

干旱胁迫下黑穗画眉草的生理响应

刘佳, 丁青霞, 高菊* (昆明理工大学生命科学与技术学院, 云南昆明 650500)

摘要 [目的]探讨云南昆明周边黑穗画眉草(*Eragrostis nigra*)的抗旱生理特性。[方法]以采自云南3个不同地方的黑穗画眉草为试验材料(编号为H₁、H₂、H₃),采用不同浓度的聚乙二醇(PEG 6000)模拟干旱胁迫,研究在不同胁迫情况下抗氧化酶、叶绿素含量、可溶性总糖含量及光合参数的变化。[结果]H₁、H₂、H₃的过氧化物酶(POD)活性、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、可溶性总糖含量和丙二醛含量均与胁迫强度和处理时间呈正相关,叶绿素含量与胁迫强度和处理时间呈负相关。3个材料的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO₂浓度(C_i)和H₁的气孔导度(G_s)均与处理时间和胁迫强度呈负相关。H₂和H₃干旱胁迫时G_s随处理时间的延长先增加后减小,轻度胁迫时有最大值。[结论]3种黑穗画眉草均有一定的抗干旱胁迫能力,H₁抗旱能力高于其他2种,更能适应干旱缺水的环境。

关键词 黑穗画眉草;干旱胁迫;抗氧化酶;叶绿素;光合作用

中图分类号 S501 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)22-006-05

Physiological Response of *Eragrostis nigra* Under Drought Stress

LIU-Jia, DING Qing-xia, GAO-Ju* (College of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500)

Abstract [Objective] To discuss the physiological characteristics of drought resistance around Yunnan Province. [Method] With *Eragrostis nigra* in three different areas (H₁, H₂, H₃) of Yunnan Province as the test materials, drought stress was simulated by different concentrations of PEG 6000. Changes of antioxidantase, chlorophyll content, total soluble sugar content and photosynthetic parameter were researched under the stress. [Result] POD, APX and CAT activities, total soluble sugar content and MDA content of H₁, H₂, H₃ had positive correlation with stress strength and treatment time. Chlorophyll content had negative correlation with stress strength and treatment time. The net photosynthesis (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s) and intercellular CO₂ concentration (C_i) of three *E. nigra* had negative correlation with treatment time and stress strength. Under drought stress of H₂ and H₃, G_s firstly enhanced and then reduced as the treatment time prolonged, and achieved the maximum value at light stress. [Conclusion] Three *E. nigra* have some drought stress capability, drought resistance of H₁ is higher than those of the other two, which can adapt to the arid environment easier.

Key words *Eragrostis nigra*; Drought stress; Antioxidant enzymes; Chlorophyll; Photosynthesis

黑穗画眉草是禾本科画眉草属的多年生草本植物,分布于中国四川、云南、贵州、甘肃等地,印度至印度支那也有分布^[1]。黑穗画眉草饲用价值高,茎叶柔嫩,适口性好,牛、羊特别喜食,放牧、青刈均可,饲用价值高,属良等牧草^[2]。全草或根可入药,有清热、止咳、镇痛的功效^[3]。

自2010年遭遇特大旱灾以来,西南地区处于持续干旱状态,云南大部、贵州西部、广西西北部已达特大干旱等级,有日益严重的趋势。干旱对于植物的正常生长、代谢有一定的影响,严重时可使植株死亡。在面临胁迫死亡之前,植物会通过调节自身生理反应,增加或减少植物体内抗性化合物的含量来应对体外干旱环境。画眉草具有较强的抗旱能力^[4],Mulu等^[5-6]通过不同的方法研究画眉草属植物在干旱胁迫条件下的抗旱能力,表明画眉草属在土壤临界水分状态有着更快的生长速度,生长力强,适应性好^[7-9],研究画眉草属的生理具有重要意义。笔者采用PEG 6000模拟干旱胁迫,研究了云南昆明周边黑穗画眉草的抗旱生理特性,以期云南野生牧草抗旱研究和生态保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料 材料分别采自云南省昆明市呈贡区吴家营乡(H₁)、云南省昆明市昆明植物园(H₂)、云南省曲靖市麒麟区三宝镇(H₃)。

1.2 试验设计 选健康、无病虫害、生长状况基本一致的黑

穗画眉草植株,清水清洗根部泥土3次,再用去离子水冲洗3次至泥土洗净,放入配制好的对照组(CK)、轻度胁迫(5.0%, W/V)、中度胁迫(7.5%, W/V)、重度胁迫(10.0%, W/V)的PEG-6000模拟干旱条件,在光暗周期14:10 h、光照强度2 000 lx条件下培养处理3 d,每个处理3次重复,于处理1、2、3 d取样测量各项生理参数。

