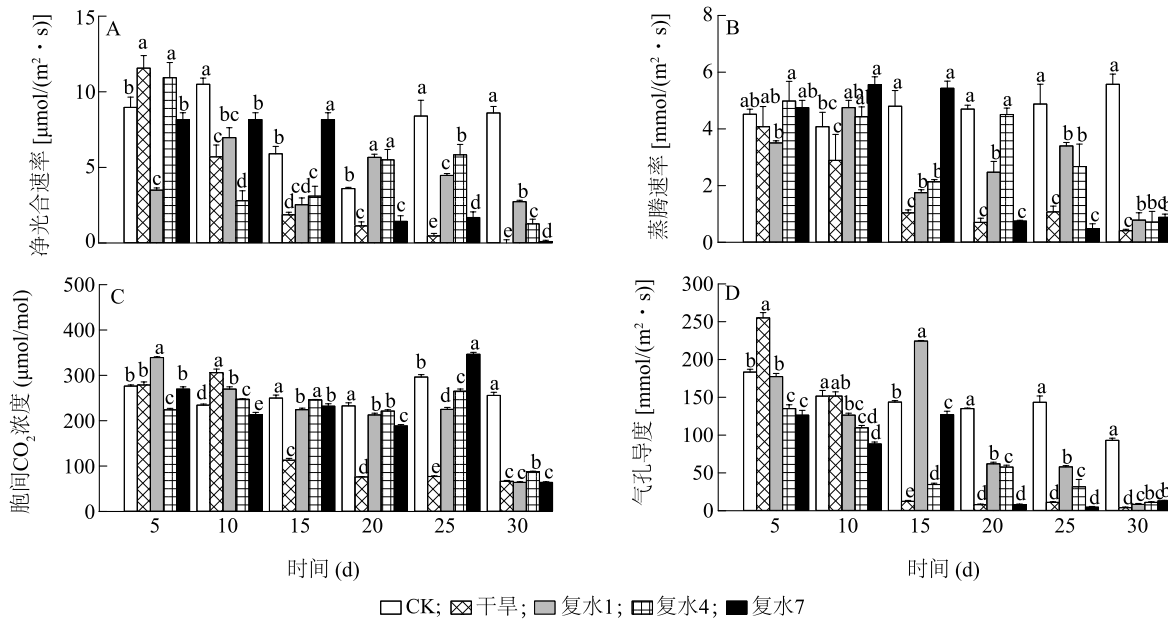
Fig.3 Effects of drought stress and rehydration treatment on the chlorophyll content of betel nut seedlings

由图 4 可知,与干旱 10 d 相比,在干旱 15 d 时, A 、 E 、 C_i 和 G_s 含量显著下降,分别下降了 67.25%、64.01%、63.07% 和 91.87%。在干旱 30 d 时 A 、 E 、 C_i 和 G_s 含量达到最小,与同时期 CK 处理相比分别下降了 100%、92.64%、75.05% 和 95.70%。复水后,干旱胁迫 5 d、10 d 和 15 d 的 A 、 E 和 G_s 复水效果显著;干旱胁迫 20 d、25 d 和 30 d 的复水效果不明显,干旱 30 d 的复水后 7 d A 、 E 和 G_s 与同时期 CK 处理相比较分别下降了 60.18%、84.21% 和 86.02%(图 4A、图 4B、图 4D);干旱胁迫 25 d 的 C_i

复水效果明显,但干旱 30 d 的复水效果不明显,干旱 30 d 复水后 7 d 的 C_i 值与同时期 CK 处理相比下降了 74.97%(图 4C)。

2.5 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗抗氧化酶活性的影响

CAT 活性在干旱 5 d 到 15 d 时逐渐增高,并在干旱 15 d 时达到最高,0.075 U/(g·min),FW,与同时期 CK 相比增加了 317.99%,在干旱胁迫 30 d 时达到最低,0.015 U/(g·min),FW,与同时期 CK 相比减少了 30.47%(图 5A)。 POD 活性在干旱胁迫



时间为干旱时间节点,分别为干旱 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 和 30 d,复水 1、复水 4、复水 7 分别表示达到干旱时间节点进行复水后的第 1 d、第 4 d、第 7 d;不同小写字母表示同一干旱时间不同复水时间处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。

