

黑果枸杞种子萌发对 PEG 模拟干旱胁迫的响应

郭有燕^{1,2}, 余宏远¹, 孔东升¹, 张亚娟¹, 吴佳豫³

(1. 河西学院 河西学院黑果枸杞工程中心, 甘肃 张掖 734000; 2. 河西学院
甘肃省河西走廊特色资源利用重点实验室, 甘肃 张掖 734000; 3. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 研究干旱胁迫对黑果枸杞种子萌发及幼苗生长的影响, 为黑果枸杞人工栽培提供理论依据。[方法] 通过聚乙二醇 (polyethylene glycol, PEG) 模拟干旱胁迫, 测定不同干旱胁迫强度下黑果枸杞种子的萌发进程、发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、幼苗的生长、幼苗渗透调节物质、叶绿素含量等指标, 研究干旱胁迫对黑果枸杞种子萌发及幼苗生长的影响。[结果] 干旱胁迫不利于黑果枸杞种子的萌发, 重度干旱胁迫推迟其萌发的高峰期; 干旱胁迫下黑果枸杞种子的发芽率、发芽势均呈下降趋势, -0.6 MPa 处理下, 黑果枸杞种子发芽率、发芽势相对对照分别降低 72.06% 和 74.07%; 干旱胁迫对黑果枸杞种子发芽指数和活力指数有抑制作用, 其抑制程度随干旱胁迫强度的增加而增加; 适度干旱胁迫有利于黑果枸杞幼苗胚根和胚芽的生长, 而中度、重度干旱胁迫不利于幼苗胚芽的生长; 干旱胁迫下黑果枸杞幼苗根、芽脯氨酸含量和可溶性糖含量均随着胁迫程度的增加逐渐增加, 而幼苗叶绿素含量 (Chl a+b) 随干旱胁迫强度的增加逐渐降低。[结论] 干旱胁迫对黑果枸杞种子萌发及幼苗生长有重要影响, 适度的干旱胁迫有利于黑果枸杞幼苗的生长。

关键词: 黑果枸杞; 种子萌发; 干旱胁迫; 渗透调节

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0098-05

中图分类号: Q945.79

文献参数: 郭有燕, 余宏远, 孔东升, 等. 黑果枸杞种子萌发对 PEG 模拟干旱胁迫的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 98-102. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.017; Guo Youyan, Yu Hongyuan, Kong Dongsheng, et al. Response of seed germination of *Lycium ruthenicum* to PEG-simulated drought stress [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 98-102. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.017

Response of Seed Germination of *Lycium Ruthenicum* to PEG-Simulated Drought Stress

GUO Youyan^{1,2}, YU Hongyuan¹, KONG Dongsheng¹, ZHANG Yajuan¹, WU Jiayu³

(1. Engineering Center of *Lycium Ruthenicum*, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China;
2. Key Laboratory of Hexi Corridor Resources Utilization of Gansu, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China; 3. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] To study the response of seed germination and seedling growth of *Lycium ruthenicum* to PEG (polyethylene glycol)-simulated drought stress, and to provide a theoretical basis for artificial cultivation of *L. ruthenicum*. [Methods] PEG-6000 solution was used to simulate drought stress. Seed germination progress, germination percentage, germination potential, germination index, vital index, seedling growth, seedling osmotic adjustment substances, and chlorophyll II content under water stress were recorded. The effects of drought stress on seed germination and seedling growth of *L. ruthenicum* were studied. [Results] Drought stress was disadvantaged to seed germination of *L. ruthenicum*, and the severe drought stress will delay the fastigium of *L. ruthenicum* seed germination. Seed germination percentage and germination potential decreased with the increasing level of drought stress. Under -0.6 MPa treatment, germination percentage

收稿日期: 2016-12-14

修回日期: 2017-03-11

资助项目: 国家自然科学基金地区项目“荒漠药用植物黑果枸杞实生苗更新过程的生态学研究”(31460189), “黑果枸杞无性成苗的生态过程及生殖选择研究”(31660193); 甘肃省高等学校科研项目“荒漠药用植物黑果枸杞对干旱胁迫的适应能力和适应机制研究项目”(2014A-111)