1.3 测定项目与方法 丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[10];过氧化氢(H₂O₂)含量测定采用碘化钾分光光度法^[11];采用愈创木酚法测定POD酶活性^[12];采用过氧化氢法测定CAT酶活性^[13];采用抗坏血酸—过氧化氢(AsA-H₂O₂)法测定APX酶活性^[14];采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[15];使用叶绿素测定仪测定叶绿素含量;使用第三代气体交换测定系统LI-6400(LI-COR公司)测量叶蒸腾速率、气孔导度、胞间CO₂浓度、光合速率等参数。

1.4 数据处理 应用Microsoft Excel 2007和SPSS 20.0软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 PEG 6000模拟干旱胁迫处理对黑穗画眉草MDA含量的影响 由表1可知,随着处理时间增加,MDA浓度增加;处理PEG 6000浓度越高,MDA浓度也随之升高。H₁、H₂、H₃均在10.00% PEG 6000处理3 d取得最大值,分别为(22.86±0.42)、(19.85±0.78)、(19.93±0.59) μmol/gFW,分别是对照组的2.99倍、2.72倍和2.44倍,黑穗画眉草MDA含量对干旱胁迫有较大的响应。

作者简介 刘佳(1991-),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向:禾本科植物。*通讯作者,讲师,博士,从事植物生理研究。

收稿日期 2016-05-31

表 1 PEG 6000 模拟干旱胁迫对 3 种黑穗画眉草 MDA 含量的影响

Table 1 Effects of PEG 6000 simulated drought stress on MDA content of three <i>E. nigra</i>						μmol/gFW
材料 Material	处理时间 Processing time//d	PEG 6000 浓度 PEG 6000 concentration (W/V)				
		CK	5.00%	7.50%	10.00%	
H ₁	1	8.67 ± 0.76 d	9.72 ± 0.17 c	13.06 ± 0.61 b	17.39 ± 0.18 a	
	2	7.69 ± 0.25 d	11.83 ± 0.65 c	15.99 ± 0.70 b	20.27 ± 0.70 a	
	3	7.65 ± 0.21 d	14.02 ± 0.71 c	17.67 ± 0.60 b	22.86 ± 0.42 a	
H ₂	1	7.16 ± 0.69 d	8.85 ± 0.88 c	11.64 ± 0.30 b	16.02 ± 0.39 a	
	2	7.47 ± 0.09 d	9.81 ± 0.50 c	13.44 ± 0.95 b	17.80 ± 0.51 a	
	3	7.29 ± 0.73 d	12.75 ± 0.64 c	15.58 ± 0.34 b	19.85 ± 0.78 a	
H ₃	1	7.92 ± 0.73 d	8.70 ± 0.51 c	12.11 ± 0.60 b	16.21 ± 0.91 a	
	2	8.29 ± 0.56 d	9.85 ± 0.53 c	14.11 ± 0.50 b	18.71 ± 0.47 a	
	3	8.16 ± 0.55 d	12.73 ± 1.20 c	15.45 ± 1.18 b	19.93 ± 0.59 a	

注:同行不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。
Note:Different letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level(*P* < 0.05).

2.2 PEG 6000 模拟干旱胁迫对黑穗画眉草抗氧化酶活性的影响 由表 2 可知,随时间增加,3 种黑穗画眉草 POD 酶活性的上升趋势显著;随着 PEG 处理浓度增加,POD 酶活性也升高。3 种黑穗画眉草均在处理时间为 3 d、PEG 6000 处理浓度为 10.00% 时取得最大值,分别为 (62.21 ± 8.10)、(46.98 ± 9.64)、(48.32 ± 4.75) U/gFW;在相同处理时间,不同处理浓度 POD 酶活性均表现为 10.00% > 7.50% > 5.00% > CK;其中 H₁ 用 10.00% PEG 6000 处理 3 d 无论与 CK 处理 3 d 或是 10.00% 处理 1 d 比较,POD 酶活性变化都是最大的。

随时间增加,3 种黑穗画眉草 CAT 酶活性的上升趋势显著,相同处理浓度下,H₁、H₂、H₃ 的 CAT 酶活性随着处理时间增加其逐渐升高,即 3 d > 2 d > 1 d;在相同处理时间,不同处理浓度 CAT 酶活性均表现为 10.00% > 7.50% > 5.00% > CK;整体看 CAT 酶活性为 H₁ > H₂ > H₃。
3 种黑穗画眉草 APX 酶活性表现为随时间增加其上升。H₂、H₃ 的 APX 酶活性上升趋势显著;H₁ 的 APX 酶活性随胁迫时间的增加上升趋势不明显,但随胁迫强度增加其上升趋势显著;整体看 APX 酶活性表现为 H₁ 酶活性略大于 H₂,大于 H₃。

