

干旱胁迫对黑果枸杞幼苗光合特性的影响

郭有燕¹, 刘宏军², 孔东升^{1*}, 闫芳¹, 张亚娟¹, 刘东花¹

(1 河西学院, 甘肃张掖 734000; 2 张掖市种子管理站, 甘肃张掖 734000)

摘要:以当年生黑果枸杞幼苗为试验材料,通过称重控水的方法设置对照(土壤含水量为 32.96%~35.35%)、轻度干旱胁迫(土壤含水量为 21.18%~22.32%)、中度干旱胁迫(土壤含水量为 12.20%~13.82%)和重度干旱胁迫(土壤含水量为 7.89%~8.73%)4个水分梯度,研究了干旱胁迫对黑果枸杞叶片光合色素、光合特性、叶绿素荧光特性的影响,以揭示黑果枸杞对干旱胁迫的适应能力和适应机制。结果显示:(1)随着干旱胁迫强度的增加,黑果枸杞幼苗叶片叶绿素含量、类胡萝卜素含量均呈显著下降趋势。(2)黑果枸杞幼苗叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)在中度和重度干旱胁迫下显著下降;其胞间 CO_2 浓度(C_i)、水分利用效率(WUE)随干旱胁迫强度的增加而逐渐增加,而气孔限制值(L_s)随干旱胁迫强度的增加而逐渐降低。(3)随着土壤含水量的降低,黑果枸杞幼苗叶片初始荧光(F_0)和非光化学猝灭系数(q_N)逐渐增加,而其最大荧光(F_m)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{PSII})和光化学猝灭系数(q_p)均逐渐降低。研究表明,在干旱胁迫条件下,黑果枸杞叶片过多的能量以热的形式被耗散,反应中心开放程度降低,从而避免 PS II 反应中心受到损伤,表现出一定的耐旱性;黑果枸杞生长所允许的最大土壤水分亏缺为 7.89%,维持黑果枸杞具有较高的 WUE 和 P_n 的土壤水分阈值为 12.20%~13.82%。

关键词:黑果枸杞;干旱胁迫;光合色素;光合特性

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Drought Stress on Photosynthesis Characteristics of *Lycium ruthenicum* Seedlings

GUO Youyan¹, LIU Hongjun², KONG Dongsheng^{1*}, YAN Fang¹, ZHANG Yajuan¹, LIU Donghua¹

(1 Hexi College, Zhangye, Gansu 734000, China; 2 Zhangye Seeding Management Stations, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: To detect the effect of drought on one-year-old *Lycium ruthenicum* seedlings, we investigated the photosynthetic pigments, photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence characteristics on four different soil contents: CK (21.18%–22.32% soil moisture), light stress (12.20%–13.82%), moderate stress (12.20%–13.82%) and severe stress (7.89%–8.73%). The results showed that: (1) the chlorophyll content and carotenoid content decreased with the decreasing soil water content. (2) Under the moderate stress, the net photosynthetic rate (P_n), the transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s) decreased significantly. With the decreasing of soil water content, intercellular CO_2 concentration (C_i), the water use efficiency (WUE) increased, whereas stomatal limitation (L_s) performed the inverse trend. (3) With the increasing of the minimal fluorescence (F_0) and nonphotochemical quenching (q_N) value, the maximal fluorescence (F_m), maximal photochemical efficiency (F_v/F_m), actual photochemical efficiency (Φ_{PSII}), and photochemical quenching (q_p) decreased. It indicated that the excess energy of the leaves of *L.*

收稿日期: 2015-11-12; 修改稿收到日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460189); 甘肃省高等学校科研项目(2014A-111)

作者简介: 郭有燕(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事天然林保护与利用研究。E-mail: guoyouyan_2008@163.com

* 通信作者: 孔东升, 研究员, 主要从事植物生态植被恢复研究。E-mail: Kongdsh@sohu.com

ruthenicum is dissipated by heat, and the open degree of the reaction center is reduced to avoid the damage of the PS II reaction center. It suggested that *L. ruthenicum* keep on vigor above the limitation of 7.89% soil moisture, and the largest WUE and the higher P_n arrive on 12.20%—13.82% soil moisture.