第一作者: 郭有燕(1980—), 女(汉族), 宁夏回族自治区中卫市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事天然林保护与利用研究。E-mail: guoyouyan_2008@163.com。

通信作者: 余宏远(1981—), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 硕士, 讲师, 主要从事林地恢复及测绘研究。E-mail: yhy_2000_113@163.com。

and germination potential decreased by 72.06% and 74.07% as compared to the one of control treatment. Germination index and vital index were restrained under drought stress, and the restraining degree increased with the increasing of drought stress. The moderate drought stress was beneficial to the growth of radicle and germ, however, it wasn't beneficial to the growth of germ under medium and severe drought stress. Proline and soluble sugar of seedling root and shoot increased with the increasing drought stress level. However, chlorophyll content decreased with the increasing drought stress level. [Conclusion] Drought stress had important effect to the seed germination and seedling growth of *L. ruthenicum*, and the moderate drought stress was beneficial to the growth of *L. ruthenicum* seedling.

Keywords: *Lycium ruthenicum*; seed germination; drought stress; osmoregulation

种子萌发阶段是植物生命周期中最脆弱、最关键的阶段,也是对逆境最敏感的阶段^[1],因为这个阶段会严重影响幼苗的定居。在这样的选择压力下,不同植物有着不同的生活史对策,最大目的是在有利的条件下增加幼体数量,同时减少不利条件下个体死亡风险^[2]。种子萌发的过程通常被许多内在和外在的因素所影响。干旱胁迫会推迟种子的萌发或降低种子的发芽力,因此,它是种子发芽过程中的一个主要的限制性因素^[3-5]。这主要由于干旱胁迫增加了渗透压,降低了衬质势,从而使种子发芽困难^[6]。种子萌发对干旱的响应反映了植物适应逆境的生态机制。因此,研究特殊生境植物的种子萌发特性,对该区域植被恢复具有重要意义。

黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)为茄科枸杞属多棘刺灌木,多年生抗旱、耐盐植物,多分布于沙地、盐碱荒地或路旁,是中国荒漠地区地带性植被的主要建群树种^[7]。果实富含紫红色素、蛋白质、枸杞多糖等多种营养成分,药用、保健价值高于红枸杞,被誉为植物“软黄金”^[8]。当前有关黑果枸杞的研究主要集中在营养成分分析^[9]、多糖的提取^[10]、遗传多样性^[11-12]等方面。而有关黑果枸杞种子萌发、幼苗生长对逆境的响应研究相对较少,且主要集中在盐胁迫上,Chen等^[13]、王桔红等^[14]、韩多红等^[15]、王恩军等^[16]分别从盐胁迫对黑果枸杞种子萌发、幼苗生长进行了研究。野外调查发现,黑果枸杞结实量大,但实生苗数量少,是否干旱影响黑果枸杞种子的萌发,此类研究报道较少。而这可以从根本上阐明黑果枸杞种子萌发适应干旱环境的机理。因此,本文拟研究干旱胁迫对黑果枸杞种子萌发及幼苗生长的影响,以期在黑果枸杞人工栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

黑果枸杞种子于 2015 年 9 月采自甘肃省张掖市荒漠盐碱地上。种子采集后,人工去除果肉、自然风干后备用。挑选饱满一致的种子,置于 4 ℃ 条件下沙

藏处理。15 d 之后水筛种子,并用 5% NaClO 消毒 3 min,蒸馏水冲洗 6 次。

1.2 干旱胁迫处理

干旱胁迫由 PEG 模拟干旱胁迫产生。模拟干旱的 PEG 溶液(聚乙二醇,分子量 6 000)采用 Michel 和 Kaufmann^[17]的方法配制。溶液的渗透势设置 0 (对照),-0.1,-0.2,-0.4,-0.6 MPa 的 PEG 溶液共 5 个处理。各处理培养皿中铺 2 张用 PEG 溶液浸湿的滤纸,然后于其上摆放种子。每天以称重法补充蒸馏水以维持溶液渗透势恒定。每个培养皿中放 30 粒种子,重复 3 次,置于恒温培养箱中,设定温度为 25 ℃,光照时间为 12 h,光照强度为 2 000 lx。以肉眼看到白色幼根为标准判断种子是否萌发,每天观察统计萌发数,发芽持续 14 d,计算发芽率、发芽指数、活力指数,并测定幼苗的胚芽(包括胚轴与顶芽)和初生根长度。

