

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 4 期 2012 年 2 月 (半月刊)

目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响.....	马长安,徐霖林,田伟,等	(1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价	孙才志,杨磊	(1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征	侯勇,高志岭,马文奇,等	(1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟.....	高照全,冯社章,张显川,等	(1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应.....	宋春桥,游松财,柯灵红,等	(1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应	唐振兴,何志斌,刘鹄	(1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素.....	田风霞,赵传燕,冯兆东,等	(1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应.....	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等	(1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程.....	马井会,顾松强,陈敏,等	(1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系	田丰歌,徐兆礼	(1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状.....	张跃环,王昭萍,闫喜武,等	(1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征.....	李慧,王江涛	(1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响.....	魏杰,赵文,杨为东,等	(1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅.....	文世勇,宋琍琍,龙华,等	(1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应.....	陈书军,陈存根,邹伯才,等	(1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局.....	田中平,庄丽,李建贵	(1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较.....	石松利,王迎春,周红兵,等	(1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁	(1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响	肖逸,王兴祥,王宏伟,等	(1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生环境.....	张翼飞,王炜,梁存柱,等	(1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系.....	管孝艳,王少丽,高占义,等	(1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性.....	刘春利,胡伟,贾宏福,等	(1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局.....	张春华,王宗明,居为民,等	(1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立.....	王鹏,张春庆,陈化榜,等	(1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较.....	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等	(1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表	曹宇,鄧军锐,孔译贤	(1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等	(1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别.....	许文雯,孙翔,朱晓东,等	(1264)
珠三角城市绿地 CO ₂ 通量的季节特征.....	孙春健,王春林,申双和,等	(1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例.....	吴以中,朱沁园,刘宁,等	(1283)
专论与综述		
湿地退化研究进展.....	韩大勇,杨永兴,杨杨,等	(1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评	杨荣,苏永中,王雪峰	(1308)
问题讨论		
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性	屠振力,方俐晶,王家刚	(1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响	杨永胜,卜崇峰,高国雄	(1327)
研究简报		
祁连山典型灌丛降雨截留特征.....	刘章文,陈仁升,宋耀选,等	(1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法.....	喻梅,周守标,吴晓艳,等	(1347)



封面图说: 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才被发现的新的鸥种,因此得名)。1931年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101030003

单长卷, 韩蕊莲, 梁宗锁. 干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性. 生态学报, 2012, 32(4): 1174-1184.

Shan C J, Han R L, Liang Z S. Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1174-1184.

干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性

单长卷^{1,2}, 韩蕊莲^{1,*}, 梁宗锁¹

(1. 西北农林科技大学, 杨凌 712100; 2. 河南科技学院, 新乡 453003)

摘要: 采用盆栽实验, 对干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草冰草、长芒草、无芒隐子草和白羊草叶片过氧化氢 (H_2O_2)、丙二醛 (MDA) 含量、抗氧化酶超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、谷胱甘肽还原酶 (GR)、脱氢抗坏血酸还原酶 (DHAR)、单脱氢抗坏血酸还原酶 (MDHAR)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GPX) 活性和非酶抗氧化物质还原型抗坏血酸 (AsA)、还原型谷胱甘肽 (GSH)、类胡萝卜素 (Car) 含量进行了测定。结果表明: 随着干旱胁迫程度的加剧, 4 种乡土禾草叶片 H_2O_2 、MDA 含量均呈增加趋势, 这说明它们均遭受了干旱所造成的氧化胁迫, 且干旱程度越大其遭受的氧化胁迫也越大。由于 4 种乡土禾草均为禾本科植物并生存于相同的生态环境中, 它们在抗氧化特性上具有一定共性。在 60% FC 和 45% FC 干旱胁迫下, 4 种乡土禾草均可以通过增加抗氧化酶 SOD、CAT、APX、GR、DHAR、MDHAR、GPX 活性和非酶抗氧化物质 AsA 含量来抵御干旱所造成的氧化胁迫。由于种属差异, 4 种乡土禾草的抗氧化特性也存在差异。在 60% FC 和 45% FC 干旱胁迫下, 冰草、无芒隐子草和白羊草还通过增加非酶抗氧化物质 Car 含量增强抗氧化能力, 长芒草和白羊草则还可通过增加 POD 活性抵御干旱。在 60% FC 干旱胁迫下, 冰草还可通过增加非酶抗氧化物质 GSH 含量提高其抗氧化性。采用隶属函数法对 4 种乡土禾草抗氧化能力的综合评价表明, 冰草的抗氧化能力最强, 其次为无芒隐子草和白羊草, 长芒草的抗氧化能力最差。

关键词: 干旱胁迫; 抗氧化能力; 乡土草种; 黄土高原

Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress

SHAN Changjuan^{1,2}, HAN Ruilian^{1,*}, LIANG Zongsuo¹

1 Northwest A & F University, Yangling 712100, China

2 Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

Abstract: The grasses *Agropyron cristatum*, *Stipa bungeana*, *Cleisto genessongorica*, and *Bothriochloa ischaemum* are widely distributed on the Loess Plateau, and all are drought-resistant to varying degrees. However, little is known about the responses of their antioxidant systems to drought stress. The objective of this study was to investigate the antioxidant properties of four native grasses in response to drought stress, to provide a theoretical basis for selecting grasses suitable for vegetation/ecological restoration on the Loess Plateau. The treatments consisted of three levels of drought; 80, 60, and 45% of field capacity (FC) levels. These moisture levels were obtained by a weighing method using a pot experiment system. Leaf samples were taken from the four native grasses after 30 days of drought treatments.

Assays were conducted on the leaf tissue to determine the activities of the following antioxidant enzymes: superoxide dismutase (SOD, EC 1. 15. 1. 1), catalase (CAT, EC 1. 11. 1. 6), peroxidase (POD, EC 1. 11. 1. 7), ascorbate peroxidase (APX, EC 1. 11. 1. 11), glutathione reductase (GR, EC 1. 6. 4. 2), monodehydroascorbate reductase

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-BR-02, KZCX2-YW-443, KZCX2-XB2-05-01); 国家“十一五”规划资助项目 (2008BAD98B08)

收稿日期: 2011-01-03; 修订日期: 2011-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ruilianxiao@yahoo.com.cn

