

模拟干旱胁迫对岷江干旱河谷—山地森林交错带4种乡土植物抗氧化酶系统的影响*

蔡海霞 吴福忠 杨万勤**

(四川农业大学林业生态工程重点实验室 雅安 625014)

摘要 为了解干旱河谷—山地森林交错带植物在干旱胁迫条件下的抗性生理特征,以交错带4种典型植物狗尾草 (*Setaria viridis*)、岷江柏 (*Cupressus chengiana*)、高山柳 (*Salix paraqpleisia*) 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 为研究对象,测定干旱胁迫条件下植物叶片抗氧化酶活性以及游离脯氨酸 (Pro)、丙二醛 (MDA) 和色素含量的变化。干旱胁迫显著降低了4种植物叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量,增加了叶片Pro和MDA含量,增加了细胞膜透性,提高了过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性,表明交错带植物在干旱胁迫条件下具有较强的抗旱能力。相对于岷江柏和高山柳,狗尾草和沙棘在相应水分条件下表现出较高的叶绿素a/b、Pro含量及POD、SOD和CAT活性,抗旱能力较高;而高山柳叶片上述各指标相对较低,抗旱性相对较差。研究结果为了解交错带不同生活型物种在干旱条件下的适应提供了理论依据。图2 表2 参26

关键词 干旱河谷; 交错带; 乡土植物; 抗氧化酶活性; 干旱胁迫

CLC Q945.78 : Q948.112.3

Effect of Simulated Drought Stress on Antioxidant Enzyme System of Four Native Species in the Ecotone Between the Minjiang Dry Valley and Mountain Forest*

CAI Haixia, WU Fuzhong & YANG Wanqin**

(Sichuan Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

Abstract To understand the resistibility of plant species in the ecotone between the Minjiang dry valley and mountain forest under drought stress, antioxidant enzyme activities, the contents of Pro and MDA, and the contents of chlorophyll and carotenoids were investigated using 4 native plants (*Setaria viridis*, *Cupressus chengiana*, *Salix paraqpleisia* and *Hippophae rhamnoides*) under different drought stress conditions. Drought stress significantly reduced the contents of chlorophyll and carotenoids, but increased membrane permeability, the contents of Pro and MDA, and antioxidant enzyme activities (POD, SOD and CAT). Compared with *C. chengiana* and *S. paraqpleisia*, *S. viridis* and *H. rhamnoides* showed higher drought-resistibility with higher Chl a/b and Pro contents, and POD, SOD and CAT activities. However, *S. paraqpleisia* showed lower drought-resistibility with lower Chl a/b and Pro contents, and POD, SOD and CAT activities compared with the other species. The results could provide useful scientific evidences to the adaptation of plants with different life-types in ecotone ecosystem. Fig 2, Tab 2, Ref 26

Keywords dry valley; ecotone; endemic species; antioxidant enzyme activities; drought stress

CLC Q945.78 : Q948.112.3

干旱与半干旱地区面积正在随着全球气候变化的加剧而不断扩大,环境干旱正在变得越来越严重^[1]。如何延缓这种干旱化的趋势已成为当前人类面临的全球性生态环境问题之一。由于具有相对较好的水分条件和较高的植被覆盖度,干旱河谷—山地森林交错带可能是阻止干旱区面积延伸、缓解干旱化进程最为重要的区域^[2]。然而,干旱区的不断

扩散一方面必然改变交错带系统的水分格局,影响植物的生存与生长,导致系统结构和功能的破坏;另一方面,交错带的植物也会发展相应的适应对策以应对水分格局的改变。抗氧化酶系统被认为是植物对抗胁迫环境最为直接的指标之一,可直接指示植物抵抗胁迫环境的能力^[3-4]。但已有的研究较多地关注于干旱核心区植物的抗旱特性^[5-9],极少注意到交错带植物对干旱环境的抵抗能力^[10],这不能满足干旱区交错带植被生态系统结构和功能调控的科学需求。

岷江上游干旱河谷—山地森林交错带是阻止岷江干旱河谷上延的关键区域,同时也是“5.12”汶川特大地震灾害的极重灾区之一^[11],尽管其生态系统结构和功能比较脆弱,但相对较好的水分和植被条件决定了交错带植被系统具有较大的可塑性。虽然部分研究已经注意到该交错带的重要生态功能^[12-13],但交错带乡土植物在不断加剧的干旱环境下适应能力并不清楚。因此,以交错带不同生活型的4