发芽率 = 发芽种子数 / 供试种子数

日相对萌发率 = 相应各日正常发芽种子数 / 供试种子数 × 100%

发芽势(GE) = $N_m / N \times 100\%$

式中: N_m ——种子发芽达到高峰期时种子发芽粒数(个); N ——供试种子数(个)。

发芽指数(I_G) = $\sum(G_t / D_t)$

式中: G_t ——日发芽数(个); D_t ——发芽天数(d)。

活力指数(I_v) = $I_G \times l_r$

式中: l_r ——平均初生根长; I_G ——发芽指数。

1.3 生理指标测定

叶绿素含量采用丙酮浸提法测定^[18];叶片脯氨酸含量采用磺基水杨酸提取茚三酮显色法测定^[19];叶片可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[18]。UV-2450 型紫外可见分光光度计测定吸光值,测定均重复 3 次。

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 对数据进行非参数检验分析。用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对黑果枸杞种子萌发进程的影响

从图 1 中可以看出,干旱胁迫影响黑果枸杞种子萌发高峰的出现时间及峰值的大小。在发芽试验的第 1 d 时 CK 开始萌发,且达到高峰期,之后黑果枸杞种子萌发率逐渐降低,这说明在水分充足的情况下,黑果枸杞种子采取集中萌发的方式适应环境。在 -0.1 MPa 处理下,发芽高峰期出现在第 2 d;在 -0.2 MPa 处理下,发芽高峰期出现在第 2 d,第 3 d; -0.4 MPa 处理下,发芽高峰期出现在第 2 d,第 5 d; -0.6 MPa 处理下,发芽高峰期出现在第 6 d。随着 PEG 浓度的增加,黑果枸杞种子首次萌发的时间和萌发高峰期推迟。

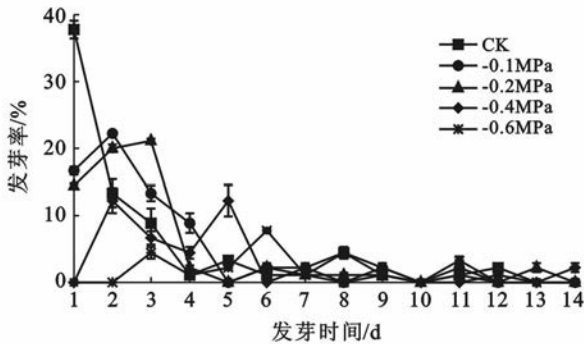


图 1 干旱胁迫下黑果枸杞种子的发芽率

2.2 干旱胁迫对黑果枸杞种子发芽率和发芽势的影响

从表 1 可以看出,黑果枸杞种子发芽率、发芽势随干旱胁迫强度的增加呈下降趋势。-0.4 MPa, -0.6 MPa 处理下,黑果枸杞种子发芽率、发芽势显著降低 ($p < 0.05$)。与 CK 相比, -0.1 MPa 处理下,黑果枸杞种子发芽率、发芽势分别降低 7.36% 和 1.85%; -0.2 MPa 处理下,黑果枸杞种子发芽率、发芽势分别降低 11.77% 和 3.7%; -0.4 MPa 处理下,黑果枸杞种子发芽率、发芽势分别降低了 36.77% 和 40.73%; -0.6 MPa 处理下,黑果枸杞种子发芽率、发芽势分别降低了 72.06% 和 74.07%。