(MDHAR, EC 1.6.5.4), dehydroascorbate reductase (DHAR, EC 1.8.5.1), and glutathione peroxidase (GPX, EC 1.11.1.9). In addition, we determined the contents of hydrogen peroxide (H_2O_2), malondialdehyde (MDA), reduced glutathione (GSH), reduced ascorbic acid (AsA) and carotenoid (Car) in the leaves. The results showed that the MDA and H_2O_2 contents in the leaves of the four grasses increased with increasing levels of drought stress. These results suggested that all the grasses suffered oxidative damage under different levels of drought stress and that the oxidative damage became more serious with increasing levels of drought stress. According to their MDA and H_2O_2 contents, the magnitude of oxidative damage was greatest in *S. bungeana*, followed by *B. ischaemum*, then *C. genessongorica*, and then *A. cristatum*. The four grasses enhanced their antioxidant capacity by increasing activities of antioxidant enzymes and the contents of antioxidant substances under different levels of drought stress. The four grasses all belong to the Gramineae family and inhabit the same ecological environment. Therefore, they showed some similarities in their antioxidant responses to drought stress. At both 60% and 45% FC levels, all four grasses protected themselves against drought-induced oxidative damage by increasing the activities of SOD, CAT, APX, GR, DHAR, MDHAR, and GPX, and their AsA content. However, since the four grasses were all different species, there were also some differences in their antioxidant responses. At both 60% and 45% FC levels, *A. cristatum*, *C. genessongorica*, and *B. ischaemum* protected themselves by increasing their Car content, while *S. bungeana* and *B. ischaemum* protected themselves by increasing POD activity. At the 60% FC level, *A. cristatum* showed an increase in GSH content. The overall trend in antioxidant capacity for the four grasses was as follows: *A. cristatum* > *C. genessongorica* > *B. ischaemum* > *S. bungeana*, as determined by comprehensive evaluation using the subject function method. Above results suggested that *A. cristatum* is the most drought-resistant, followed by *C. genessongorica* and *B. ischaemum*, while *S. bungeana* is the least drought-resistant. Thus, *A. cristatum*, *C. genessongorica*, and *B. ischaemum* are suitable grasses for vegetation/ecological restoration on the Loess Plateau.

Key Words: drought stress; antioxidant property; native grass; the Loess Plateau

中国西北黄土高原半干旱地区水土流失严重。为了减少水土流失,退耕还林还草成为一项重要的生态任务。近 40a 来,种草已经成为中国黄土高原地区保持水土、修复生态环境的主要措施^[1]。随着气候的日益恶化,水分成为该区影响植物生产、植被生长和生态修复的主要限制因子。因此,选择具有较强抗旱性的草种对黄土区的植被和生态修复具有重要意义。

干旱胁迫是影响植物生存、生长和产量的主要环境因子之一。干旱胁迫经常导致植物体内活性氧的积累,从而对植物造成氧化胁迫^[2-3]。为了保护自身免受氧化胁迫的伤害,植物已经进化出了有效的抗氧化系统来清除活性氧^[4]。植物的抗氧化系统包括抗氧化酶和非酶抗氧化物质。植物体内主要的抗氧化酶包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸氧化酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)、单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)^[3,5-6]。SOD 在整个抗氧化系统中具有重要作用,可以歧化 $\cdot O_2$ 生成 H_2O_2 和 O_2 ,生成的 H_2O_2 则可以被 CAT、POD 和参与抗坏血酸-谷胱甘肽循环的酶类(APX、GR、DHAR 和 MDHAR)所清除,GPX 则可以通过直接清除膜脂过氧化物而修复氧化胁迫对膜造成的伤害。因此,各种抗氧化酶的协调作用在维持低水平的活性氧和保护植物细胞免受氧化胁迫伤害中具有重要作用。此外,非酶抗氧化物质也是植物抗氧化系统的重要组成成员,主要的非酶抗氧化物质包括还原型抗坏血酸(AsA)、还原型谷胱甘肽(GSH)和类胡萝卜素(Car)等^[7-9]。

中国西北黄土高原半干旱区乡土草种冰草(*Agropyron cristatum*)、无芒隐子草(*Cleisto genessongorica*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)均为该地区广泛分布的草种,且都具有较高的营养价值和一定的抗旱性^[10]。大量的研究表明,植物的抗氧化特性与其自身的抗旱性具有密切的关系^[3]。但到目前为止,人们对 4 种乡土禾草的研究集中在生长和水分利用特性上^[11-13],对其抗氧化特性的研究尚不清楚。研究它们自身的抗氧化系统对干旱胁迫的响应机制具有重要的理论和应用价值,可以为黄土高原半干旱区生态

环境修复适宜草种的选择提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

4 种试验材料的种子采集于中国西北黄土高原半干旱地区的延安市。采用盆栽实验的方法进行露天培养,试验地点为中国科学院水利部水土保持研究所。试验用塑料桶高 20cm,口径 25cm,空塑料盆重 0.87 kg,装土后重 5.37 kg,所用土壤采自于陕西杨凌附近的农田。种子经表面消毒后,播种于盆中,每隔 2d 利用称重法将土壤水分控制在正常水平(田间持水量的 80%)。待种子发芽后,每盆留高度和生长状况基本一致的 15 株植株,并进行正常浇水,将土壤水分控制在正常水平。阴雨天时,利用可移动遮雨棚防止雨水的渗入,盆的表面用草覆盖以避免盆土表面的蒸发。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设置

当植株长到 1 个月大时,进行不同的水分处理。共设 3 个处理水平,分别为田间持水量的 80% (正常水平,对照)、60% (中度胁迫)和 45% (严重胁迫),利用称重法控制土壤水分含量,每天进行称重并补充各处理消耗的水分,以确保将土壤水分控制在各个处理水平,具体参照 Shao 等的方法^[14]。试验重复 5 次,每个处理 5 盆植株。处理 30d 时,选择植株顶部生长状况基本一致的充分展开叶片,并迅速用液氮速冻,保存于-80℃ 冰箱中。

1.2.2 测定项目和方法

过氧化氢(H_2O_2)和丙二醛(MDA)含量测定 H_2O_2 含量按照 Jiang and Zhang 的方法测定^[15],MDA 含量按照 Hodges 等的方法测定^[16]。

抗氧化酶活性测定 SOD(EC 1.15.1.1)活性参照 Giannopolitis and Ries 的方法^[17],CAT(EC 1.11.1.6)活性参照 Kato and Shimizu 的方法测定^[18],POD(EC 1.11.1.7)活性参照 Eglely 等的方法测定^[19],APX(EC 1.11.1.11)、GR(EC 1.6.4.2)、MDHAR(EC 1.6.5.4)和 DHAR(EC 1.8.5.1)活性按照 Shan and Liang 的方法测定^[21],GPX(EC 1.11.1.9)的活性测定按照 Khatun 等的方法^[22]。

非酶抗氧化物质含量测定 AsA 的测定参照 Hodges 等的方法^[23],GSH 的测定参照 Griffith 等的方法^[24],类胡萝卜素的测定参照 Evans 的方法^[25]。