Key words: *Lycium ruthenicum* Murr.; drought stress; photosynthetic pigments; photosynthetic characteristics

干旱胁迫是限制植物生存和生长的关键因素,其在干旱和半干旱地区对植被的恢复会造成不利的影响^[1]。干旱胁迫严重影响植物的形态结构、光合生长和代谢水平,植物只有适应这种干旱环境才能生存^[2]。光合作用直接关系到植物的生长发育、产量形成以及次生代谢物质的合成积累,被认为是自然条件下限制植物生长,影响植物生产力的最重要因子之一^[3]。光合作用对于干旱胁迫更为敏感,它不仅受气孔导度下降的限制,而且受严重胁迫时叶绿体水平破坏的限制^[4-5]。面对干旱胁迫,植物一般通过各种保护措施抵抗胁迫,或通过自身修复能力缓解胁迫所造成的危害^[6]。因此,从光合特性方面研究植物对干旱胁迫的响应与适应特征,对深入探讨植物适应干旱的能力及对策显得越来越重要。

黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)为茄科枸杞属多棘刺灌木,主要分布于中国西部地区,是中国荒漠地区地带性植被的主要建群树种^[7],也是一种集药用、绿化和水土保持价值为一体的野生优良植物^[8],果实富含蛋白质、枸杞多糖等多种营养成分,药用、保健价值远远高于普通红枸杞,被誉为植物“软黄金”^[9]。随着该物种药用价值的进一步开发利用,野生资源破坏严重,种群数量大面积减少,部分地区甚至出现成片死亡现象,该物种当前已被列为重要保护植物^[10]。在这种严酷的形势下,对黑果枸杞进行有效的管护、保护和研究是目前黑果枸杞合理经营的主要任务。迄今为止,有关黑果枸杞的研究报道较少,Chen 等^[11]、何芳兰等^[12]、王桔红等^[13]、韩多红等^[14]分别从盐胁迫、干旱胁迫及贮藏方式等方面对黑果枸杞种子萌发进行了研究,但目前就黑果枸杞幼苗对干旱环境适应能力和适应机制的研究还十分缺乏。野外调查发现,黑果枸杞结实量大,实生苗数量少,干旱可能是限制黑果枸杞幼苗生长发育和定居的关键因素。在干旱环境下,黑果枸杞是否可以通过调整光合生理的变化去适应干旱环境,此类研究还未见报道,而这可以从根本上阐明黑果枸杞幼苗适应干旱环境的机理。为此,本研究通过盆栽实验,探讨干旱胁迫对当年生黑果枸杞幼苗光合生理的影响,旨在揭示黑果枸杞对于干旱胁迫

的适应能力和适应机制,为黑果枸杞植被恢复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

实验地位于甘肃省张掖市(37°28'N, 97°20'E)河西学院农学实习基地,属大陆性气候,年平均气温 6℃,年日照时数 3 106 h,全年无霜期 138~179 d,年太阳辐射量 6 140~6 270 mJ/m²,年平均降水量 113~120 mm,年蒸发量为 2 291 mm。

1.2 干旱胁迫处理

以当年生黑果枸杞盆栽实生苗为供试材料,其种子采自张掖市甘州区野生黑果枸杞植株。2014年3月10日播种在塑料盆内,盆高 20 cm,内径 23 cm,土壤为土壤、砂质土、腐殖质(1:2:1)的混合土,每盆装入等量的土,每盆播 10 粒种子,共 40 盆。待幼苗生长至 2~3 片真叶时,每盆留 2 株健壮的幼苗。为保证幼苗健康生长,育苗期间土壤含水量约为田间最大持水量的 80%。2014年6月27日开始干旱胁迫实验,设对照(CK,土壤含水量为 32.96%~35.35%)、轻度干旱胁迫(T₁,土壤含水量为 21.18%~22.32%)、中度干旱胁迫(T₂,土壤含水量为 12.20%~13.82%)和重度干旱胁迫(T₃,土壤含水量为 7.89%~8.73%)4 各处理水平。每个处理重复 3 次。胁迫期间用称重法补充损失的水分,采取人工防雨措施,以保证土壤水分含量稳定。胁迫 30 d 后,取样测定其光合色素含量、光合作用参数和叶绿素荧光参数。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 光合色素含量 取幼苗冠层上部完全展开的叶片,新鲜叶立即在低温、避光条件下带回实验室进行色素含量测定。将新鲜叶片剪碎混匀,取 0.1 g 用 80% 的丙酮在低温、黑暗条件下浸泡使叶片完全变白。浸提液过滤、定容后在波长 646、663 和 470 nm 下比色,分别测定叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)和类胡萝卜素(Car)的吸收值,计算 Chl a、Chl b、Chl(a+b)、Car 的含量及 Chl(a/b)、Chl(a+b)/Car 之比^[15]。