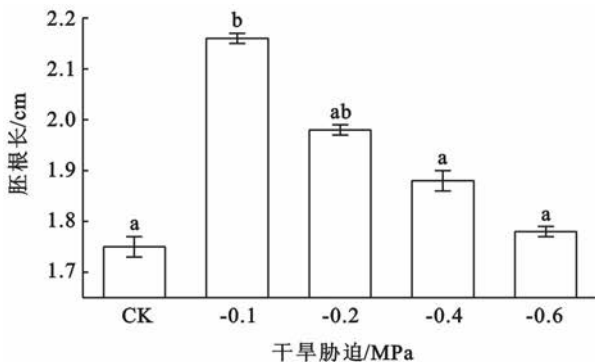


表 1 水分胁迫对黑果枸杞种子萌发的影响

水分胁迫/MPa	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	活力指数
CK	75.56±9.88 ^a	60.00±13.33 ^a	14.90±2.07 ^a	26.03±3.34 ^a
-0.1	70.00±5.09 ^a	58.89±2.89 ^a	10.77±0.57 ^b	23.59±5.54 ^a
-0.2	66.67±3.85 ^a	57.78±2.22 ^a	9.93±0.52 ^b	19.60±0.74 ^a
-0.4	47.78±4.84 ^b	35.56±4.01 ^b	3.98±0.61 ^c	7.50±0.31 ^b
-0.6	21.11±4.01 ^c	15.56±4.01 ^b	1.23±0.35 ^c	2.23±0.67 ^b

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著。下同。

2.3 干旱胁迫对黑果枸杞种子发芽指数和活力指数的影响

干旱胁迫对黑果枸杞种子发芽指数和活力指数有抑制作用,其抑制程度随干旱胁迫强度的增加而增加(表 1)。与对照处理相比, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6 MPa 处理下,黑果枸杞种子发芽指数分别降低 27.72%, 33.36%, 73.29% 和 91.74%。干旱胁迫处理下的黑果枸杞种子发芽指数与对照处理差异均显著 ($p < 0.05$)。与对照处理相比, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6 MPa 处理下,黑果枸杞种子活力指数分别降低 9.37%, 24.70%, 71.18% 和 91.43%。-0.4 MPa 和 -0.6 MPa 处理下的黑果枸杞种子活力指数与其他处理差异显著 ($p < 0.05$)。

2.4 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗生长的影响

轻度干旱胁迫有利于黑果枸杞幼苗的生长,随着干旱胁迫强度的增加,黑果枸杞幼苗生长受到抑制(图 2)。-0.1 MPa 处理下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽的长度与 CK 相比,分别增加 23.43% 和 15.69%; -0.2 MPa 处理下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽的长度与 CK 相比,分别增加 13.14% 和 1.96%; -0.4 MPa 处理下,黑果枸杞幼苗胚根相对 CK 增加 7.43%, 而胚芽降低 1.96%; -0.6 MPa 处理下,黑果枸杞幼苗胚根相对 CK 增加 1.71%, 而胚芽降低 3.92%。这说明适度干旱胁迫有利于黑果枸杞幼苗胚根和胚芽的生长,而中度、重度干旱胁迫不利于幼苗胚芽的生长。