收稿日期: 2010-04-12 接受日期: 2010-05-10

*国家自然科学基金项目 (Nos. 30771702, 30471378)、“十一五”国家重大科技支撑计划课题 (Nos. 2006BAC01A11, 2008BAD98B03)、四川省杰出青年学科带头人培养基金 (No. 07ZQ026-022) 和四川高等学校科技创新重大培育计划 (Nos. 2007ZZ024, 09ZZ023) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 30771702, 30471378), the National Key R & D Pillar Program of China (Nos. 2006BAC01A011, 2008BAD98B03), the Excellent Youth Science and Technology Foundation of Sichuan, China (07ZQ026-022) and the Key Cultivation Program of the Education Department of Sichuan, China (07ZZ024 and 09ZZ023)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: scyangwq@163.com)

种典型植物——一年生禾草狗尾草 (*Setaria viridis*)、针叶树岷江柏 (*Cupressus chengiana*)、灌木树种高山柳 (*Salix paraqlesia*) 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 为实验材料, 研究不同干旱胁迫条件下植物叶片抗氧化酶系统和叶片色素特征的响应, 了解不同植物的抗旱特性, 以期为稳定和调控交错带系统结构和功能以及震后生态恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究地点为岷江上游典型干旱河谷—山地森林交错带, 是干旱河谷灌草丛与山地森林之间的交错区域, 位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县桃坪乡佳山村 (31°32'N, 103°26'E)。海拔1 750~2 500 m, 坡向和坡度分别为NE10°和30°, 年平均气温5.7~13.5 °C, 1月均温-7.4~3.1 °C, 7月均温14.5~22.7 °C, 年降水量491~836 mm, 年蒸发量1 100~1 600 mm。植被随海拔分异为干旱河谷灌草丛、常绿阔叶与落叶阔叶混交林、亚高山针叶林、高山灌丛草甸及高山高寒草甸。

1.2 实验材料

2009年3月初采集岷江干旱河谷—山地森林交错带表层土壤, 用适量的呋喃丹进行土壤杀虫, 充分混匀。土壤基本理化性质见表1。为模拟野外条件下土壤水分垂直分布特征, 本实验采用长1 m、宽1 m、高40 cm的木框。土壤堆放10 d后装入木框中, 每框装土250 kg。狗尾草种子于2008年10月采集于理县佳山, 2009年3月15日播种, 播种前通过水选和种皮颜色去除硬实, 选取籽粒饱满、大小一致的种子进行处理, 以保证出苗快并整齐。每框播种9粒, 播种深度约1.5 cm。从当地生长健康的高山柳植株上选取长势均一、健康无病虫害的枝条进行扦插, 每框4株。沙棘和岷江柏选取生长良好、健康无病虫害、长势均一的当年生实生苗进行移栽, 每框4株。所有实验木框均置于理县佳山村的实验大棚中 (31°32.68'N, 103°26.79'E, *a.s.l.* 2 118 m), 大棚顶部用透明塑料薄膜覆盖, 四周通风。实验开始一个月时所有实验木框均提供充足的水分以保证幼苗的稳定。所有实验木框进行统一管理。

表1 土壤理化性质特征

Table 1 Physical and chemical characteristics of the soil studied

pH	容重 Bulk density ($\rho/g\ cm^{-3}$)	田间持水量 Water holding capacity (P%)	有机碳 Organic C ($w/g\ kg^{-1}$)	全氮 Total N ($w/g\ kg^{-1}$)	全磷 Total P ($w/g\ kg^{-1}$)
8.16	2.46	27.13	7.87	0.53	0.05

1.3 实验设计

本实验采用3个水分梯度的随机实验设计: 土壤含水量为田间持水量的80% (对照); 土壤含水量为田间持水量的40% (中度干旱胁迫); 土壤含水量为田间持水量的20% (重度干旱胁迫)。待幼苗生长稳定, 从2009年4月25日开始实施水分处理。每个水分处理5个重复, 随机摆放于半受控环境中生长, 大棚只起到挡雨的作用。同样的方法每个处理装3盆未种植物盆土, 用来校正土壤水分蒸发。水分以便携式土壤水分仪 (型号: ML2X; 产地: 英国; 精度: $\pm 2\%$) 测量控制, 每月测量一次植物根系周围水分调节土壤中水分含量, 使植物生长环境中的土壤水分始终维持在初始范围之内 (土壤水分