蛋白含量的测定 蛋白含量的测定参照 Bradford 的方法^[26]。

用刘学义提出的隶属函数法对 4 种乡土草种抗氧化能力进行综合评价^[27]。用下式计算每个草种各项指标的具体隶属函数值: $X_u = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,式中 X 为参试草种某一抗氧化指标的测定值, X_{\max} 、 X_{\min} 分别为所有草种中该指标的最大值和最小值,本研究中所测定的 SOD、POD、CAT、APX、GR、DHAR、MDHAR、GPX、AsA、GSH 和类胡萝卜素指标适用于此公式;若某一指标与抗旱性呈负相关,可通过反隶属函数计算其隶属函数值,公式为: $X_u = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,本研究中所测定的 H_2O_2 和 MDA 指标适用于此公式。最后把每个草种各项指标隶属函数值累加,取其平均值,根据各草种平均隶属函数值大小确定其抗氧化能力强弱。平均值越大,抗氧化能力越强,反之,抗氧化能力越弱。

1.3 统计分析

所有数据均为 5 次重复实验所得数据的平均值,在 $\alpha = 0.05$ 水平上进行方差分析和 Duncan's 多重比较。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 4 种乡土草种 H_2O_2 和 MDA 含量的影响

由图 1 可知,随着干旱胁迫的加剧,4 种草种叶片的 H_2O_2 和 MDA 含量均呈增加趋势。在不同干旱胁迫条件下,冰草叶片的 H_2O_2 和 MDA 含量均最低,长芒草叶片的 H_2O_2 和 MDA 含量均最高。在正常水分条件下,4 种草种叶片的 H_2O_2 和 MDA 含量之间的差异均不显著。在中度和严重干旱胁迫下,长芒草叶片的 H_2O_2 和 MDA 含量均显著高于其它 3 种草种 ($P < 0.05$),无芒隐子草和白羊草叶片的 H_2O_2 和 MDA 含量显著高于冰草

($P < 0.05$), 但无芒隐子草和白羊草叶片的 H_2O_2 和 MDA 含量差异不显著。这些研究结果表明, 干旱胁迫可以对 4 种草种造成不同程度的氧化胁迫, 其中冰草所遭受的氧化胁迫程度最低, 长芒草所遭受的氧化胁迫程度最高。

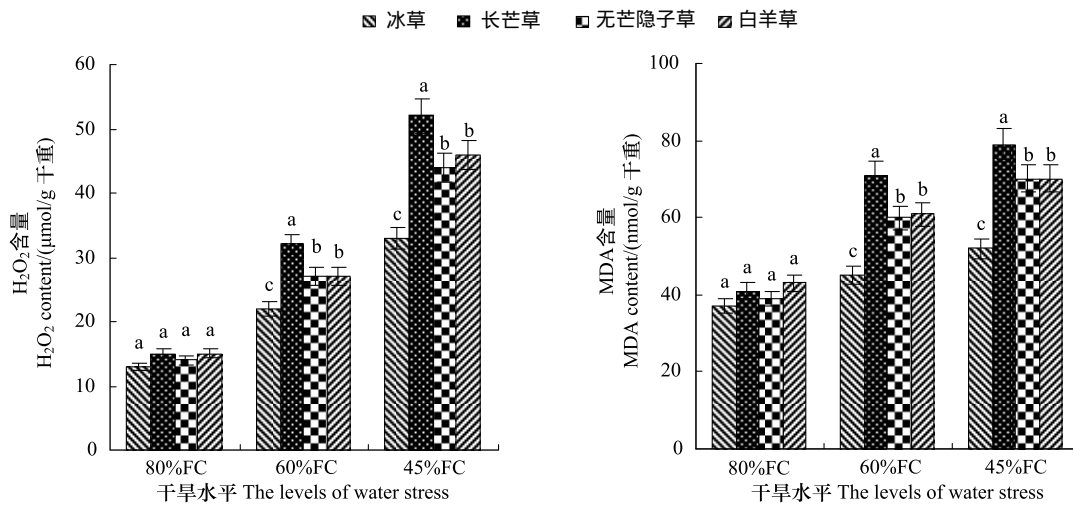


图 1 水分胁迫对 4 种乡土草种 H_2O_2 和 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effects of drought stress on the contents of H_2O_2 and MDA in the leaves of four native grasses

2.2 干旱胁迫对 4 种乡土草种 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

由图 2 可知, 随着干旱胁迫程度的加剧, 4 种乡土草种叶片 SOD 和 CAT 活性均呈增加趋势。在正常水分条件下, 4 种草种的 SOD 和 CAT 活性之间的差异均不显著。在中度和严重胁迫程度下, 冰草叶片的 SOD 活性均显著高于其它 3 种草种 ($P < 0.05$), 但其它 3 种草种间的 SOD 活性差异均不显著; 长芒草叶片的 CAT 活性均显著高于其它 3 种草种 ($P < 0.05$), 但其它 3 种草种间的 CAT 活性差异均不显著。由图 3 可知, 在正常水分条件下, 长芒草叶片的 POD 活性显著高于其它 3 种草种 ($P < 0.05$), 冰草和白羊草的 POD 活性显著高于无芒隐子草 ($P < 0.05$), 但冰草和白羊草的 POD 活性之间差异不显著。在干旱胁迫条件下, 长芒草和白羊草 POD 活性均呈增加趋势。在中度和严重干旱下, 长芒草叶片 POD 活性分别比对照增加了 103.9% 和 208.5%, 白羊草叶片 POD 活性分别比对照增加了 92.7% 和 219.2%。但冰草和无芒隐子草叶片的 POD 活性在干旱胁迫

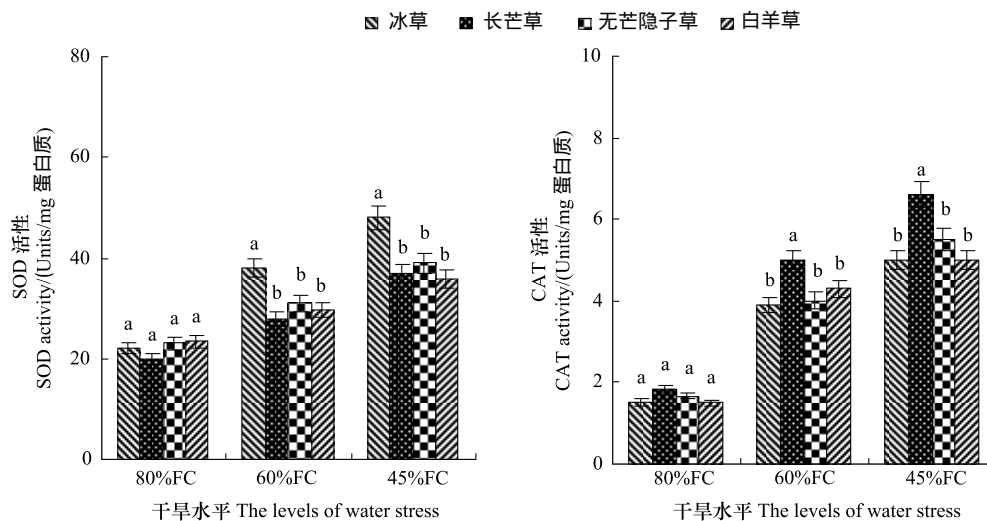


图 2 干旱胁迫对 4 种乡土草种 SOD 和 CAT 活性的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on the activities of SOD and CAT in the leaves of four native grasses