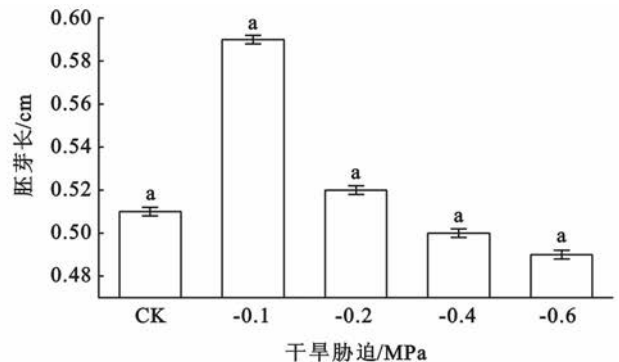


图 2 干旱胁迫下黑果枸杞幼苗生长的变化

2.5 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗渗透调节物质的影响

干旱胁迫下黑果枸杞幼苗根、芽脯氨酸含量和可溶性糖含量均随着胁迫程度的增加逐渐增加,且各处理间差异显著($p < 0.05$,表2)。轻度干旱胁迫下,脯氨酸含量相对对照增加幅度较低,中度、重度胁迫处理下,脯氨酸含量较对照大幅度增加,在重度胁迫处理下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽脯氨酸含量最高。这表明,干旱胁迫程度越高,脯氨酸积累越明显。-0.1 MPa 处理下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽可溶性糖含量较对照分别增加 85.83%和 22.22%;-0.2 MPa 处理下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽可溶性糖含量较对照分别增加 143.33%和 55.56%;-0.4 MPa 处理下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽可溶性糖含量较对照分别增加 179.17%和 86.11%;-0.6 MPa 处理下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽可溶性糖含量较对照分别增加 245.83%和 194.44%。重度胁迫处理下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽可溶性糖含量最高。

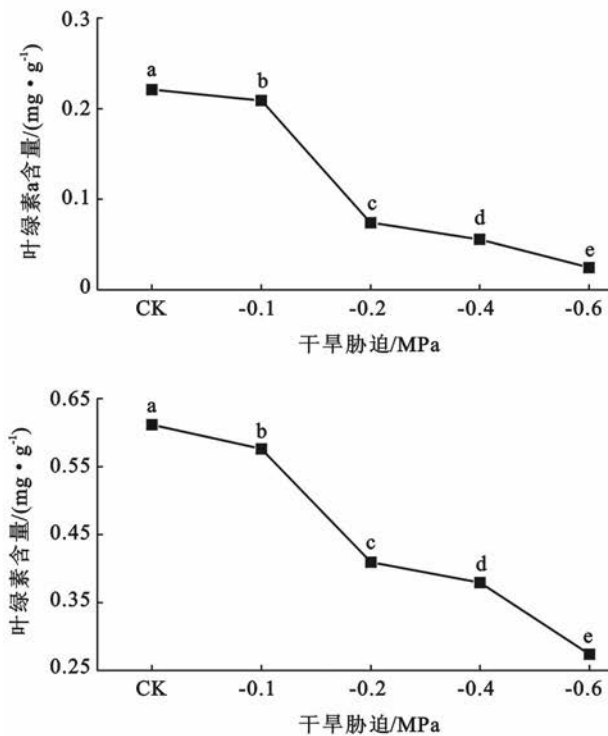


图3 干旱胁迫下黑果枸杞幼苗叶绿素含量的变化

3 讨论

水分是植物生长和植被分布重要的制约因素,也是种子萌发的关键生态因子^[20]。PEG 模拟干旱胁迫对黑果枸杞种子萌发有抑制作用,推迟了黑果枸杞种子萌发的高峰期。随着 PEG 浓度的增加,黑果枸杞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数逐渐降低。