含量分别为: 对照18%~22%, 中度胁迫10%~14%, 重度胁迫6%~8%)。隔天浇水, 为减小误差, 每次于同一时间 (18:00) 浇水。考虑到木框实验难以直接称重计算失水量, 根据以前盆栽实验的经验, 在每月的前几次浇水过程中调查每次浇水量以控制土壤水分, 以此来确定此月每次浇水量。

1.4 采样与测定方法

于2009年8月13日植物快速生长期, 选取生长稳定的成熟叶片约2.0 g, 摘下叶片后用蒸馏水冲洗并用滤纸吸干水分, 立即储存于液氮保存, 用于相关指标的测定。细胞膜透性采用电导仪测定, 以相对电导率表示^[14]; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用高锰酸钾滴定法测定, 以每克鲜样每分钟分解 H_2O_2 的毫克数表示; 丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸显色法测定, 在450 nm、532 nm和600 nm下测定吸光度, 单位为 $\mu mol\ g^{-1}$; 游离脯氨酸 (PRO) 采用磺基水杨酸显色法测定, 单位为 $\mu g\ g^{-1}(FW)$ ^[14-15]; 超氧化物歧化酶 (SOD) 采用氮蓝四唑 (NBT) 光化还原法测定, 以抑制NBT光化还原的50%为1个酶活性单位^[16]; 过氧化物酶 (POD) 采用愈创木酚法测定, 以每分钟内吸光度变化值表示酶活性大小; 叶绿素采用丙酮-乙醇-水混合液浸提比色^[14]。

1.5 数据统计分析

方差检验 (ANOVA) 比较不同干旱胁迫强度下细胞膜透性, SOD、POD、CAT活性及MDA、PRO、叶绿素含量差异。所有分析统计均在SPSS13.0统计软件上进行。

2 结果

2.1 叶片色素

干旱胁迫显著 ($P < 0.05$) 降低了高山柳、岷江柏和沙棘叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量, 两个干旱胁迫处理之间并无显著 ($P > 0.05$) 差异 (表2)。而狗尾草叶片仅在重度干旱胁迫条件下显著 ($P < 0.05$) 降低了叶绿体色素的含量。另外, 重度干旱胁迫显著降低了高山柳Chl a/b的值 ($P < 0.05$), 但显著 ($P < 0.05$) 增加了沙棘Chl a/b的值, 而对岷江柏和狗尾草Chl a/b的值并无显著影响。除重度干旱胁迫下, 4种植物Chl a/b值的顺序为: 狗尾草>沙棘>岷江柏>高山柳, 其他水分条件下, 4种植物Chl a/b值的顺序为: 狗尾草>岷江柏>沙棘>高山柳。不同水分条件下, 4种植物Car/Chl的值并无显著变化规律。

2.2 细胞膜透性、MDA和Pro含量

4种植物叶片相对电导率、MDA和Pro含量均随着干旱胁迫程度的增加而增加 (图1)。与对照相比, 重度干旱胁迫处理显著 ($P < 0.05$) 增加4种植物叶片相对电导率及MDA和Pro含量, 但中度干旱胁迫并未显著 ($P > 0.05$) 增加狗尾草叶片相对电导率、沙棘叶片MDA含量和高山柳Pro含量。另外, 4种植物叶片相对电导率在相同水分条件下并无明显差异, 狗尾草叶片MDA含量在同一干旱胁迫处理下均低于其他3种植物, 高山柳叶片MDA含量在同一干旱胁迫处理下均高于其他3种植物, 但高山柳叶片Pro含量在同一干旱胁迫处理下均低于其他3种植物。

2.3 抗氧化酶活性

4种植物叶片POD和SOD活性均表现出随干旱胁迫程度的增加而增加的趋势 (图2)。狗尾草和沙棘叶片POD活性在

表2 不同干旱胁迫处理下实验植物叶片中叶绿体色素含量的变化 ($\bar{x} \pm s, N=5$)
Table 2 Contents of chloroplast pigment ($\bar{x} \pm s, N=5$) of the examined plants under different drought treatments