条件下呈降低趋势。在中度干旱下,冰草和无芒隐子草叶片 POD 活性分别比对照降低了 29.9% 和 38.5%。在严重干旱下,冰草和无芒隐子草叶片 POD 活性分别比对照降低了 69.3% 和 60.2%。在中度干旱下,4 种草种间的 POD 活性均存在显著差异 ($P < 0.05$)。在严重干旱下,长芒草叶片的 POD 活性显著高于其它 3 种草种 ($P < 0.05$),白羊草 POD 活性显著高于冰草和无芒隐子草 ($P < 0.05$),而后二者之间差异不显著。

2.3 干旱胁迫对 4 种乡土草种 APX、GR、DHAR 和 MDHAR 活性的影响

由图 4 可知,在干旱胁迫条件下,冰草具有较高的 APX 活性,其次为无芒隐子草和白羊草,长芒草 APX 活性最低。随着干旱胁迫的加剧,4 种乡土草种叶片的 APX 活性均呈增加趋势。在 60% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 APX 活性分别比对照增加了 183.8%、136.0%、123.1% 和 88.5%。在 45%

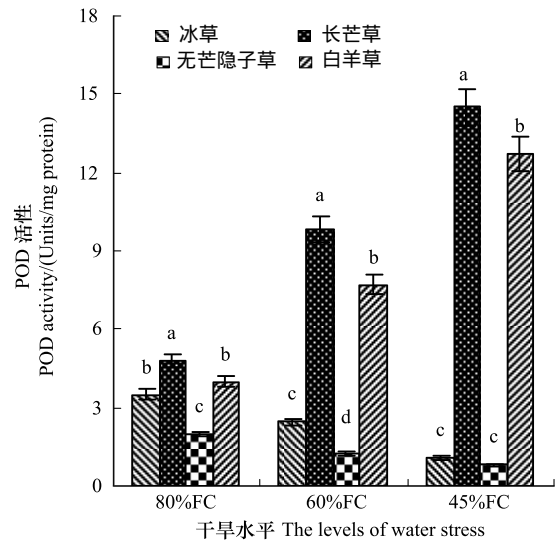


图 3 干旱胁迫对 4 种乡土草种 POD 活性的影响
Fig. 3 Effects of drought stress on the POD activity in the leaves of four native grasses

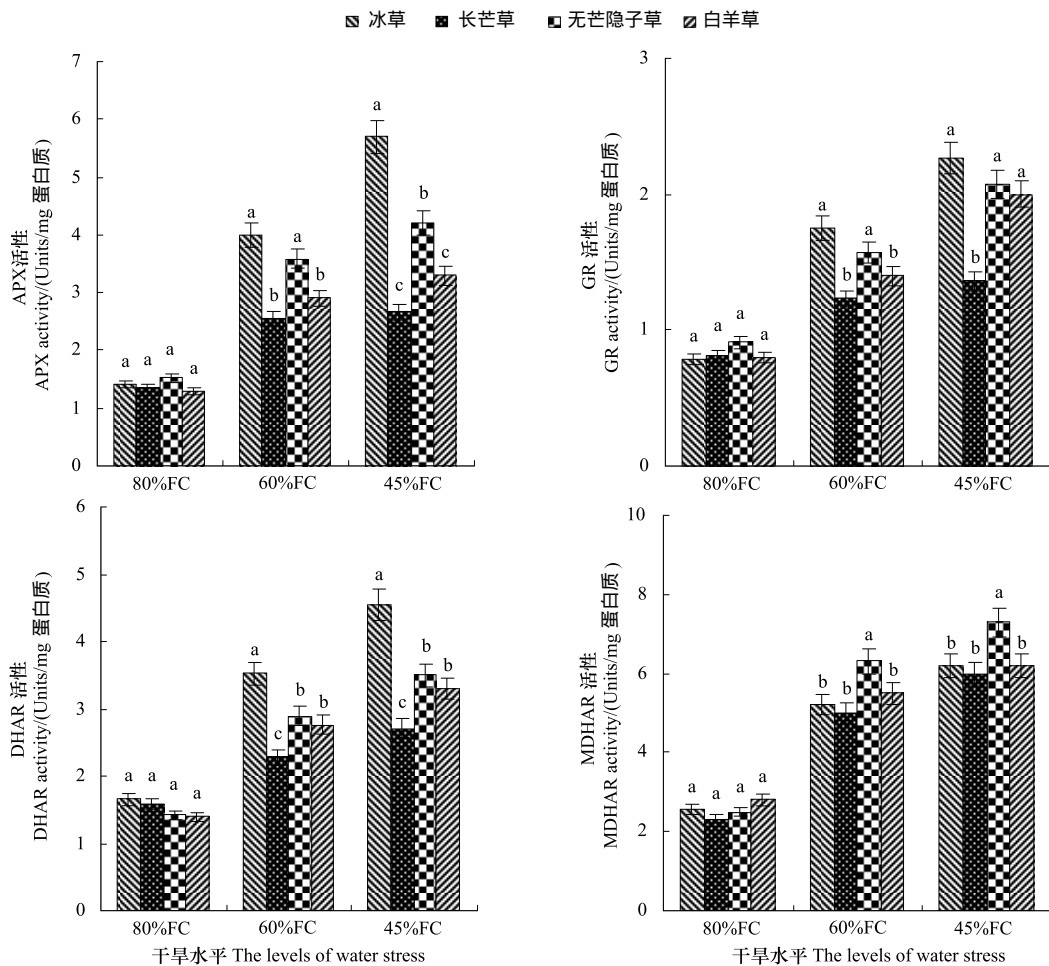


图 4 干旱胁迫对 4 种乡土草种 APX、GR、DHAR 和 MDHAR 活性的影响
Fig. 4 Effects of drought stress on the activities of APX, GR, DHAR and MDHAR in the leaves of four grasses

FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 APX 活性分别比对照增加了 306.5%、177.7%、153.8% 和 96.9%。方差分析表明,在正常水分条件下,4 种草种叶片的 APX 活性差异不显著。在中度干旱下,冰草和无芒隐子草的 APX 活性显著高于白羊草和长芒草($P < 0.05$),而冰草和无芒隐子草之间差异不显著,白羊草和长芒草之间差异亦不显著。在严重干旱下,冰草的 APX 活性显著高于其它 3 种草种($P < 0.05$),无芒隐子草则显著高于白羊草和长芒草($P < 0.05$),而白羊草和长芒草之间差异不显著(图 4)。