图 4 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗光合作用的影响

Fig.4 Effects of drought stress and rehydration treatment on photosynthesis of betel nut seedlings

迫 15 d 时达到最大值,28.22 U/(g·min),FW,与同时期 CK 相比增加了 44.88%(图 5B)。*SOD* 活性在干旱胁迫 10 d 达到最大值,393.22 U/g,FW,与同时期 CK 相比增加了 9.48%;在干旱胁迫 30 d 达到最低,104.57 U/g,FW,与同时期 CK 相比减少了 62.26%(图 5C)。*SOD* 活性在干旱 5 d、15 d、20 d 和 25 d 的复水效果明显。*POD* 活性在干旱胁迫 15 d 的复水效果明显,干旱胁迫 20 d 的复水效果不明显,但干旱胁迫 25 d 和 30 d 的复水后出现超补偿现象,干旱 30 d 的复水后 4 d 达到最大值,46.34 U/(g·min),FW,显著高于同时期 CK。

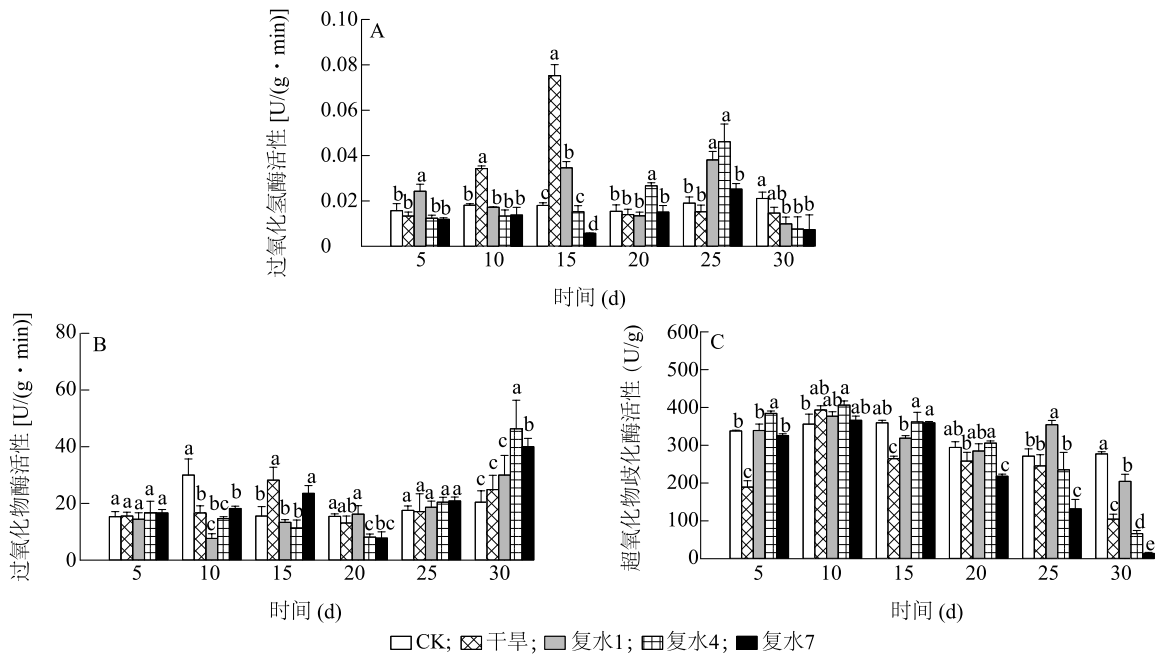
2.6 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗丙二醛和脯氨酸含量的影响

随着干旱胁迫时间的延长,槟榔幼苗 MDA 含量总体呈现先增高后降低的趋势,Pro 含量总体呈现逐渐增高的趋势(图 6)。在干旱胁迫 5 d、10 d、15 d 和 20 d 时 MDA 含量与 CK 相比差异不显著,但干旱 20 d 后 MDA 含量逐渐增高,并在 25 d 时达到最高,0.036 μmol/L,与干旱 20 d 的相比增加了 61.59%(图 6A);Pro 含量在干旱前期呈逐渐增高趋势,在干旱 25 d 时显著增高,与干旱 20 d 相比增加了 79.81%,在干旱 30 d 时达到最高,799.8