处理 Treatment		Chl a (w/mg g ⁻¹)	Chl b (w/mg g ⁻¹)	Car (w/mg g ⁻¹)	Chl a/b	Car/Chl
高山柳 <i>S. paraqpleisia</i>	20%	1.77±0.25a	0.70±0.01a	0.52±0.02a	2.53±0.12a	0.20±0.01a
	40%	2.04±0.04a	0.74±0.04a	0.58±0.03b	2.77±0.15ab	0.21±0.01a
	80%	3.15±0.07b	1.12±0.09b	0.64±0.01c	2.82±0.12b	0.21±0.01a
岷江柏 <i>C. chengiana</i>	20%	1.64±0.04a	0.54±0.01a	0.52±0.02a	3.05±0.13a	0.21±0.01a
	40%	1.78±0.07a	0.58±0.03a	0.50±0.01a	3.05±0.11a	0.21±0.01b
	80%	2.21±0.12b	0.73±0.02b	0.64±0.03b	3.04±0.10a	0.24±0.02ab
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	20%	1.89±0.10a	0.60±0.03a	0.59±0.02a	3.17±0.09a	0.21±0.01a
	40%	1.94±0.14a	0.65±0.05a	0.58±0.01a	3.01±0.05b	0.22±0.01ab
	80%	2.47±0.02b	0.83±0.03b	0.68±0.03b	2.98±0.03b	0.24±0.02b
狗尾草 <i>S. viridis</i>	20%	0.62±0.02a	0.15±0.01a	0.17±0.01a	3.99±0.07a	0.21±0.02a
	40%	0.77±0.07b	0.18±0.03ab	0.20±0.01b	4.17±0.05b	0.21±0.01a
	80%	0.83±0.03b	0.20±0.01b	0.21±0.01b	4.07±0.03ab	0.22±0.01a

同一树种同一列中不同字母表示处理间的显著差异 ($P < 0.05, N = 5$)

Different letters within a column of the same tree indicate the significant differences among the treatments ($P < 0.05, N = 5$)