1.3.2 光合生理参数 选择连续晴好的天气,利用 CIRAS-2 光合仪于 9:00~11:30 测定叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i),根据各处理数据,计算水分利用效率(WUE)和气孔限制值(L_s)。

瞬时水分利用效率: $WUE = P_n / T_r$

气孔限制值: $L_s = (1 - C_i / C_o) \times 100\%$ (C_o 为空气中 CO_2 浓度)

1.3.3 叶绿素荧光参数 使用 FMS-2 荧光仪测定叶绿素荧光参数,选取植株中上部受光一致的功能叶 3 片,叶片暗适应 25 min 后,测定初始荧光(F_0);随后给一个强闪光($6\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),脉冲时间(0.8 s)测定最大荧光(F_m);测定充分暗适应的 PS II 最大光化学效率(F_v / F_m)。接着照射饱和脉冲光($6\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),测定光下最大荧光(F_m')、 F_t 和实际光化学效率(Φ_{PSII})。根据各处理数据,计算光化学猝灭系数(q_p)和非光化学猝灭系数(q_N)。

$$q_p = (F_m' - F_t) / (F_m' - F_0)$$

$$q_N = (F_m - F_m') / (F_m - F_0)$$

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 对数据进行 one-way ANOVA 分析,采用 LSD 进行多重比较。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叶片光合色素含量的影响

从表 1 中可以看出,黑果枸杞幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 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($P < 0.05$);幼苗叶片叶绿素含量(Chl a+b)也随干旱胁迫强度的增加逐渐降低,且各处理间差异显著($P < 0.05$),轻度(T_1)、中度(T_2)、重度(T_3)干旱胁迫下的叶绿素含量较 CK 分

别显著下降了 2.88%、10.17% 和 13.63%。同时,黑果枸杞幼苗叶片类胡萝卜素含量也随干旱胁迫强度的增加逐渐降低,且各处理间差异显著($P < 0.05$),轻度、中度、重度干旱胁迫下的类胡萝卜素含量较 CK 分别显著下降了 12.77%、34.04% 和 42.55%。另外,光合色素含量比值 Chl(a/b)、Chl(a+b)/Car 均随干旱胁迫强度的增加逐渐增加,轻度、中度、重度干旱胁迫处理下 Chl(a/b)较 CK 分别增加了 0.00%、0.79% 和 4.72%,三者的 Chl/Car 较 CK 分别显著增加了 11.25%、34.10% 和 49.38%。可见,干旱胁迫显著降低了黑果枸杞幼苗叶片光合色素含量,且胁迫程度越重下降幅度越大;类胡萝卜素含量比叶绿素含量降低幅度更大,叶绿素 b 又比叶绿素 a 含量降低幅度大。

2.2 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗叶片光合作用参数的影响

在不同程度干旱胁迫条件下,黑果枸杞幼苗叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度随土壤含水量降低的变化趋势相同(图 1)。其中,在轻度干旱胁迫下,黑果枸杞幼苗叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度较 CK 略有增加,但差异不显著($P > 0.05$);在中度和重度干旱胁迫下,黑果枸杞幼苗叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度均较 CK 显著降低,在中度干旱胁迫下降幅分别为 17.06%、21.64% 和 44.12%,在重度干旱胁迫下降幅分别为 35.88%、40.07% 和 72.55% ($P < 0.05$)。同时,随着土壤含水量的降低,黑果枸杞幼苗叶片胞间 CO_2 浓度逐渐增加,但在轻度和中度干旱胁迫下与 CK 无显著差异($P > 0.05$),仅在重度干旱胁迫下较 CK 显著增加 15.50% ($P < 0.05$)。另外,随着土壤含水量的降低,黑果枸杞幼苗叶片水分利用效率呈先增加后降低并趋于平稳的趋势,但各处理间差异不显著($P > 0.05$);而此时其叶片气孔限制值随土壤含水量的降低而逐渐降低,各处理较 CK 降幅在 16.14%~