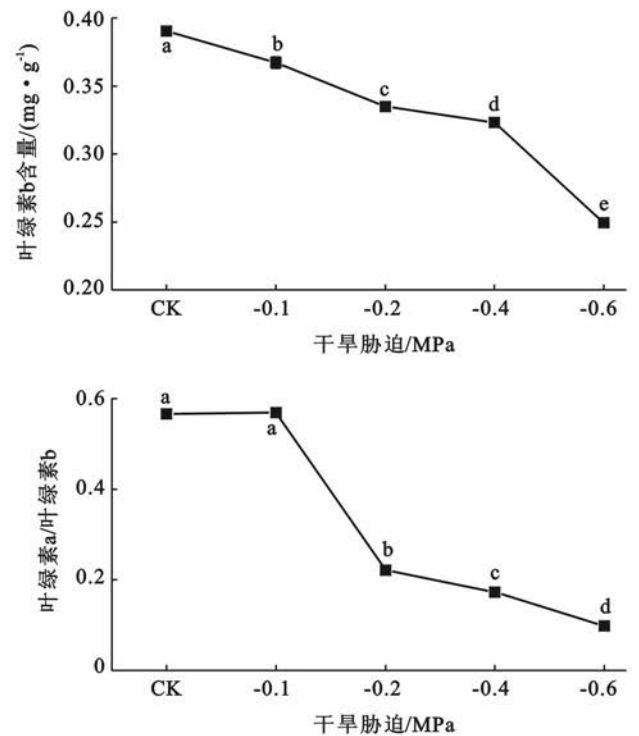
表2 干旱胁迫下黑果枸杞幼苗渗透调节物质含量的变化

水分胁迫/MPa	脯氨酸/(mg·g ⁻¹)		可溶性糖/(mg·g ⁻¹)	
	胚根	胚芽	胚根	胚芽
CK	159.02±3.99 ^a	112.24±1.48 ^a	1.20±0.00 ^a	0.36±0.01 ^a
-0.1	543.33±40.07 ^b	296.80±11.14 ^b	2.23±0.00 ^b	0.44±0.01 ^b
-0.2	772.83±3.57 ^c	541.75±1.32 ^c	2.92±0.02 ^c	0.56±0.02 ^c
-0.4	809.37±12.13 ^d	775.50±7.19 ^d	3.35±0.05 ^d	0.67±0.03 ^d
-0.6	1000.69±5.12 ^e	816.02±7.63 ^e	4.15±0.01 ^e	1.06±0.04 ^e

2.6 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗叶绿素含量的影响

黑果枸杞幼苗叶绿素 a、叶绿素 b,Chla/b 均随干旱胁迫强度的增加逐渐降低,且各处理间差异显著($p < 0.05$)。

黑果枸杞幼苗叶绿素含量(Chl a+b)随干旱胁迫强度的增加逐渐降低(图3),且各处理间差异显著($p < 0.05$),-0.1,-0.2,-0.4 和-0.6 MPa 处理下的黑果枸杞幼苗叶绿素含量相对对照分别降低 11.51%,33.12%,38.02%和 55.20%。



这与齐淑艳等^[21]对牛膝菊的研究、刘自刚等^[22]对桔梗的研究结果相同。何芳兰等^[23]对高浓度下 PEG 对黑果枸杞种子萌发进行了研究,得出了与本研究相似的结论,不同的是,本研究在此基础上对低浓度下 PEG 对黑果枸杞种子的萌发进行了深入研究,分析低浓度下 PEG 对黑果枸杞种子萌发的影响。但有些研究表明,轻度的干旱胁迫有利于种子的萌发,杨景

宁等^[24]通过对驼绒藜、红砂和碱蓬的种子的研究表明,轻度干旱胁迫对这 3 个种子的萌发有促进作用。秦文静等^[25]对尖叶胡枝子的研究得出了同样的结论。黑果枸杞种子的初生根随 PEG 浓度的升高逐渐增大。轻度的干旱胁迫有利于黑果枸杞初生芽的生长,而中度、重度的干旱胁迫抑制黑果枸杞初生芽的生长。其他植物的研究得出了不同的结论。齐淑艳等^[21]对牛膝菊种子的研究表明,随着 PEG 浓度的升高,胚根、胚芽长度逐渐降低。杨景宁等^[24]对 4 种荒漠植物研究表明,轻度的干旱胁迫对初生根的生长有一定的促进作用。

渗透调节是植物抵御干旱的一种重要方式,是植物适应干旱及盐性土壤的生理化学机制。脯氨酸是植物在逆境条件下重要的自我防御物质,也是保护酶系统和细胞膜免受伤害。干旱胁迫下,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽脯氨酸含量明显升高,这表明黑果枸杞在干旱胁迫下具有一定的渗透调节能力。随着干旱胁迫强度的增加,黑果枸杞幼苗胚根、胚芽可溶性糖均增加,这表明,在干旱胁迫下黑果枸杞幼苗主动提高可溶性糖的含量,保护植物免受渗透胁迫伤害,表现出一定的耐受性。