干旱胁迫条件下 GR 活性在 4 种草种间亦存在显著差异($P < 0.05$)(图 4)。随着干旱胁迫的加剧,4 种乡土草种叶片的 GR 活性均呈增加趋势。在干旱胁迫条件下,冰草具有较高的 GR 活性,其次为无芒隐子草和白羊草,长芒草 GR 活性最低。方差分析表明,在正常水分条件下,4 种草种叶片的 GR 活性差异不显著。在中度干旱下,冰草和无芒隐子草的 GR 活性显著高于白羊草和长芒草($P < 0.05$),而冰草和无芒隐子草之间差异不显著,白羊草和长芒草之间差异亦不显著。在严重干旱下,冰草、无芒隐子草和白羊草的 GR 活性均显著高于长芒草($P < 0.05$),而冰草、无芒隐子草和白羊草之间差异不显著(图 4)。

干旱胁迫条件下 4 种草种叶片的 DHAR 活性均显著增加(图 4)。在 60% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 DHAR 活性分别比对照增加了 112.4%、103.1%、98.6% 和 43.6%。在 45% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 DHAR 活性分别比对照增加了 174.1%、146.2%、137.4% 和 71.3%。方差分析表明,在正常水分条件下,4 种草种叶片的 DHAR 活性差异不显著。在中度和严重干旱下,冰草的 DHAR 活性显著高于无芒隐子草和白羊草($P < 0.05$),而无芒隐子草和白羊草之间差异不显著,无芒隐子草和白羊草的 DHAR 活性显著高于长芒草($P < 0.05$)(图 4)。

在 60% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 MDHAR 活性分别比对照增加了 102.3%、152.6%、96.4% 和 114.9%(图 4)。在 45% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 MDHAR 活性分别比对照增加了 141.2%、191.5%、121.4% 和 157.9%。在 60% FC 和 45% FC 水平,4 种乡土草种叶片 MDHAR 活性的大小顺序均为:无芒隐子草>白羊草>冰草>长芒草。方差分析表明,在正常水分条件下,4 种草种叶片的 MDHAR 活性差异不显著。在中度和严重干旱下,无芒隐子草的 DHAR 活性显著高于冰草、白羊草和长芒草($P < 0.05$),而冰草、白羊草和长芒草之间差异均不显著(图 4)。

2.4 干旱胁迫对 4 种乡土草种 GPX 活性的影响

由图 5 可知,随着干旱胁迫的加剧,4 种乡土草种叶片的 GPX 活性均呈增加趋势。在 60% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 GPX 活性分别比对照增加了 78.5%、40%、24% 和 28.2%。在 45% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 GPX 活性分别比对照增加了 150%、154.7%、96% 和 96.5%。方差分析表明,在正常水分条件下,4 种草种叶片的 GPX 活性差异不显著。在中度干旱下,冰草的 GPX 活性显著高于无芒隐子草、白羊草和长芒草($P < 0.05$),而无芒隐子草、白羊草和长芒草之间差异不显著。在严重干旱下,冰草的 GPX 活性显著高于无芒隐子草、白羊草和长芒草($P < 0.05$),无芒隐子草则显著高于白羊草和长芒草($P < 0.05$),而白羊草和长芒草之间差异不显著。在 60% FC 和 45% FC 水平,4 种乡土草种叶片 GPX 活性的大小顺序均为:无芒隐子草>白羊草>冰草>长芒草。

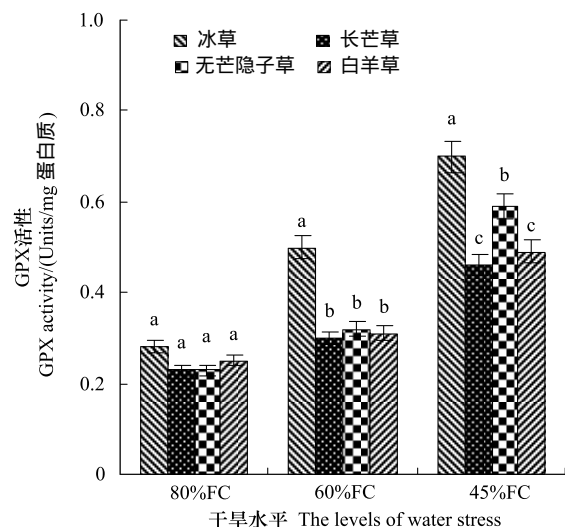


图 5 干旱胁迫对 4 种乡土草种 GPX 活性的影响

Fig. 5 Effects of drought stress on the GPX activity in the leaves of four native grasses

2.5 干旱胁迫对 4 种乡土草种 AsA、GSH 和 Car 含量的影响

由图 6 可知,冰草、无芒隐子草和白羊草叶片 GSH 含量从 80% FC 水平到 60% FC 水平表现为增加,而在 45% 水平下则又降低。而长芒草叶片 GSH 含量则随着干旱胁迫程度的加剧而逐渐降低。在 60% FC 和 45% FC 水平,冰草叶片 GSH 含量均显著高于其他草种,无芒隐子草和白羊草次之,长芒草最低。方差分析表明,在正常水分条件下,4 种草种叶片的 GSH 含量差异不显著。在中度和严重干旱下,冰草的 GSH 含量显著高于无芒隐子草、白羊草和长芒草 ($P < 0.05$),无芒隐子草和白羊草则显著高于长芒草 ($P < 0.05$),而无芒隐子草和白羊草之间差异不显著。在 60% FC 和 45% FC 水平,4 种乡土草种叶片 GSH 含量的大小顺序均为:无芒隐子草 > 白羊草 > 冰草 > 长芒草。

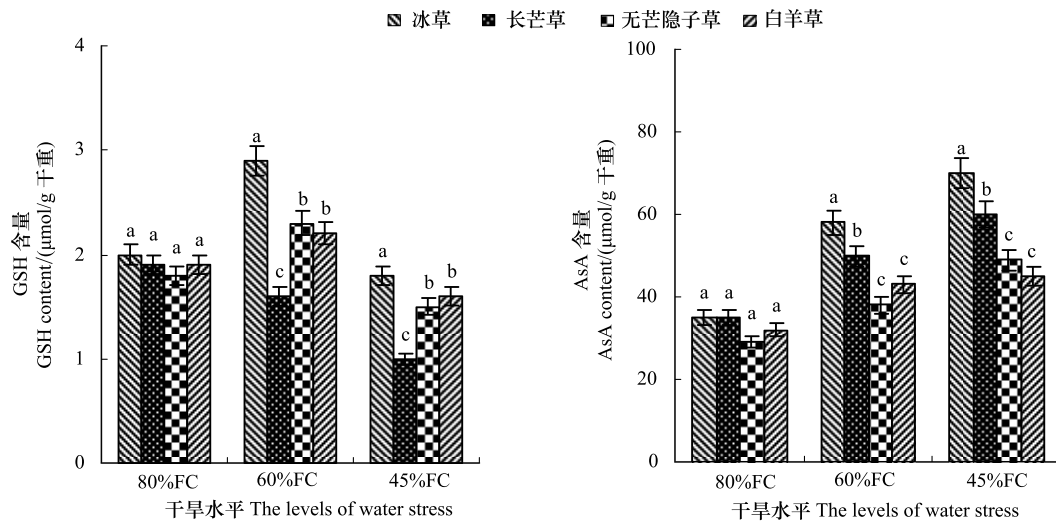


图 6 干旱胁迫对 4 种乡土草种 GSH 和 AsA 含量的影响

Fig. 6 Effects of drought stress on the contents of GSH and AsA in the leaves of four native grasses