表 1 干旱胁迫下黑果枸杞幼苗光合色素含量的变化

Table 1 Variations in photosynthetic pigment contents of *L. ruthenicum* seedlings under drought stress

胁迫水平 Stress level	叶绿素 a Chl a/(mg/g)	叶绿素 b Chl b(mg/g)	叶绿素 Chl(a+b)/(mg/g)	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 Car/(mg/g)	叶绿素/类胡萝卜素 Chl(a+b)/Car
CK	2.92±0.00a	2.29±0.01a	5.21±0.01a	1.27±0.00b	0.47±0.00a	11.20±0.09d
T ₁	2.83±0.01b	2.23±0.02b	5.06±0.04b	1.27±0.01b	0.41±0.01b	12.46±0.09c
T ₂	2.63±0.01c	2.06±0.01c	4.68±0.01c	1.28±0.00b	0.31±0.01c	15.02±0.20b
T ₃	2.57±0.00d	1.93±0.00d	4.50±0.00d	1.33±0.00a	0.27±0.00d	16.73±0.10a

注:CK、T₁、T₂、T₃ 分别表示对照及轻度、中度和重度干旱胁迫处理;同列不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同。

Note:CK, T₁, T₂ and T₃ stand for control, mild drought stress, moderate drought stress and severe drought stress, respectively; The different normal letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below.

56.90%之间,但差异均未达到显著水平($P>0.05$)。可见,黑果枸杞幼苗叶片各光合生理参数在轻度干旱胁迫下均未受到显著影响,而随干旱胁迫加重,净光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著降低,胞间 CO_2 浓度在重度干旱胁迫下也显著降低,而其余参数未受到显著影响。

2.3 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

图 2 显示,随干旱胁迫程度的加剧(土壤含水量降低),黑果枸杞幼苗叶片初始荧光(F_0)逐渐增加,而同期的最大荧光(F_m)逐渐降低,且在中度和重度干旱胁迫下与CK差异均达到显著水平($P<0.05$)。

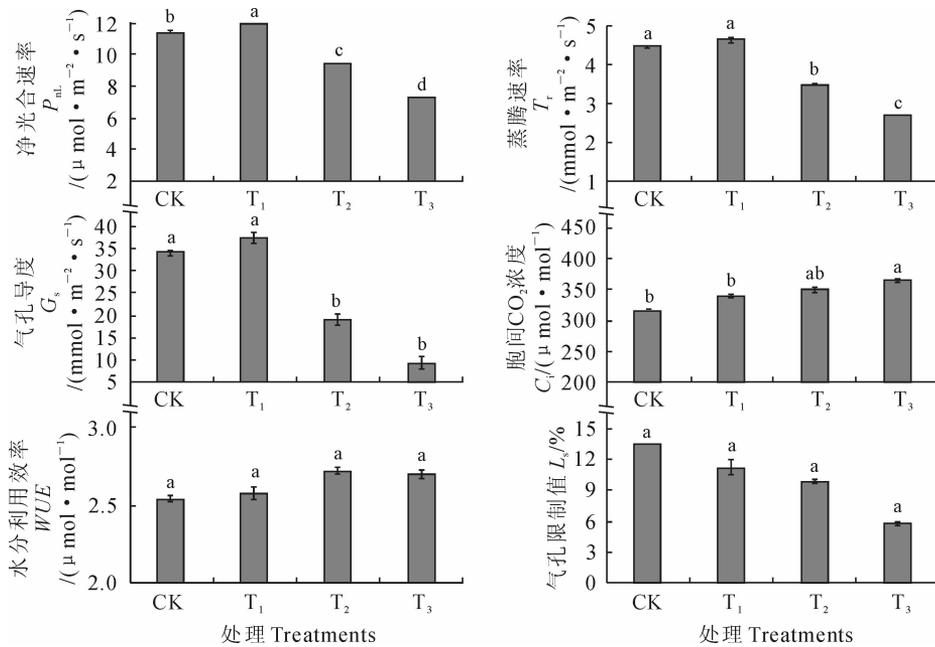


图 1 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗叶片光合参数的变化

Fig. 1 The photosynthetic parameters in leaves of *L. ruthenicum* under drought stress