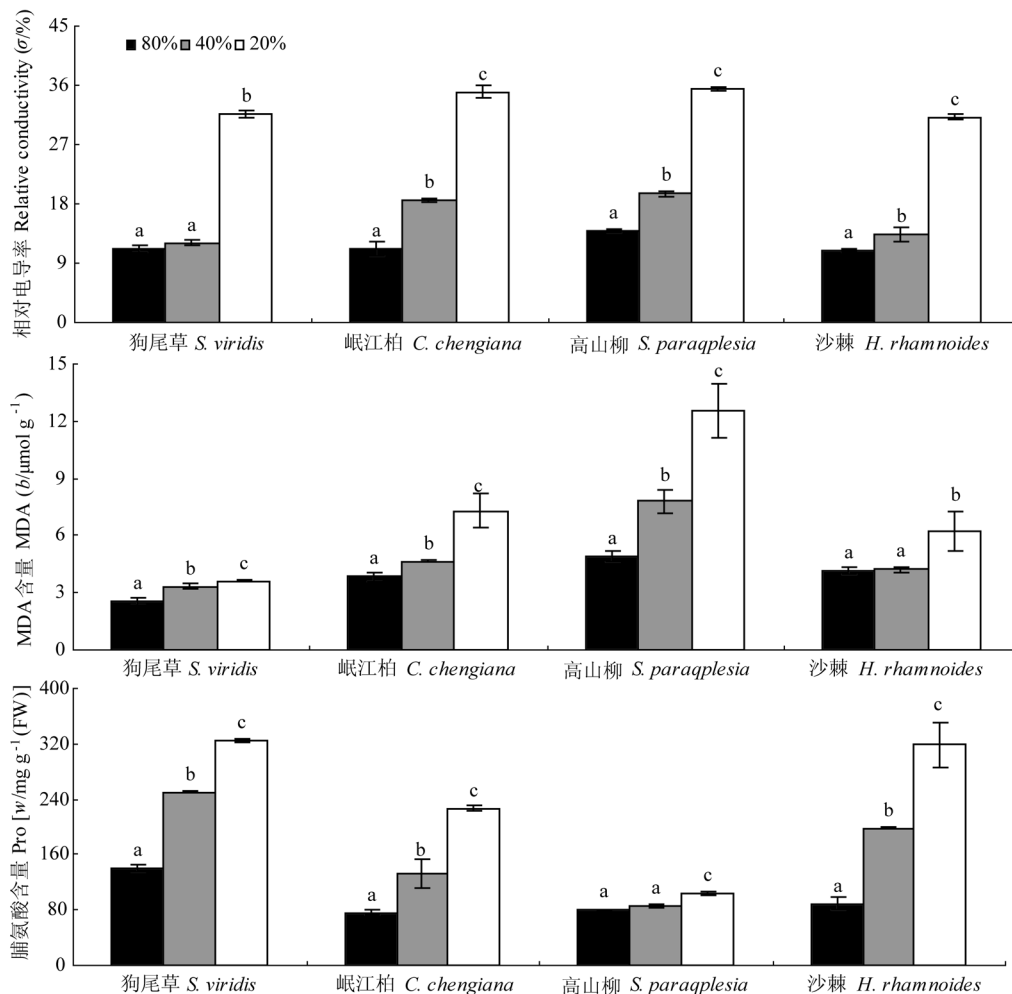


图1 不同干旱胁迫处理下实验植物的相对电导率及MDA和Pro含量

Fig. 1 Membrane permeability, MDA and Pro contents of the examined plants under different water stresses

图中横线代表标准差. 同一树种同一列中不同字母表示处理间的显著差异 ($P < 0.05, N = 5$). 下同

Bars indicate SD. Different letters within a column of the same tree indicate the significant differences among the treatments ($P < 0.05, N = 5$). The same below

相同水分处理下均明显高于高山柳和岷江柏, 且随着干旱胁迫程度的增加呈现增加的趋势. 相同水分条件下, 沙棘叶片SOD活性均大于其他3种植物. 中度干旱胁迫并未显著 ($P > 0.05$) 影响狗尾草叶片SOD活性. 然而, 尽管中度和重度干旱

胁迫均表现出增加4种植物叶片CAT活性的趋势, 但中度干旱胁迫条件下4种植物叶片CAT活性均最大. 在同一干旱胁迫条件下, 狗尾草和沙棘叶片CAT活性均明显高于岷江柏和高山柳.