在干旱胁迫条件下,冰草叶片的 AsA 含量显著高于其他草种,其次为长芒草,无芒隐子草和白羊草最低(图 6)。在 60% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 AsA 含量分别比对照增加了 65.7%、31.1%、34.3% 和 42.8%。在 45% FC 水平,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草叶片的 AsA 含量分别比对照增加了 100%、68.9%、40.6% 和 71.4%。方差分析表明,在正常水分条件下,4 种草种叶片的 AsA 含量差异不显著。在中度和严重干旱下,冰草的 AsA 含量显著高于其它 3 种草种 ($P < 0.05$),长芒草则显著高于无芒隐子草和白羊草 ($P < 0.05$),而无芒隐子草和白羊草之间差异不显著(图 6)。

由图 7 可知,在 60% FC 水平,冰草、无芒隐子草和白羊草叶片的 Car 含量分别比对照增加了 54.9%、123.6% 和 41.3%;在 45% FC 水平,冰草、无芒隐子草和白羊草叶片的 Car 含量分别比对照增加了 58.6%、92.3% 和 18.6%。但干旱胁迫下长芒草叶片 Car 含量则降于对照,在 60% FC 和 45% FC 水平,长芒草叶片的 Car 含量分别比对照降低了 25.7% 和 62.6%。在 60% FC 水平,无芒隐子草和白羊草具有较高的 Car 含量,其

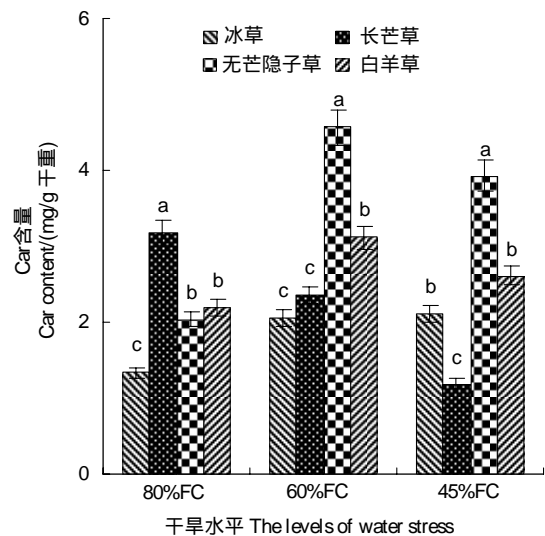


图 7 干旱胁迫对 4 种乡土草种 Car 含量的影响

Fig. 7 Effects of drought stress on the Car content in the leaves of four native grasses

次为长芒草,冰草最低。在 45% FC 水平,无芒隐子草也具有较高的 Car 含量,其次为白羊草和冰草,长芒草最低。方差分析表明,在正常水分条件下,长芒草叶片的 Car 含量显著高于其它 3 种草种($P < 0.05$),无芒隐子草和白羊草则显著高于冰草($P < 0.05$)。在中度干旱下,无芒隐子草的 Car 含量显著高于其它 3 种草种($P < 0.05$),白羊草的 Car 含量显著高于冰草和长芒草($P < 0.05$),而冰草和长芒草之间差异不显著。在严重干旱下,无芒隐子草的 Car 含量仍显著高于其它 3 种草种($P < 0.05$),冰草和白羊草的 Car 含量显著高于长芒草($P < 0.05$),而冰草和白羊草之间差异不显著。

2.6 4 种乡土草种抗氧化能力的比较

采用刘学义^[27]提出的隶属函数法对 4 个乡土草种抗氧化能力进行综合评价,结果见表 1。由表 1 可以看出,冰草的抗氧化能力最强,其次为无芒隐子草和白羊草,长芒草的抗氧化能力最差。

表 1 4 种乡土草种抗氧化能力的比较

Table 1 The comparison of the antioxidant ability of four native grasses under drought stress

测定指标 Tested items	草种名称 Species of native grasses			
	白羊草 <i>B. ischaemum</i>	冰草 <i>A. cristatum</i>	长芒草 <i>S. bungeana</i>	无芒隐子草 <i>C. genessongorica</i>
SOD 活性	0.346	0.571	0.297	0.393
CAT 活性	0.412	0.386	0.584	0.436
POD 活性	0.536	0.113	0.650	0.039
APX 活性	0.273	0.546	0.201	0.411
GR 活性	0.416	0.550	0.237	0.494
DHAR 活性	0.347	0.586	0.253	0.385
MDHAR 活性	0.502	0.467	0.424	0.611
GPX 活性	0.255	0.560	0.213	0.319
GSH 含量	0.473	0.649	0.263	0.456
AsA 含量	0.268	0.618	0.471	0.236
Car 含量	0.429	0.191	0.312	0.688
H ₂ O ₂ 含量	0.581	0.752	0.487	0.609
MDA 含量	0.557	0.800	0.447	0.633
平均隶属函数值	0.415	0.522	0.372	0.439
抗氧化能力顺序	3	1	4	2

3 讨论与结论

H₂O₂ 和 MDA 含量是衡量氧化胁迫程度的重要指标^[28]。在本研究中,冰草、无芒隐子草、白羊草和长芒草在干旱胁迫条件下其叶片 H₂O₂ 和 MDA 含量均增加,这说明干旱胁迫均导致 4 种乡土草种遭受了氧化胁迫。且随着干旱胁迫程度的加剧,4 种乡土草种遭受的氧化胁迫均加重。在 60% FC 和 45% FC 水平下,长芒草叶片的 H₂O₂ 和 MDA 含量均显著高于其他 3 种乡土草种,这说明长芒草在胁迫条件下比其它草种遭受了更为严重的氧化胁迫伤害。冰草叶片的 H₂O₂ 和 MDA 含量均显著低于其他 3 种乡土草种,这与其具有较强的抗氧化能力有关。

由于 4 种乡土草种均属于禾本科并生存于相同的黄土高原生态环境下,它们的抗氧化特性存在一定的共性。在 60% FC 和 45% FC 干旱胁迫下,4 个草种均可以通过增强抗氧化酶 SOD、CAT、APX、GR、DHAR、MDHAR、GPX 活性和非酶抗氧化物质 AsA 含量来抵御氧化胁迫的伤害。且在 4 种乡土草种中,以上这些指标均随干旱胁迫的加剧而呈增加趋势。但由于 4 种乡土草种之间的种属差异,它们在抗氧化特性上也有所不同。在 60% FC 和 45% FC 干旱胁迫下,冰草、无芒隐子草和白羊草还通过增加非酶抗氧化物质 Car 含量增强抗氧化能力,冰草的 Car 含量随干旱胁迫的加剧而呈增加趋势,无芒隐子草和白羊草的 Car 含量随干旱胁迫的加剧而呈降低趋势,但均显著高于正常水分;长芒草和白羊草则还可通过增加 POD 活性抵御干旱,且二者