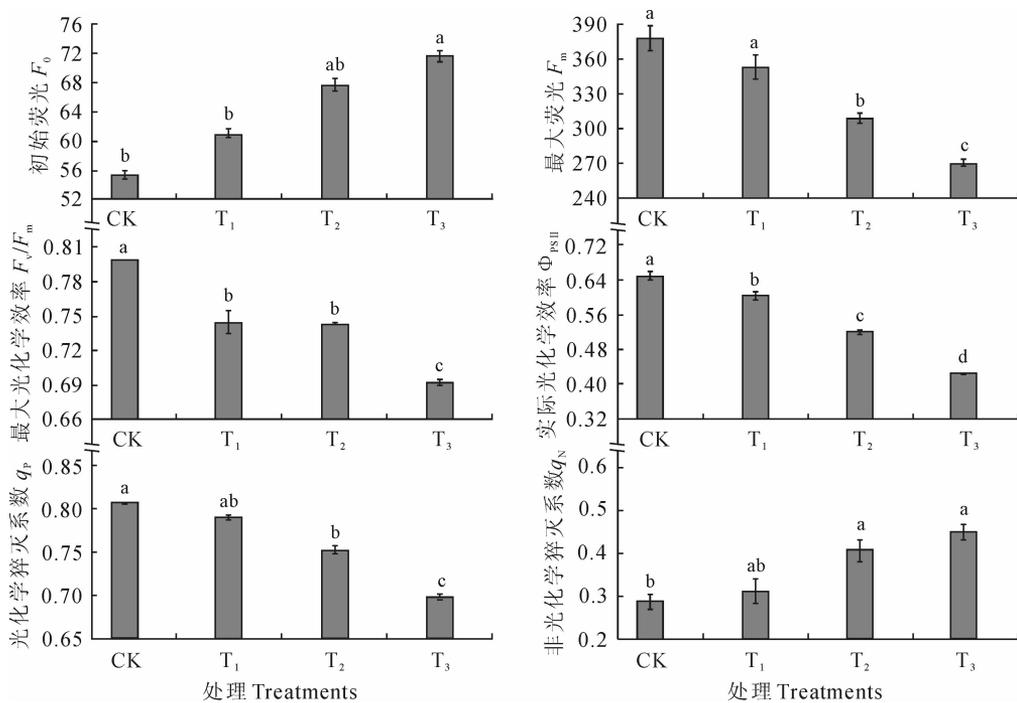


图 2 不同干旱胁迫下黑果枸杞幼苗叶片叶绿素荧光参数的变化

Fig. 2 The chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *L. ruthenicum* under drought stress

同时,黑果枸杞幼苗叶片 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和实际光化学效率(Φ_{PSII})在干旱胁迫下均逐渐降低,轻度、中度和重度干旱胁迫处理的 F_v/F_m 分别较 CK 显著降低了 6.80%、6.93% 和 13.31%, 而其 Φ_{PSII} 则较 CK 分别显著降低了 7.12%、20.04% 和 34.65% ($P < 0.05$)。另外,黑果枸杞幼苗叶片光化学猝灭系数(q_p)随土壤含水量的降低逐渐降低,而同期非光化学猝灭系数(q_N)却逐渐增加,轻度、中度和重度干旱胁迫处理的 q_p 较 CK 分别降低了 2.13%、6.75% 和 13.42%, 其相应的 q_N 值较 CK 分别增加了 8.63%、41.69% 和 57.10%, 且后两者变化均达到显著水平 ($P < 0.05$)。以上结果说明轻度干旱胁迫下黑果枸杞幼苗叶片叶绿素荧光参数 PS II 最大光化学效率和实际光化学效率受显著影响外,其他参数均未受影响。而在重度干旱胁迫下最大荧光、光化学猝灭系数显著降低。