干旱胁迫会抑制叶绿素的合成,并加速已合成叶绿素的分解,导致叶绿素含量直线下降。随着干旱胁迫强度的增加,叶绿素 a、叶绿素 b、Chl(a+b)均显著降低,这与 Gratan 等^[26]和朱志梅等^[27]研究结果相同。黑果枸杞幼苗 chl a/b 随干旱胁迫强度的增加逐渐降低,这说明干旱胁迫使黑果枸杞幼苗光捕获复合体(LCH II)受到了损伤。

[参 考 文 献]

- [1] Koochaki A. Farming plant germination physiological fundamentals[J]. Astane Ghodse Razavi Publication, 1991,98:869-874.
- [2] Donohue K, Dorn L, Griffith C, et al. The evolutionary ecology of seed germination of *Arabidopsis thaliana*: variable natural selection on germination timing[J]. *Evolution*, 2005,59(4):758-770.
- [3] Hardegree S P, Emmerich W E. Effect of polyethylene glycol exclusion on the water potential of solution-saturated filter paper[J]. *Plant Physiology*, 1990, 92(2): 462-466.
- [4] Gorai M, Tlig T, Neffati M. Influence of water stress on seed germination characteristics in invasive *Diplotaxis harra* (Forssk.) Boiss (Brassicaceae) in arid zone of Tunisia[J]. *Journal of Phytology*, 2009,1(4):249-254.
- [5] Mantovani A, Iglesias R R. The effect of water stress on seed germination of three terrestrial bromeliads from restinga[J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2010,33(1): 201-205.
- [6] Naseri H. Investigation on botanical and ecological characteristics of *Artemisia* species in east Azarbayjan [C]// M. Sc. seminar. Faculty of Natural Resources, University of Tehran, 2003,92.
- [7] 郭有燕,孔东升,闫芳,等. 干旱胁迫对黑果枸杞光合特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2016,36(1):124-130.
- [8] 冯建森,刘志虎. 酒泉市野生资源黑果枸杞资源及利用[J]. *林业实用技术*, 2013(2):62-64.
- [9] Zheng Jie, Ding Chengxu, Wang Liangsheng, et al. Anthocyanins composition and antioxidant activity of wild *Lycium ruthenicum* Murr. from Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Food Chemistry*, 2011,126(3):859-865.
- [10] Liu Zenggen, Dang Jun, Wang Qilian, et al. Optimization of polysaccharides from *Lycium ruthenicum* fruit using RSM and its anti-oxidant activity[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2013, 61: 127-134.
- [11] Liu Zenggen, Shu Qingyan, Wang Lei, et al. Genetic diversity of the endangered and medically important *Lycium ruthenicum* Murr. revealed by sequence-related amplified polymorphism(SRAP)markers[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2012,45:86-97.
- [12] 王锦楠,陈进福,陈武生,等. 柴达木地区野生黑果枸杞种群遗传多样性的 AFLP 分析[J]. *植物生态学报*, 2015,39(10):1003-1011.
- [13] Chen Haikui, Zhao Wenhong. Effects of NaCl stress on seed germination of *Lycium ruthenicum* Murr[J]. *Agricultural Science & Technology-Hunan*, 2010, 11(4):37-38.
- [14] 王桔红,陈文. 黑果枸杞种子萌发及幼苗生长对盐胁迫的响应[J]. *生态学杂志*, 2012,31(4):804-810.
- [15] 韩多红,李善家,王恩军,等. 外源钙对盐胁迫下黑果枸杞种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. *中国中药杂志*, 2014,29(1):34-39.
- [16] 王恩军,李善家,韩多红,等. 中性盐和碱性盐胁迫对黑果枸杞种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014,32(6):64-69.
- [17] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol6000[J]. *Plant Physiology*, 1973,51(5):914-916.
- [18] 李合生. 植物生理生化试验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [19] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学试验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [20] 张勇,薛林贵,高天鹏,等. 荒漠植物种子萌发研究进展[J]. *中国沙漠*, 2005,25(1):106-112.