的 POD 活性随干旱胁迫的加剧而呈降低趋势,但均显著高于正常水分。在 60% FC 干旱胁迫下,冰草还可通过增加非酶抗氧化物质 GSH 含量提高其抗氧化性。除此之外,干旱胁迫下 4 种乡土草种抗氧化酶 SOD、CAT、APX、GR、DHAR、MDHAR、GPX 活性和非酶抗氧化物质 AsA 含量之间也具有显著差异。在 60% FC 和 45% FC 干旱胁迫下,冰草具有较高的 AsA 含量和 SOD、APX、GR、DHAR 及 GPX 活性,长芒草则具有较高的 CAT 活性,无芒隐子草具有较高的 MDHAR 活性。

有研究表明,植物由于光合碳代谢途径的不同,其抗氧化特性也存在差异^[29]。本研究中,白羊草和无芒隐子草属于 C₄ 植物^[30],长芒草属于 C₃ 植物^[31],冰草属于 C₃-CAM 兼性植物^[32]。已有研究表明,在盐、温度、臭氧和干旱胁迫下,抗氧化酶 CAT 在 C₃ 植物清除活性氧 H₂O₂ 的过程中具有重要作用^[33-34]。本研究也表明,在 60% FC 和 45% FC 水平下,C₃ 草种长芒草叶片的 CAT 活性均显著高于其它草种。此外,我们的研究还表明,干旱下 C₃ 草种长芒草的 POD 活性也显著高于其它草种。大量研究表明,POD 能有效地清除活性氧 H₂O₂^[35]。因此,本研究表明,POD 在 C₃ 草种长芒草清除 H₂O₂ 的过程中也具有重要作用。有研究表明,水分胁迫下 C₄ 植物玉米比 C₃ 植物小麦具有较强的 APX、GR、DHAR 活性和较高的 AsA 和 GSH 含量^[29]。在我们的研究中,干旱下 C₄ 植物无芒隐子草比 C₃ 植物长芒草也具有较高的 APX、GR、DHAR 活性和 GSH 含量,但其 AsA 含量却显著低于后者。而 C₄ 植物白羊草在 60% FC 水平下仅比 C₃ 植物长芒草具有较高的 DHAR 活性和 GSH 含量,在 45% FC 水平下比长芒草具有较高的 GR、DHAR 活性和 GSH 含量。不管是在 60% FC 水平还是在 45% FC 水平,C₄ 植物白羊草叶片的 AsA 含量也显著低于 C₃ 植物长芒草。此外,本研究还表明,C₄ 植物白羊草和无芒隐子草比 C₃ 植物长芒草还具有较高的 Car 含量,C₄ 植物白羊草比 C₃ 植物长芒草还具有较高的 MDHAR 活性。

在本研究中,发现 4 种乡土草种均可以通过增强抗坏血酸-谷胱甘肽循环系统清除 H₂O₂。所测定的抗坏血酸-谷胱甘肽循环酶的活性均为总酶活,并未对某一细胞器的循环酶活性进行测定。因此,对 4 种乡土草种各个细胞器的抗坏血酸-谷胱甘肽循环酶活性进行比较性研究,对进一步揭示 4 种乡土草种抗氧化特性的异同具有重要的参考价值。

采用模糊隶属函数法对 4 种乡土草种抗氧化能力的综合评价结果表明,冰草的抗氧化能力最强,其次为无芒隐子草和白羊草,长芒草的抗氧化能力最差。在干旱胁迫下冰草、无芒隐子草和白羊草的生长状况明显好于长芒草。因此,冰草、无芒隐子草和白羊草均可以作为适宜的草种用于黄土高原半干旱区的植被恢复。

References:

- [1] Wang Y Q, Fan J, Shao M A, Wang Q J. Evapotranspiration of three types of plants in water-wind erosion crisscross regions in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (10): 5386-5394.
- [2] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 373-399.
- [3] Srivalli B, Sharma G, Khanna-Chopra R. Antioxidative defense system in an upland rice cultivar subjected to increasing intensity of water stress followed by recovery. *Physiologia Plantarum*, 2003, 119 (4): 503-512.
- [4] Papadakis A K, Roubelakis-Angelakis K A. Polyamines inhibit NADPH oxidase-mediated superoxide generation and putrescine prevents programmed cell death induced by polyamine oxidase-generated hydrogen peroxide. *Planta*, 2005, 220(6): 826-837.
- [5] Möller I M. Plant mitochondria and oxidative stress: electron transport, NADPH turnover, and metabolism of reactive oxygen species. *Annual Review of Plant Biology*, 2001, 52:561-591.
- [6] Selote D S, Khanna-Chopra R. Drought-induced spikelet sterility is associated with an inefficient antioxidant defence in rice panicles. *Physiologia Plantarum*, 2004, 121(3): 462-471.
- [7] Shao H B, Chu L Y, Shao M A, Jaleel C A, Mi H M. Higher plant antioxidants and redox signaling under environmental stresses. *Comptes Rendus Biologies*, 2008, 331 (6): 433-441.
- [8] Bai Z Y, Li C D, Sun H C, Wu T Y. The effect and chromosomal control on chlorophyll content and carotenoid content under drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(1):1-6.
- [9] Mullineaux P M, Rausch T. Glutathione, photosynthesis and redox regulation of stress-responsive gene expression. *Photosynthesis Research*, 2005,