μg/g,与同时期 CK 相比增加了 1 029.60%(图 6B)。干旱 5 d、10 d、15 d 和 20 d 复水后 MDA 含量可恢复到 CK 水平,恢复效果明显;但干旱 25 d 和 30 d 的复水效果不明显,干旱 30 d 的复水后 7 d 与同时期 CK 相比 MDA 含量增加了 77.17%。Pro 含量在干旱 5 d、10 d 和 15 d 时复水效果明显;在干旱 20 d、25 d 和 30 d 时进行复水处理后 Pro 含量仍远高于同期 CK,复水效果不明显;在干旱 30 d 复水后 7 d 达到最大值,717.95 μg/g,与同时期 CK 处理相比增加了 913.99%。

2.7 槟榔幼苗形态指标和生理特性指标的相关性

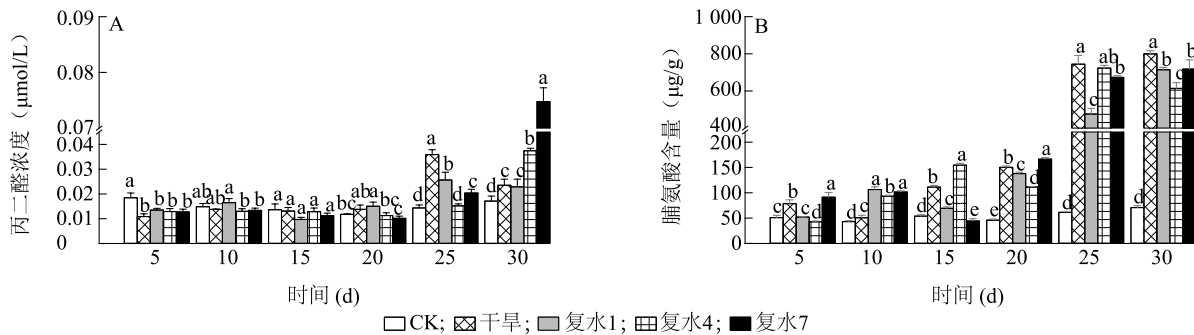
表 2 结果显示,对于不同干旱胁迫时间下的槟榔幼苗形态和生理特性进行了 Pearson 相关性分析。结果表明,在不同的干旱胁迫时间下,光合指标(A 、 E 、 C_i 和 G_s)之间存在显著正相关关系,并且与土壤、根和核的含水量也呈现显著正相关。形态指标(根、茎、叶和核的含水量)之间也存在显著正相关关系,但根冠比与根、核的含水量之间呈显著负相关关系。此外,MDA 与 Pro 之间存在显著正相关关系,而它们与根、茎、叶的含水量之间则呈极显著或显著的负相关关系,同时与类胡萝卜素之间呈极显著或显著正相关关系。



时间为干旱时间节点,分别为干旱 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 和 30 d,复水 1、复水 4、复水 7 分别表示达到干旱时间节点进行复水后的第 1 d、第 4 d、第 7 d;不同小写字母表示同一干旱时间不同复水时间处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

图 5 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗的抗氧化酶活性影响

Fig.5 Effects of drought stress and rehydration treatment on the antioxidant enzyme activity of betel nut seedlings



时间为干旱时间节点,分别为干旱 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 和 30 d,复水 1、复水 4、复水 7 分别表示达到干旱时间节点进行复水后的第 1 d、第 4 d、第 7 d;不同小写字母表示同一干旱时间不同复水时间处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

图 6 干旱胁迫及复水处理对槟榔幼苗丙二醛和脯氨酸含量的影响

Fig.6 Effects of drought stress and rehydration treatment on malondialdehyde content and proline content in betel nut seedlings

3 讨论

3.1 干旱胁迫及复水对槟榔幼苗形态指标的影响

土壤含水量是影响根冠比的重要因素之一,根冠比作为植物体生长状态指标之一,能够反映植物根部生物量和地上生物量的生长关系^[15-16]。本研究发现,随着干旱时间的延长,槟榔幼苗根冠比逐渐增大;除干旱 5 d 复水后根冠比能恢复到对照(CK)水平,干旱 10 d、15 d、20 d、25 d 和 30 d 复水后均与 CK 差异显著,这与李洪立等^[17]对水分胁迫下槟榔