- 学学报,2012,31(8):1505-1511.
- [8] Wang Xia, Ding Wenguang, Nan Zhongren, et al. Fraction of Cd in oasis soil and its bioavailability to commonly grown crops in Northwest China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013,70(1):471-479.
- [9] Liu Chengchung, Chen Guanbu. Reclamation of cadmium-contaminated soil using dissolved organic matter solution Originating from wine-processing waste sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 244-245: 645-653.
- [10] 窦森. 南京农业大学主编. 土壤农化分析[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社,1996:171-199.
- [11] 佚名. 北京出版社. GB/T17141-1997, 土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法[S].
- [12] Tessier A. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979,51(7):844-851.
- [13] Kumada K. Humus composition of mountain soils in Central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967,13(5):151-158.
- [14] 王鑫,王金成,刘建新. 不同恢复阶段人工沙棘林土壤腐殖质组成及性质[J]. *水土保持通报*,2014,34(5):49-54.
- [15] 张晋京,窦森,李翠兰,等. 土壤腐殖质分组研究[J]. *土壤通报*,2004,35(6):706-709.
- [16] 窦森,肖彦春,张晋京. 土壤胡敏素各组分数量及结构特征初步研究[J]. *土壤学报*,2006,43(6):934-940.
- [17] Pérez-Cid B, Lavilla I, Bendicho C. Application of microwave extraction for partitioning of heavy metals in sewage sludge[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1999,378 (1/2/3):201-210.
- [18] 董扬红,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J]. *水土保持学报*, 2015,29(1):143-148.
- [19] 刘洋,张玉龙,张玉玲,等. 辽宁省设施土壤重金属 Cd, Ni, As 有效态含量及其影响因素的研究[J]. *农业环境科学学报*,2012,31(6):1131-1134.
- [20] Liu Yizhang. High cadmium concentration in soil in the Three Gorges region; Geogenic source and potential bioavailability [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 37 (10):149-156.
- [21] 工丽艳,韩有志,张成梁,等. 不同植被恢复模式下煤研石山复垦土壤性质及煤研石风化物的变化特征[J]. *生态学报*,2011,31(21)6429-441.
- [22] 秦铭,王俊焱. 土壤腐殖质对重金属离子吸附—解吸作用的研究探讨[J]. *农业技术与装备*,2010(2):1-7.
- [23] Chaturvedi P K, Seth C S, Misra V. Selectivity sequences and sorption capacities of phosphatic clay and humus rich soil towards the heavy metals present in zinc mine tailing[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(3):698-705.
- [24] Garcia-Mina J M. Stability, solubility and maximum metal binding capacity in metal-humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37 (12): 1960-1972.
- [25] 杨志斌,杨忠芳,冯海艳,等. 四川成都经济区土壤腐殖质重金属元素含量特征研究[J]. *土壤通报*,2008,39 (5):1135-1139.

(上接第 102 页)

- [21] 齐淑艳,段继鹏,郭婷婷,等. 入侵植物牛膝菊种子萌发对 PEG 模拟干旱胁迫的响应[J]. *生态学杂志*,2014, 33(5):1190-1194.
- [22] 刘自刚,沈冰,张雁. 桔梗种子萌发对低温、干旱及互作胁迫的响应[J]. *生态学报*,2013,33(8):2615-2622.
- [23] 何芳兰,赵明,王继和,等. 几种荒漠植物种子萌发对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究[J]. *干旱区地理*, 2011,34(1):100-106.
- [24] 杨景宁,王彦荣. PEG 模拟干旱胁迫对四种荒漠植物种子萌发的影响[J]. *草业学报*,2012,21(6):23-29.
- [25] 秦文静,梁宗锁. 四种豆科牧草萌发期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. *草业学报*,2010,19(4):61-70.
- [26] Gratani L, Varone L. Leaf key traits of *Erica arborea* L., *Erica multiflora* L. and *Rosmarinus officinalis* L. co-occurring in the Mediterranean maquis[J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2004,199(1):58-69.
- [27] 朱志梅,杨持. 草原沙漠化过程中植物的耐胁迫类型研究[J]. *生态学报*,2004,24(6):1093-1100.