- 86(3):459-474.
- [10] Tang L, Liang Z S, Du F, Hao W. Vegetation succession of arable old land after being abandoned in Loess Plateau hilly region & ascertaining dominant native herbage in the process, analyzing their chemical nutrient composition. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):1165-1175.
- [11] Tang L. Studies on Water Physiological Ecology Characteristics of 4 Native Herbs Communities in Loess Hill Region[D]. Xianyang: Northwest A and F University, 2005.
- [12] Xu B C, Shan L, Li F M. Comparison of ecophysiological characteristics of five plant species in semiarid loess hilly-gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5):990-996.
- [13] Wei L Y, Shangguan Z P. Specific root length characteristics of three plant species, *Bothriochloa ischaemum*, *Hippophae rhamnoides* and *Quercus liaotungensis* in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12):4164-4170.
- [14] Shao H B, Liang Z S, Shao M A. Dynamic changes of antioxidative enzymes of 10 wheat genotypes at soil water deficits. *Biointerfaces*, 2005, 42(3/4):187-195.
- [15] Jiang M, Zhang J. Cross-talk between calcium and reactive oxygen species originated from NADPH oxidase in abscisic acid-induced antioxidant defence in leaves of maize seedlings. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26(6):929-939.
- [16] Hodges D M, DeLong J M, Forney C F, Prange R K. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. *Planta*, 1999, 207(4):604-611.
- [17] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 1977, 59(2):309-314.
- [18] Kato M, Shimizu S. Chlorophyll metabolism in higher plants. VII. Chlorophyll degradation in senescing tobacco leaves; phenolic-dependent peroxidative degradation. *Canadian Journal of Botany*, 1987, 65(4):729-735.
- [19] Egle G H, Paul R N, Vaughn K C, Duke S O. Role of peroxidase in the development of water-impermeable seed coats in *Sida spinosa* L. *Planta*, 1983, 157(3):224-232.
- [20] Shan C J, Liang Z S. Jasmonic acid regulates ascorbate and glutathione metabolism in *Agropyron cristatum* leaves under water stress. *Plant Science*, 2010, 178(2):130-139.
- [21] Khatuna S, Ali M B, Hahn E, Paek K Y. Copper toxicity in *Withania somnifera*: growth and antioxidant enzymes responses of *in vitro* grown plants. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 64(3):279-285.
- [22] Hodges D M, Andrews C J, Johnson D A, Hamilton R I. Antioxidant enzyme responses to chilling stress in differentially sensitive inbred maize lines. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48(5):1105-1113.
- [23] Griffith O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine. *Analytical Biochemistry*, 1980, 106(1):207-212.
- [24] Evans L V. The effects of spectral composition and irradiance level on pigment levels in seaweeds. Lobban C S, Chapman D J, eds. *Experimental Phycology: A Laboratory Manual*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988:123-133.
- [25] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2):248-254.
- [26] Liu X Y. The method of evaluating drought resistance of soybean. *Oil Crops of China*, 1986, (4):23-26.
- [27] Ma Y H, Ma F W, Ma X W, Li M J, Wang Y H, Han M Y, Shu H R. Effects of drought stress on ascorbic acid contents and activities of related metabolic enzymes in apple leaves. *Journal of Northwest A and F University: Nature Science Edition*, 2008, 36(3):150-154.
- [28] Nayyar H, Gupta D. Differential sensitivity of C₃ and C₄ plants to water deficit stress; Association with oxidative stress and antioxidants. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1/3):106-113.
- [29] Li M C, Yi X F, Zhang X A, Li L X. The list of C₄ plants in alpine locality of Qinghai Plateau, *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(5):1046-1050.
- [30] Yu Y W, Nan Z B, Hou F J. The effects of sheep urine on growing characteristics of different life form plants in a Chinese steppe grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):2022-2030.
- [31] Zhang M Q, Chen R K. *Molecular and Physiological Drought Resistance and Genetic Improvement of Crops*. Beijing: Science Press, 2005:27-27.
- [32] Willekens H, Chamnongpol S, Davey M, Schraudner M, Langebartels C, van Montagu M, Inzé D, Van Camp W. Catalase is a sink for H₂O₂ and is indispensable for stress defense in C₃ plants. *The EMBO Journal*, 1997, 16(16):4806-4816.
- [33] Noctor G, Gomez L, Vanacker H, Foyer C H. Interactions between biosynthesis, compartmentation and transport in the control of glutathione homeostasis and signaling. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(372):1283-1304.

- [34] Jung S. Variation in antioxidant metabolism of young and mature leaves of *Arabidopsis thaliana* subjected to drought. *Plant Science*, 2004, 166 (2): 459-466.

参考文献:

- [1] 王幼奇, 樊军, 邵明安, 王全九. 黄土高原水蚀风蚀交错区三种植被蒸散特征. *生态学报*, 2009, 29(10): 5386-5394.
- [8] 白志英, 李存东, 孙红春, 吴同燕. 干旱胁迫对小麦叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响及染色体调控. *华北农学报*, 2009, 24(1): 1-6.
- [10] 唐龙, 梁宗锁, 杜峰, 郝文芳. 陕北黄土高原丘陵区撂荒演替及其过程中主要乡土牧草的确定与评价. *生态学报*, 2006, 26(4): 1165-1175.
- [11] 唐龙. 陕北黄土丘陵区四种乡土草种水分生理生态特征研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2005.
- [12] 徐炳成, 山仑, 李凤民. 半干旱黄土丘陵区五种植物的生理生态特征比较. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 990-996.
- [13] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性. *生态学报*, 2006, 26(12): 4164-4170.
- [26] 刘学义. 大豆抗旱性评定方法探讨. *中国油料作物学报*, 1986, (4): 23-26.
- [27] 马玉华, 马锋旺, 马小卫, 李明军, 王永红, 韩明玉, 束怀瑞. 干旱胁迫对苹果叶片抗坏血酸含量及其代谢相关酶活性的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(3): 150-154.
- [29] 李明财, 易现峰, 张晓爱, 李来兴. 青海高原高寒地区 C₄ 植物名录. *西北植物学报*, 2005, 25(5): 1046-1050.
- [30] 于应文, 南志标, 侯扶江. 羊尿对典型草原不同生活型草地植物生长特性的影响. *生态学报*, 2008, 28(5): 2022-2030.
- [31] 张木清, 陈如凯. 作物抗旱分子生理与遗传改良. 北京: 科学出版社, 2005: 27-27.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)
CONTENTS

- The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)
- Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique SUN Caizhi, YANG Lei (1016)
- Nitrogen flows in intensive "crop-livestock" production systems typically for the peri-urban area of Beijing HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)
- The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)
- Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)
- Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)
- Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)
- Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)
- Analysis of a dust case using lidar in Shanghai MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)
- Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)
- Phenotypic traits of both larvae and juvenile *Crasstrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)
- Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* LI Hui, WANG Jiangtao (1115)
- Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)
- On the ecological amplitude of nitrate of *Alexandrium tamarense* at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)
- Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)
- The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguo (1151)
- Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)
- Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)
- The effects of the addition of *Ceratobasidium stevensii* B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (*Citrullus lanatus*) site in China XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)
- Suitable habitat for the *Achnatherum splendens* community in typical steppe region of Inner Mongolia ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)
- Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)
- Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)
- Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)
- The evaluation system of strength of winteriness in wheat WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)
- A comparison of summer habitats selected by sympatric *Apodemus chevrieri* and *Apodemus draco* in Tiangjiahe Nature Reserve, China LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)
- Life tables for experimental populations of *Frankliniella occidentalis* on 6 vegetable host plants CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)
- Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)
- Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)
- Seasonal characteristics of CO₂ fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)
- Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)
- Review and Monograph**
- Recent advances in wetland degradation research HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)
- A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)
- Discussion**
- The diversity of the radio-resistant bacteria *Deinococcus radiodurans* TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)
- Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of *Caragana korshinskii* YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)
- Scientific Note**
- Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)
- Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild *Cryptotaenia japonica* YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 4 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@esp.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@esp.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元