幼苗生长的研究结果一致。王艺等^[18]在对马尾松苗的研究中也表明了干旱胁迫能显著提高植物根冠比。这是因为在干旱胁迫下,植物根尖的生长受到抑制,为适应胁迫以尽可能吸收到水分,植物根系分枝增多、细根根长和根表面积增加,导致地下部分增大^[19-21]。本研究中,在干旱 5 d 后复水可使槟榔幼苗根冠比恢复至 CK 水平,这是因为轻度干旱胁迫对槟榔幼苗根系影响不大,在复水后槟榔幼苗由根系生长占优势迅速转变为冠层部分生长占优势,根系生长速率相对减慢,根冠比减小。该结论与杨彪

生等的研究结果一致^[22]。其余处理复水后 7 d 根冠比仍高于 CK 水平,可能是干旱胁迫对槟榔幼苗影响较大,在复水后需要更长时间才能恢复。

表 2 干旱胁迫时间与槟榔幼苗形态和生理特性 Pearson 相关性分析
Table 2 Pearson correlation analysis between drought stress duration and morphological and physiological characteristics of betel nut seedlings

项目	根冠比	根含水量	茎含水量	叶含水量	核含水量	土壤含水量	净光合速率	蒸腾速率	胞间 CO ₂ 浓度	气孔导度	叶绿素 A	叶绿素 B	叶绿素总量	类胡萝卜素	过氧化氢酶	过氧化物歧化酶	超氧化物歧化酶	丙二醛	脯氨酸
根冠比	1.000																		
根含水量	-0.858 *	1.000																	
茎含水量	-0.796	0.936 **	1.000																
叶含水量	-0.771	0.881 *	0.983 **	1.000															
核含水量	-0.906 *	0.991 **	0.937 **	0.900 *	1.000														
土壤含水量	-0.761	0.916 *	0.749	0.654	0.886 *	1.000													
净光合速率	-0.743	0.905 *	0.726	0.631	0.875 *	0.998 **	1.000												
蒸腾速率	-0.732	0.880 *	0.680	0.609	0.864 *	0.965 **	0.976 **	1.000											
胞间 CO ₂ 浓度	-0.755	0.880 *	0.698	0.649	0.881 *	0.857 *	0.872 *	0.934 **	1.000										
气孔导度	-0.690	0.871 *	0.657	0.563	0.839 *	0.975 **	0.985 **	0.989 **	0.916 *	1.000									
叶绿素 A	0.555	-0.109	-0.232	-0.297	-0.213	0.089	0.124	0.141	0.051	0.208	1.000								
叶绿素 B	0.479	-0.538	-0.289	-0.277	-0.558	-0.602	-0.639	-0.784	-0.865 *	-0.741	-0.183	1.000							
叶绿素总量	0.185	-0.239	0.110	0.201	-0.215	-0.494	-0.535	-0.621	-0.603	-0.648	-0.406	0.803	1.000						
类胡萝卜素	0.742	-0.753	-0.848 *	-0.824 *	-0.766	-0.473	-0.441	-0.374	-0.515	-0.380	0.480	0.080	-0.241	1.000					
过氧化氢酶	-0.578	0.171	0.311	0.394	0.279	-0.083	-0.115	-0.109	0.032	-0.186	-0.981 **	0.103	0.422	-0.554	1.000				
过氧化物酶	-0.172	-0.302	-0.291	-0.289	-0.233	-0.347	-0.370	-0.410	-0.331	-0.409	-0.776	0.322	0.163	-0.127	0.688	1.000			
超氧化物歧化酶	-0.372	0.408	0.499	0.620	0.475	0.133	0.143	0.288	0.499	0.182	-0.198	-0.507	0.088	-0.388	0.371	-0.311	1.000		
丙二醛	0.698	-0.818 *	-0.888 *	-0.829 *	-0.799	-0.603	-0.571	-0.472	-0.545	-0.504	0.279	0.064	-0.177	0.961 **	-0.336	0.042	-0.250	1.000	
脯氨酸	0.765	-0.881 *	-0.985 **	-0.992 **	-0.895 *	-0.634	-0.609	-0.579	-0.646	-0.545	0.305	0.250	-0.211	0.881 *	-0.405	0.247	-0.599	0.883 *	1.000