3 结论与讨论

干旱胁迫是植物的生理功能由最初失去稳定到最后趋于正常并增加抗性的一种需要。干旱胁迫影响植物许多重要的生理生态过程,其中光合生理是重要的参数^[16]。本研究表明,随着干旱胁迫强度的增加,黑果枸杞幼苗叶绿素及类胡萝卜素含量均显著降低。这与前人对白刺花^[17]和迷迭香^[18]等植物的研究结果一致。这主要是由于干旱胁迫通过抑制叶绿素合成,并加速其分解,导致叶绿素含量直线下降,而干旱胁迫下类胡萝卜素的降低是为了清除叶绿体中活性氧,防止膜脂过氧化^[19]。干旱胁迫影响黑果枸杞幼苗光合色素格局的变化,也暗示了其光合器官生理活性的变化。在干旱胁迫条件下,黑果枸杞幼苗 Chl(a/b) 增加,这是 PS II 聚光复合体中 LHClI 含量减少的主要特征^[20],说明干旱胁迫下叶片捕光蛋白色素复合物的降解程度高于反应中心的降解程度^[21],这种响应可减少黑果枸杞叶片对光能的捕获,降低光合机构遭受光氧化破坏的风险,是其适应干旱胁迫的一种光保护调节机制。

同时,影响植物光合作用的因素可分为气孔因素和非气孔因素两类,气孔因素是水分胁迫导致气孔导度下降,CO₂ 进入叶片受阻而使光合速率下降,而非气孔因素是叶肉细胞的光合活性下降^[22]。Farquhar 等认为,当 P_n 和 C_i 变化方向相同时,两者同时减小, P_n 的下降主要是由 G_s 引起的气孔因素所致,否则 P_n 的下降要归因于叶肉细胞羧化能

力的降低^[23]。在本研究的轻度干旱胁迫下, G_s 值相对对照没有发生明显变化,这说明轻度干旱胁迫下黑果枸杞叶片气孔能够保持一定水平的开度,利于其蒸腾和光合过程进行;而在中度和重度干旱胁迫下,黑果枸杞叶片 P_n 和 G_s 伴随着 C_i 的上升而下降,这表明在此干旱胁迫条件下黑果枸杞光合作用主要受非气孔因素的限制。

另外,叶绿素荧光动力学参数是干旱逆境对植物光合作用影响研究和探测的理想方法^[24]。叶绿素荧光与光合作用中各种反应过程密切相关,任何环境因子对光合作用的影响都可通过叶绿素荧光动力学反映出来^[25]。本研究结果表明,随着水分胁迫的加剧,黑果枸杞的 F_m 逐渐下降,而 F_0 逐渐升高,这表明其光合色素吸收的光能中,以热和荧光的形式散失的能量在增加。这与前人在条墩桑^[26]、小冠花^[27]和丹参^[28]上的相关研究结果相同。 F_v/F_m 反映了开放的 PS II 反应中心捕获激发能的效率,是研究植物胁迫的重要参数,任何影响 PS II 效能的环境胁迫均会使 F_v/F_m 降低^[26]。随着干旱胁迫的加剧,黑果枸杞的 F_v/F_m 逐渐降低,这表明干旱胁迫使黑果枸杞 PS II 原初光能转化率下降,潜在活性中心受损,黑果枸杞叶片光合作用的原初反应受到抑制,这与在丹参^[28]、草莓^[29]上的研究结果相似。 q_p 在一定程度上反映了 PS II 反应中心的开放程度,而 q_N 是植物 PS II 天线色素所吸收的光能没有被用于光化学反应,而以热的形式耗散掉的光能部分,当 PS II 反应中心的天线色素吸收的光能过剩时,如不能及时的加以耗散,将会对光合机构造成破坏或失活^[30]。随着干旱胁迫程度的增加,本研究中黑果枸杞叶片 q_p 、 Φ_{PSII} 逐渐降低,但 q_N 逐渐增加,这表明黑果枸杞叶片过多的能量以热的形式被耗散,反应中心开放程度降低,以避免 PS II 反应中心受到损伤。

综上所述,在干旱胁迫下,黑果枸杞幼苗通过增加 Chl a/b 值以减少叶片对光能的捕获,降低光合机构遭受光氧化破坏的风险。当土壤含水量低于 13.82% 时,黑果枸杞光合作用降低的主要原因是非气孔因素的限制;随干旱胁迫程度的增加,黑果枸杞幼苗通过降低 q_p 、 Φ_{PSII} 和增加 q_N 以降低反应中心的开放程度,避免 PS II 反应中心受到损伤。黑果枸杞生长所允许的最大土壤水分亏缺为 7.89%,维持黑果枸杞具有较高的 WUE 和 P_n 的土壤水分阈值为 12.20%~13.82%。