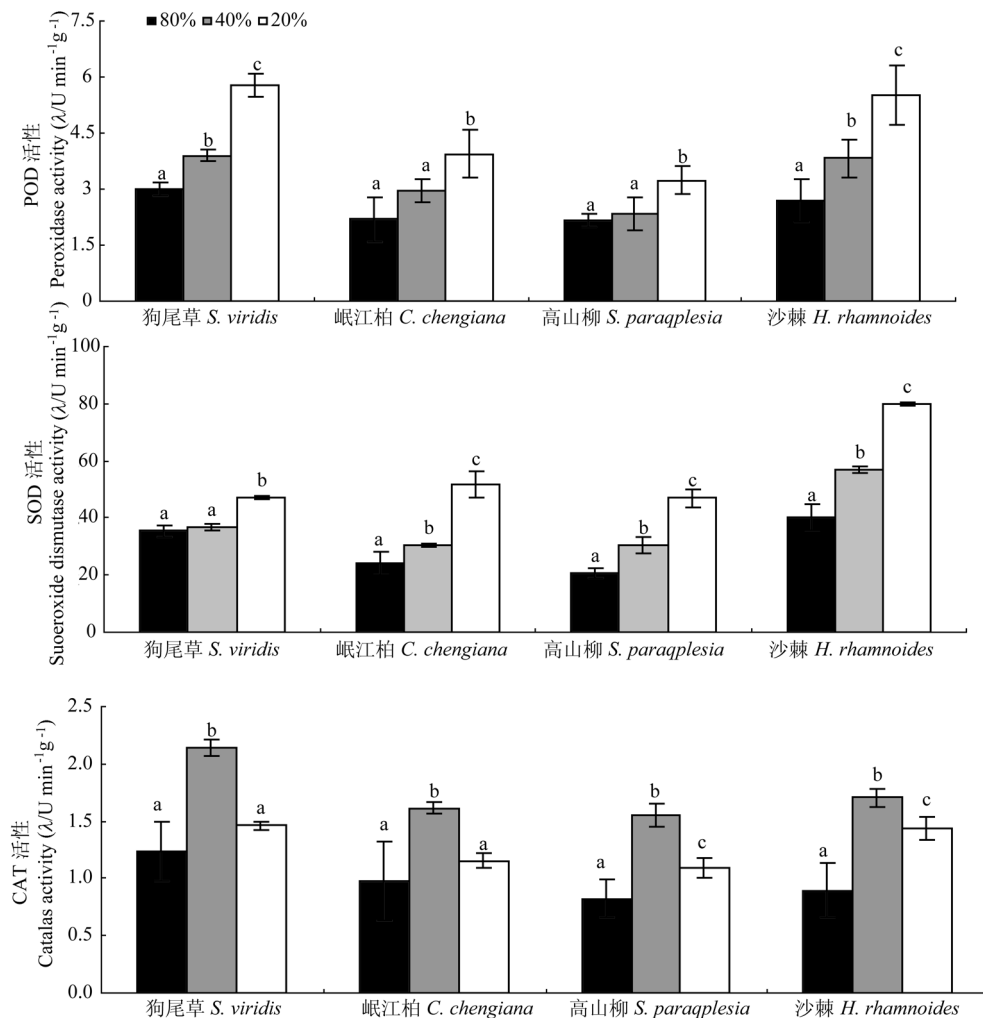


图2 不同干旱胁迫处理下实验植物POD、SOD和CAT活性
Fig. 2 POD, SOD and CAT activities of the examined plants under different water stresses

3 讨论与结论

植物抗性生理特征在胁迫条件下的变化是植物适应胁迫环境的重要体现。本研究结果表明,干旱胁迫增加了干旱河谷一山地森林交错带4种乡土植物叶片细胞膜透性、Pro和MDA含量及POD、SOD和CAT活性,改变了叶片色素含量和比例,但影响程度随干旱程度和物种的差异而改变。

干旱胁迫条件下植物叶片色素含量和比例的改变是植物适应缺水环境的重要特征,也是植物受害程度的重要体现。本项研究结果中尽管4种植物叶片色素含量均呈现随干旱胁迫增加而降低的趋势,但重度和中度干旱胁迫处理均显著降低了3种木本植物叶片色素含量,而仅重度干旱胁迫显著降低狗尾草叶片色素含量,与前人的研究结论^[17]一致,干旱胁迫叶绿素合成受阻,分解加快,导致叶绿素含量下降,而类胡萝卜素能及时清除叶绿体中活性氧,含量的降低可能是为了猝灭活性氧,减轻膜脂过氧化^[10, 18]。同时也说明草本植物如狗尾草可能相对于木本植物具有较高的抗旱能力。由于光捕获复合物(LHC)中具有相对较高的叶绿素b含量,叶绿素a/b的降低意味着LHC的破坏;而类胡萝卜素是天线色素的主要组成成分,Car/Chl的改变意味着LHC合成和热能扩散受到影响^[19]。4种植物Car/Chl在不同干旱胁迫条件下并无显

著差异,而重度干旱胁迫显著降低高山柳叶绿素a/b,但增加了沙棘叶绿素a/b,结果说明干旱胁迫对LHC的合成和热能的扩散影响相对较小。重度干旱胁迫在一定程度上破坏了高山柳叶片LHC,表明生活在水分条件相对好的高山柳抗旱性较差,而固氮植物沙棘具有较高的抗旱能力。

质膜透性反映了环境胁迫条件下植物细胞质膜受伤程度^[20]。一般来说,胁迫环境通常导致植物体内氧化胁迫^[21],常常表现为Pro和MDA含量升高,POD、SOD和CAT活性增大。叶片中MDA含量积累是活性氧毒害作用的标线,通常指示膜质过氧化^[22-23],是检测质膜在逆境条件下受伤害的一个重要指标。Pro是细胞质中重要的渗透剂和防脱水剂,对植物体内的酶和膜结构有保护作用^[16]。本项研究中,干旱河谷一山地森林交错带4种典型植物叶片MDA和Pro含量随干旱胁迫的增加而表现出增加的趋势,表明4种植物对干旱胁迫均具有一定的适应能力。由于MDA含量的高低和Pro的积累可反映植物抗旱能力和受害程度。狗尾草叶片MDA含量在干旱胁迫条件下均低于其他3种植物,说明干旱胁迫对狗尾草的生理伤害可能相对较小。相反地,高山柳MDA含量高于其他3种植物,而Pro含量低于其他3种植物,表明高山柳在干旱胁迫下受害程度最大,而其自我保护能力相对较差。与其他3种植物相比,高山柳抗旱能力可能相对较低。