*, ** 分别表示达到 0.05 显著水平、0.01 极显著水平。

3.2 干旱胁迫及复水对槟榔幼苗光合及生理指标的影响

3.2.1 干旱胁迫及复水对槟榔幼苗叶绿素含量及光合作用的影响 叶绿素是光合作用的必需催化剂,在光能吸收和运输中起着必不可少的作用^[23]。本研究发现,随着干旱时间的延长,Chl.a、Chl.b、Car. 和 TChl. 含量在干旱 5 d、10 d、15 d 和 20 d 4 个时间节点差异均不明显,复水后效果明显,但干旱 25 d 和 30 d 复水后 Chl.a、Chl.b、Car. 和 TChl. 含量均呈现下降状态,这与 Simkin 等研究结果一致,这是因为轻度干旱胁迫对槟榔幼苗的叶绿素含量虽

有影响,复水后幼苗能够通过自身代谢恢复到 CK 水平;但长期干旱胁迫会导致叶绿素降解或合成减少,进而影响槟榔幼苗叶片对光能的吸收和利用,使光合电子传递等功能受到破坏,无法在短时间内恢复^[24]。同时,李晗等的研究结果也显示,在重度干旱胁迫下,槟榔幼苗合成叶绿素的叶绿素酯含量也会降低,补水后短期内补偿效果并不明显^[25]。

光合作用决定着植物生长和发育,是影响植物生存的重要生理过程^[26]。本研究结果表明:在干旱胁迫 20 d 后,槟榔幼苗的 A、E、C_i 和 G_s 均显著下降,并在复水后补

偿效果均不明显。其原因在于,干旱初期由于 C_i 较高, G_s 内部较大, A 受到的影响并不大, 槟榔幼苗叶绿素结构尚未遭到严重破坏。槟榔幼苗主要是通过调节气孔大小来减少水分散失, 此时 A 下降主要受气孔限制。干旱 25 d, 此时非气孔因素成为 A 下降的主要限制因素, 槟榔幼苗靠自身调节难以恢复到正常水平^[27-28]。这与厉广辉等研究结果相一致, 在干旱前期复水后, 植物会迅速作出反应, 以弥补胁迫过程中造成的损失; 而重度干旱胁迫下, 植物的光合器官及其生理机能已经受到一定程度的损坏, 复水后气孔限制和代谢损伤依然存在, 各项指标无法恢复到正常生理水平^[29]。

3.2.2 干旱胁迫及复水对槟榔幼苗抗氧化酶活性的影响

抗氧化酶是细胞对抗活性氧伤害的重要保护酶。当植物受到非生物因素胁迫时, 会通过改变酶活性来减少植物体自身的损伤^[30]。在本研究中, 槟榔幼苗随着干旱胁迫时间的延长, 抗氧化酶活性总体上呈先升后降的趋势。其中, 在干旱 15 d 时过氧化物酶和过氧化氢酶活性达到最大值, 而超氧化物歧化酶活性则在干旱 10 d 时达到最大值。这与刘艳菊等^[31]抗旱处理对棕榈科植物的研究结果一致; Wang^[32]也在葡萄幼苗干旱研究中发现了类似的结果, 即干旱前期抗逆性酶活性随着干旱时间增加逐渐升高, 这是因为外界胁迫条件刺激幼苗产生更多的酶来清除体内的 H_2O_2 、酚类和胺类等毒性物质。一般来说, 轻度干旱后复水能恢复到正常状态, 但在遭受到重度干旱胁迫时, 该酶的辅基等结构遭到破坏, 导致含量显著下降, 复水后无法恢复到 CK 水平。