参考文献:

- [1] LI F L, BAO W K, WU N. Effects of water stress on growth, dry matter allocation and water-use efficiency of a leguminous species, *Sophora davidii* [J]. *Agroforest Syst*, 2008, 77: 193-201.
- [2] 安玉艳, 梁宗锁, 郝文芳. 杠柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应[J]. *生态学报*, 2011, 31(3): 716-725.
AN Y Y, LIANG Z S, HAO W F. Growth and physiological responses of the *Periploca sepium* Bunge seedlings to drought stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 716-725.
- [3] 蔡海霞, 吴福忠, 杨万勤. 干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(9): 2 430-2 436.
CAI H X, WU F Z, YANG W Q. Effects of drought stress on the photosynthesis of *Salix paraqulesia* and *Hippophae rhamnoides* seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2 430-2 436.
- [4] BOYER T, WONG S, FARQUHAR G. CO₂ and water vapour exchange across the leaf cuticle (epidermis) at various water potentials [J]. *Plant Physiology*, 1997, 114: 185-189.
- [5] LAWLOR D. Limitation to photosynthesis in water stressed leaves; stomata vs metabolism and the role of ATP [J]. *Annals of Botany*, 2002, 89: 871-885.
- [6] COOPER K, FARRANT J. Recovery of the resurrection plant *Crateostigma wilmsii* from desiccation: protection versus repair [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53: 1 805-1 813.
- [7] 路兴慧. 塔里木河下游五种典型荒漠植物水分生理及自维持特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009.
- [8] 姜霞. 黑果枸杞耐盐机理的相关研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2012.
- [9] 冯建森, 刘志虎. 酒泉市野生黑果枸杞资源及利用[J]. *林业实用技术*, 2013, (2): 62-64.
FENG J S, LIU Z H. *Lycium ruthenicum* Murr resources and use of Jiuquan city [J]. *Practical Forestry Technology*, 2013, (2): 62-64.
- [10] LIU Z G, SHU Q Y, WANG L, 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.
- [11] CHEN H K, ZHAO W H. Effect of NaCl stress on seed germination of *Lycium ruthenicum* Murr. [J]. *Agriculture Science and Technology*, 2010, 11(4): 37-38.
- [12] 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.
HE F L, ZHAO M, WANG J H, et al. Response to drought stresses and drought resistances evaluation of seed germination of four desert vegetation [J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(1): 100-106.
- [13] 王桔红, 马瑞君, 陈文. 冷层积和室温干燥贮藏对河西走廊 8 种荒漠植物种子萌发的影响[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(8): 791-801.
WANG H H, MA R J, CHEN W. Effects of cold stratification and dry storage at room temperature on seed germination of eight desert species from the Hexi Corridor of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(8): 791-801.
- [14] 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.
HAN D H, LI S J, WANG E J, et al. Effect of exogenous Calcium on seed germination and seedling physiological characteristics of *Lycium ruthenicum* [J]. *China J. Chin. Mater Med.*, 2014, 29(1): 34-39.
- [15] 李芳兰, 包维楷, 吴宁. 白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5 406-5 416.
LI F L, BAO W K, WU N. Morphological and physiological responses of current *Sophora davidii* seedlings to drought stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5 406-5 416.
- [16] 周生荟, 刘玉冰, 谭会娟, 等. 荒漠植物红砂在持续干旱胁迫下的光保护机制研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(1): 69-73.
ZHOU S H, LIU Y B, TAN H J, et al. The photoprotective mechanism of desert plant *Reaumuria soongorica* under progressive soil drying [J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(1): 69-73.
- [17] WU F Z, BAO W K, LI F L, et al. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings [J]. *Environ Exp. Bot.*, 2008, 63: 248-255.
- [18] 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*, 2004, 199: 58-69.
- [19] WANG H M, BAO W K, LI F L. Physiological and biochemical responses of two years old *Sophora davidii* seedling leaves to different water stresses [J]. *Chinese Journal Applied and Environmental Biology*, 2008, 14(6): 757-762.
- [20] ANDERSON J M, ARO E M. Grana stacking and protection of photosystem II in thylakoid membranes of higher plant leaves under sustained high irradiance; an hypothesis [J]. *Photosynthesis Research*, 1994, 41(2): 315-332.
- [21] LAREHER W. *Physiological Plant Ecology* [M]. 4th Ed. New York: Springer, 2003.
- [22] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1 386-1 396.
PEI B, ZHANG G C, ZHANG S Y, et al. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1 386-1 396.
- [23] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [24] 李娟, 彭镇华, 高健, 等. 干旱胁迫下黄条金刚竹的光合和叶绿素荧光特性[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1 395-1 402.
LI J, PENG Z H, GAO J, et al. Photosynthetic parameters and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pleioblastus kongosanensis* f. *aureostriatus* under drought stress [J]. *Chinese*

- Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(6): 1 395-1 402.
- [25] 惠红霞, 许兴, 李前荣. 外源甜菜碱对盐胁迫下枸杞光合功能的改善[J]. 西北植物学报, 2003, **23**(12): 2 137-2 422.
HUI H X, XU X, LI Q R. Exogenous betaine improves photosynthesis of *Lycium barbarum* under salt stress[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2003, **23**(12): 2 137-2 422.
- [26] 闫海霞, 方路斌, 黄大庄. 干旱胁迫对条墩桑生物量分配和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(12): 3 365-3 370.
YAN H X, FANG L B, HUANG D Z. Effects of drought stress on the biomass distribution and photosynthetic characteristics of cluster mulberry[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(12): 3 365-3 370.
- [27] 杨文权, 顾沐宇, 寇建村, 等. 干旱及复水对小冠花光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. 草地学报, 2013, **21**(6): 1 130-1 135.
YANG W Q, GU M Y, KOU J C, *et al.* Effect of drought and rewating on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Coronilla varia* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, **21**(6): 1 130-1 135.
- [28] 罗明华, 胡进耀, 吴庆贵, 等. 干旱胁迫对丹参叶片气体交换和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(3): 619-623.
LUO M H, HU J Y, WU Q G, *et al.* Effects of drought stress on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Salvia miltiorrhiza* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(3): 619-623.
- [29] 吴甘霖, 段仁燕, 王志高, 等. 干旱和复水对草莓叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(14): 3 941-3 946.
WU G L, DUAN R Y, WANG Z G, *et al.* Effects of drought stress and rehydration on chlorophyll fluorescence characteristics in *Fragaria × ananassa* Duch [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(14): 3 941-3 946.
- [30] KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, **42**: 313-349.

(编辑: 裴阿卫)

《西北植物学报》2015 年审稿专家名单

(以姓氏笔画为序)

于飞海	于澄宇	王虹	王幼芳	王军卫	王孝安	王玛丽	王彦荣	王俊儒
王振林	王得祥	王喆之	王新宇	韦毅刚	甘立军	田惠桥	叶绍明	吕德国
朱月林	朱志红	阳成伟	巩振辉	刘文哲	刘占林	刘华伟	刘西平	刘全儒
刘保东	刘雅莉	刘曙东	乔玉山	孙广玉	李英	李敏	李玉红	李世清
李宽意	李得孝	李登科	李鹏民	初庆刚	杨洪强	邱全胜	吴卫	吴振海
陈鹏	陈铭	陈发棣	陈兴福	陈贵林	岳明	张飞雄	张文辉	张宏利
张绍铃	张宪春	张恩慧	张硕新	宋玉霞	郁飞	肖炳光	周道玮	於丙军
房经贵	罗正荣	洪棋斌	洪德元	胡正海	胡胜武	胡银岗	贺军民	饶广远
饶景萍	赵桦	赵利清	赵建成	赵继新	赵铭钦	郭太君	郭世荣	郭守玉
郭晓思	唐明	徐炎	徐子勤	钱前	高庆荣	高志奎	黄康	梁国华
曹建国	常朝阳	康永祥	康振生	喻树迅	喻德跃	蔡霞	廖文波	熊友才
黎斌	潘响亮	上官周平						

以上为《西北植物学报》2015 年审稿专家, 感谢一年来各位专家在百忙之中为本刊把好学术质量关, 在此特向专家们致以最诚挚的谢意, 还望在今后的岁月中继续支持学报的工作。