干旱胁迫条件下植物体内产生的活性氧刺激了植物体内保护酶活性,使保护酶活性不同程度的升高^[24-25]。POD、SOD和CAT均可以清除植物体内的活性氧,可抵制膜脂过氧化并维护膜结构的完整。本项研究中干旱胁迫条件下4种植物叶片的3种酶活性都有不同程度的增加,充分体现了植物在受到胁迫伤害后的抗性保护。相对于重度干旱胁迫,中度干旱胁迫条件下4种植物叶片CAT活性均较高。由于CAT具有专一清除过氧化氢的功能,可保护细胞膜结构和功能^[26]。因此,重度干旱胁迫可能对植物产生了较大的不可逆伤害。相对于其他植物,狗尾草和沙棘叶片POD和CAT活性均高于其他两种植物,且沙棘SOD活性大于其他3种植物。这些结果也说明草本植物狗尾草和固氮植物沙棘可能具有相对较高的抗旱能力。

综上所述,干旱胁迫对岷江干旱河谷一山地森林交错带4种典型不同生活型植物均产生了一定程度的伤害,但4种植物在不同干旱胁迫条件下均表现出一定的抗旱能力。相对于岷江柏和高山柳,狗尾草和沙棘表现出较高的叶绿素a/b、Pro含量和较强的POD、SOD和CAT活性,具有较高的抗旱能力,意味着一年生草本植物狗尾草和具有一定固氮能力的沙棘更能较好地适应于干旱环境,但具体的机制可能还需要进一步的实验论证。尽管如此,这些结果不仅为了解交错带不同生活型物种在干旱条件下的适应提供了一些基础数据,而且进一步为稳定交错带系统结构和功能,延缓或阻止干旱区持续扩散提供了一定的理论依据。