3.2.3 干旱胁迫及复水对槟榔幼苗丙二醛和脯氨酸含量的影响 MDA 是膜脂过氧化的终产物之一, 当植物遭受胁迫时, 抗氧化酶迅速增加以应对因抗逆胁迫而产生的自由基和 H_2O_2 , 但随着胁迫强度逐渐增加, 膜脂过氧化伤害加大, 抗氧化酶合成减少, 致使 MDA 含量逐渐增加, 所以 MDA 是植物抗逆性的一个重要指标^[33]。本研究中, MDA 含量随干旱胁迫时间的延长呈现先增高后降低的趋势; 在干旱 20 d 前各干旱时间节点 MDA 含量增加不明显, 但在干旱 25 d 和 30 d MDA 含量显著增加, 且复水后仍高于同期 CK 水平, 与前述抗氧化酶研究结果相符, 这与黄旭光在对朱槿干旱胁迫过程中发现的结果一致^[34]。刘建新等^[35]在对苜蓿进行干旱胁迫后也发现, MDA 含量与干旱胁迫时长和强度呈正相关关系。这是因为随着干旱强度增加, 槟榔幼苗体内的抗氧化酶活性降低, 导致活性 O_2 产生和清除之间的平衡被破坏, 从而加速了 MDA 的积累。当 MDA 含量超过一定值时, 会引

发槟榔幼苗细胞内大分子物质发生过氧化反应, 进而影响槟榔幼苗的正常生长。

Pro 具有亲水性, 可以防止细胞体内的水分散失。当作物受到干旱胁迫时, Pro 能够迅速增加, 从而帮助细胞或组织更好地保持水分, 防止因脱水而影响作物正常生长发育^[36]。本研究发现, 槟榔幼苗 Pro 含量随胁迫时间延长呈现逐渐增高趋势。这与高鹏飞等在光叉委陵菜^[37]、陈翠红等在侧金盏花^[38]等上的研究结果一致。

4 结 论

干旱胁迫 20 d 内, 土壤和槟榔各器官含水量下降, 抗氧化酶活性和根冠比升高, MDA、Pro 含量和光合作用等指标也逐渐增高, 此时槟榔幼苗生理结构并未遭到破坏, 在复水后可通过自我调节来恢复正常生长; 但干旱胁迫 20 d 后, 槟榔幼苗生理结构遭到破坏, 各器官含水量持续下降, 抗氧化酶失活, MDA 在植物体内大量堆积, 光合作用受到抑制, 从而导致幼苗生长缓慢甚至停止生长、萎蔫甚至死亡, 复水后无法恢复到正常状态。因此, 槟榔幼苗受到干旱胁迫 20 d 内应及时复水, 否则会造成槟榔幼苗干旱死亡。

参考文献:

- [1] 张琳, 李欢欢, 于淑坤, 等. 番茄 *Sl WDR204* 基因正调控植物干旱胁迫[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(1): 96-98, 114.
- [2] JALEEL C A, GOPI R, SANKAR B, et al. Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress[J]. Comptes Rendus Biologies, 2008, 331(1): 42-47.
- [3] 王艺, 杨凯来. 菌根化马尾松苗生长形态对干旱及复水响应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(8): 1794-1801.
- [4] 张明聪, 何松榆, 秦彬, 等. 外源褪黑素缓解干旱胁迫对春大豆苗期影响的生理调控效应[J]. 大豆科学, 2020, 39(5): 742-750.
- [5] DONG S K, JIANG Y Z, DONG Y C, et al. A study on soybean responses to drought stress and rehydration[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(8): 2006-2017.
- [6] 周欢欢, 傅卢成, 马玲, 等. 干旱胁迫及复水对“波叶金桂”生理特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(4): 687-696.
- [7] FURLAN A, BIANUCCI E, TORDABLE M D C, et al. Dynamic responses of photosynthesis and the antioxidant system during a drought and rehydration cycle in peanut plants[J]. Funct Plant Biol, 2016, 43(4): 337-345.
- [8] CHAKHCHAR A, LAMAOU M, AISSAM S, et al. Differential physiological and antioxidative responses to drought stress and re-