References

- Maestre FT, Valladares F, Reynolds JF. Is the change of plant-plant interactions with abiotic stress predictable? A meta-analysis of field results in arid environments. *J Ecol*, 2005, **93**: 748-757
- Bailey RG. Identifying ecoregion boundaries. *Environ Manage*, 2004, **34**: 14-26
- Pan RZ (潘瑞焜), Wang XJ (王小菁), Li NH (李娘辉). *Plant Physiology*. 6th ed. Beijing: Higher Educate Press (北京: 高等教育出版社), 2005
- Du CK (杜朝昆), Li ZG (李忠光), Gong M (龚明). The adaptation to heat and chilling stresses and relation to antioxidant enzymes of Maise seedlings induced by salicylic acid. *Plant Physiol Commun*, 2005, **41** (1): 19-22
- Liu GH (刘国华), Ma KM (马克明), Fu BJ (傅伯杰), Guan WB (关文彬), Kang YX (康永祥), Zhou JY (周建云), Liu SL (刘世梁). Aboveground biomass of main shrubs in dry valley of Minjiang River. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2003, **23** (9): 1757-1764
- Zhou ZQ (周志琼), Bao WK (包维楷), Wu FZ (吴福忠), Pang XY (庞学勇), He X (何晓), Wu N (吴宁). Growth and reproduction of *Rosa multibracteata* population in Minjiang River dry valley. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2007, **18** (7): 1407-1413
- Li FL (李芳兰), Bao WK (包维楷), Pang XY (庞学勇), Leng L (冷俐). Seedling emergence, survival and growth of five endemic species in the valley of Minjiang River. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2009, **29** (5): 2219-2230
- Reynolds JF, Smith MS, Lambin EF, Turner BL, Mortimore M, Batterbury SP, Downing TE, Dowlatabadi H., Fernández RJ, Herrick JE, Huber-Sannwald E, Jiang H, Leemans R, Lynam T, Maestre FT, Ayarza M, Walker B. Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*, 2007, **316**: 847-851
- Wu F, Bao W, Zhou Z, Wu N. Carbon accumulation, nitrogen and phosphorus use efficiency of *Sophora davidii* seedlings in response to N supply and water stress. *J Arid Environ*, 2009, **12** (73): 1067-1073
- Wang HM (王红梅), Bao WK (包维楷), Li FL (李芳兰). Physiological and biochemical responses of two-years-old *Sophora davidii* seedling leaves to different water stresses. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2008, **14** (6): 757-762
- Xu XL (徐新良), Jiang D (江东), Zhuang DF (庄大方), Qiu DS (邱冬生). Assessment about the impact of Wenchuan Earthquake on ecological environment. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2008, **28** (12): 5899-5908
- Liu B (刘彬), Wu FZ (吴福忠), Zhang J (张健), Yang WQ (杨万勤). Key issues in restoration on earthquake-damaged ecosystem at the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2008, **28** (12): 5892-5898
- Tan B (谭波), Zhang J (张健), Yang WQ (杨万勤), Wang M (汪明), Xue Q (薛樵), Dong SG (董生刚). The biomass and carbon stock of fine roots in the representative plantation in the ecotone between dry valleys and mountain forest in the Minjiang River Basin. *Sichuan J Sci & Technol* (四川林业科技), 2008, **29** (2): 18-22
- Li HS (李合生), Sun Q (孙群), Zhao SJ (赵世杰), Zhang WH (章文华). *Experimental Principle and Technique for Plant Physiology and Biochemistry*. Beijing: Higher Education Press (北京: 高等教育出版社), 2000
- Gao JF (高俊风). *Experimental Technique for Plant Physiology*. Xi'an, China: World Books Press (西安: 世界图书出版社), 2000
- Liu ZQ (刘祖琪), Zhang SC (张石诚). *Resistibility of Plant Physiology*. Beijing: Chinese Agriculture Press (北京: 中国农业出版社), 1994. 369-382
- Wu F, Bao W, Li F, Wu N. Effects of Water Stress and Nitrogen Supply on leaf gas exchange and fluorescence parameters of *Sophora davidii* seedlings. *Photosynthetica*, 2008, **46**: 40-48
- Smirnoff N. Therole of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New Phytol*, 1993, **125**: 27-58
- Jeon MW, Ali MB, Hahn EJ, Paek KY. Photosynthetic pigments, morphology and leaf gas exchange during ex-vitro acclimatization of micro-propagated CAM *Doritaenopsis* plantlets under relative humidity and air temperature. *Environ & Exp Bot*, 2006, **55**: 183-194
- Li Y (李源), Shi SL (师尚礼), Wang Z (王赞), Wang YQ (王运琦), Zhang Q (张耿), Sun GZ (孙桂芝). Physiological study on drought resistance of *Dactylis glomerata* under drought stress at seedling stage. *Chin J Grassl* (中国草地学报), 2007, **29** (2): 35-39
- Tracy M, Montante JM, Allenson TE, Hough RA. Long-term responses of aquatic macrophyte diversity and community structure to variation in nitrogen loading. *Plant Physiol Biochem*, 2003, **41**: 391-397
- Chen KN (陈开宁), Chen XF (陈小峰), Chen WM (陈伟民), Liu ES (刘恩生), Lan CJ (兰策介), Xu H (许海). Effects of sediments on submerged macrophytes growth. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2006, **17** (8): 1511-1516
- Wang AG (王爱国), Shao CB (邵从本), Luo GH (罗广华). Research of MDA as index of membrane lipid peroxidation. *Plant Physiol Commun* (植物生理学通讯), 1986, **28** (3): 84-90
- Jiang YS (姜英淑), Chen SM (陈书明), Wang QY (王秋玉), Lu BM (卢宝明). Effects of the drought stress on physiological characteristics of two *Cerasus humilis* provenances. *Sci Silv Sin* (林业科学), 2009, **45** (6): 6-11
- Peng FR (彭方仁), Yang YZ (杨玉珍), Zhu ZX (朱振贤). Effects of drought stress on lipid peroxidation and protective enzyme systems in leaf of *Toona sinensis* from different provenances. *J Plant Resour & Environ* (植物资源与环境学报), 2007, **16** (2): 44-47
- Scandalios JG. Oxygen stress and superoxide dismutase. *Plant Physiol*, 1993, **101**: 7-12