- covery among four contrasting *Argania spinosa* ecotypes [J]. J Plant Interactions, 2016, 11(1): 1-33.
- [9] 姜 鹏, 秦美欧, 蔡 福, 等. 干旱-复水联动对东北春玉米光合生理与产量的影响[J]. 干旱气象, 2023, 41(2): 207-214.
- [10] 广东省植物研究所. 海南植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1977: 169-170.
- [11] 曹红星, 冯美利, 孙程旭, 等. 低温及干旱胁迫对槟榔幼苗生理生化特性的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(3): 832-835.
- [12] 陈 歆. 土壤水分胁迫对槟榔幼苗生理生态特性的影响[D]. 海口: 海南大学, 2010.
- [13] 袁赫奕, 陈明婉, 戚金存, 等. 氮肥形态与用量对槟榔幼苗形态和生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(16): 5553-5563.
- [14] 王燕凌, 刘 君, 齐曼·尤努斯, 等. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 14-15.
- [15] CLARIDGE K, FRANKLIN S B. Compensation and plasticity in an invasive plant species[J]. Biological Invasions, 2002, 4(4): 339-347.
- [16] 单立山, 李 毅, 石万里, 等. 土壤水分胁迫对红砂幼苗生长和渗透调节物质的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 106-109.
- [17] 李洪立, 李 琼, 杨福孙, 等. 水分胁迫对槟榔幼苗根系形态与活力的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(11): 2016-2019.
- [18] 王 艺, 杨凯来. 菌根化马尾松苗生长形态对干旱及复水响应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(8): 1794-1801.
- [19] 李文晓, 张岁岐, 丁圣彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [20] 严四英, 翁白莎, 景兰舒, 等. 干旱及早后复水对夏玉米根系生长的影响[J]. 节水灌溉, 2022(3): 75-81, 91.
- [21] 方明月, 汪溢磐, 赵 奕, 等. 低温干旱复合胁迫对8个紫花苜蓿品种形态和生理特征的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(11): 2967-2974.
- [22] 杨彪生, 单立山, 马 静, 等. 红砂幼苗生长及根系形态特征对干旱-复水的响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 469-478.
- [23] 张俊杰, 陈金平, 汤钰镭, 等. 花期前后干旱胁迫对复水后夏玉米光合特性与产量的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1397-1409.
- [24] SIMKIN A J, KAPOOR L, DOSS C G P, et al. The role of photosynthesis-related pigments in light harvesting, photoprotection, and enhancement of photosynthetic yield in planta[J]. Photosynthesis Research, 2022, 152: 23-42.
- [25] 李 晗, 杨福孙, 张 瀚. 不同灌水量对槟榔光合特性及产量的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(9): 3091-3101.
- [26] 刘雯霞, 夏素娟, 穆若兰, 等. 黄土高原中部三种典型绿化植物光合特性的季节变化[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4098-4109.
- [27] 吴俊文, 刘 珊, 李吉跃, 等. 干旱胁迫下广东石漠化地区造林树种光合和耗水特性[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3429-3440.
- [28] 姚庆群, 谢贵水. 干旱胁迫下光合作用的气孔与非气孔限制[J]. 热带农业科学, 2005(4): 80-85.
- [29] 厉广辉, 万勇善, 刘凤珍, 等. 苗期干旱及复水条件下不同花生品种的光合特性[J]. 植物生态学报, 2014, 38(7): 729-739.
- [30] 袁有波, 李继新, 丁福章, 等. 不同干旱胁迫对烟草叶片保护酶活性的影响[J]. 中国烟草科学, 2009, 30(5): 10-13.
- [31] 刘艳菊, 曹红星. 棕榈科植物抗寒、抗旱生理生化研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(22): 46-50.
- [32] WANG M J, LIANG W W, FAN L L, et al. Physiological response of *Vitis amurens* Rupr. Seedlings to drought stress and re-watering[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 697(1): 012032.
- [33] DONG S K, JIANG Y Z, DONG Y C, et al. A study on soybean responses to drought stress and rehydration[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(8): 2006-2017.
- [34] 黄旭光, 黄玲璞, 王卫南, 等. 干旱胁迫及复水对朱槿幼苗生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(21): 137-139, 150.
- [35] 刘建新, 王 鑫, 王凤琴. 水分胁迫对苜蓿幼苗渗透调节物质积累和保护酶活性的影响[J]. 草业科学, 2005(3): 18-21.
- [36] 周宜君, 冯金朝, 马文文, 等. 植物抗逆分子机制研究进展[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2006(2): 169-176.
- [37] 高鹏飞, 张 静, 范卫芳, 等. 干旱胁迫对光叶委陵菜根系特征、结构和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(2): 203-212.
- [38] 陈翠红, 周蕴薇, 李家琦, 等. 干旱胁迫对侧金盏花生理特性的影响[J]. 福建农业学报, 2021, 36(5): 532-541.

(责任编辑: 黄克玲)