表 2 PEG 6000 模拟干旱胁迫对 3 种黑穗画眉草抗氧化酶活性的影响

Table 2 Effects of PEG 6000 simulated drought stress on antioxidant activity of three <i>E. nigra</i>							U/gFW
酶 En- zymes	材料 Material	处理时间 Processing time//d	PEG 6000 浓度 PEG 6000 concentration (W/V)				
			CK	5.00%	7.50%	10.00%	
POD 酶	H ₁	1	1.03 ± 0.32 d	1.57 ± 0.65 c	2.54 ± 0.04 b	4.24 ± 0.25 a	
		2	1.90 ± 0.69 d	7.51 ± 3.21 c	13.85 ± 3.76 b	37.45 ± 15.30 a	
		3	1.51 ± 0.45 d	15.82 ± 2.82 c	28.87 ± 3.70 b	62.21 ± 8.10 a	
	H ₂	1	1.53 ± 0.33 d	4.37 ± 0.56 c	7.69 ± 0.61 b	16.21 ± 2.25 a	
		2	1.41 ± 0.13 d	6.88 ± 0.60 c	10.88 ± 1.03 b	20.99 ± 2.60 a	
		3	1.20 ± 0.53 d	12.32 ± 2.08 c	19.32 ± 2.08 b	46.98 ± 9.64 a	
	H ₃	1	2.96 ± 1.00 d	7.53 ± 0.47 c	11.83 ± 1.05 b	18.25 ± 2.09 a	
		2	2.99 ± 0.53 d	10.98 ± 0.95 c	15.86 ± 2.11 b	30.09 ± 3.70 a	
		3	2.64 ± 0.59 d	12.74 ± 1.32 c	21.49 ± 1.48 b	48.32 ± 4.75 a	
CAT 酶	H ₁	1	96.34 ± 6.79 d	120.41 ± 2.51 c	177.56 ± 6.51 b	252.43 ± 6.69 a	
		2	103.55 ± 9.24 d	134.77 ± 2.54 c	265.90 ± 2.50 b	289.37 ± 2.56 a	
		3	102.11 ± 2.61 d	201.69 ± 2.33 c	302.86 ± 2.47 b	359.28 ± 4.49 a	
	H ₂	1	50.20 ± 2.56 d	82.53 ± 8.69 c	204.55 ± 4.35 b	293.42 ± 2.48 a	
		2	52.53 ± 4.38 d	93.01 ± 4.43 c	213.00 ± 9.37 b	297.97 ± 2.52 a	
		3	50.02 ± 2.60 d	187.50 ± 0 c	317.42 ± 2.56 b	345.06 ± 2.47 a	
	H ₃	1	38.41 ± 2.46 d	69.47 ± 6.50 c	160.31 ± 8.94 b	256.46 ± 6.83 a	
		2	34.25 ± 4.44 d	113.76 ± 4.21 c	223.88 ± 4.85 b	313.09 ± 2.46 a	
		3	32.93 ± 4.38 d	172.08 ± 8.60 c	330.53 ± 5.13 b	365.50 ± 2.53 a	
APX 酶	H ₁	1	74.63 ± 12.77 d	181.19 ± 9.02 c	214.50 ± 6.46 b	224.20 ± 5.51 a	
		2	77.23 ± 9.85 d	105.59 ± 5.57 c	201.28 ± 8.07 b	247.72 ± 9.91 a	
		3	80.93 ± 8.62 d	131.65 ± 9.07 c	257.16 ± 11.04 b	286.56 ± 3.78 a	
	H ₂	1	27.68 ± 5.89 d	54.25 ± 4.46 c	84.32 ± 5.50 b	106.41 ± 3.64 a	
		2	32.94 ± 9.53 d	101.65 ± 8.51 c	156.83 ± 6.23 b	196.73 ± 5.97 a	
		3	31.92 ± 2.76 d	132.31 ± 7.50 c	211.02 ± 2.60 b	260.02 ± 9.06 a	
	H ₃	1	18.16 ± 3.01 d	35.90 ± 5.23 c	67.15 ± 4.70 b	101.96 ± 6.34 a	
		2	22.57 ± 4.20 d	65.13 ± 4.03 c	92.22 ± 5.92 b	127.88 ± 5.29 a	
		3	18.21 ± 4.24 d	83.94 ± 6.24 c	117.94 ± 4.32 b	165.83 ± 5.27 a	

注:同行不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。
Note:Different letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level(*P* < 0.05).

2.3 PEG 6000 模拟干旱胁迫对黑穗画眉草渗透物质可溶性总糖含量的影响 干旱胁迫对可溶性糖含量有显著影响(表3)。相同处理浓度下,3 种黑穗画眉草 H₁、H₂、H₃ 可溶性糖含量表现为随处理时间增加而上升;相同处理时间下,3

种黑穗画眉草 H₁、H₂、H₃ 可溶性糖含量表现为随处理浓度升高而上升;可溶性总糖含量大小为 H₁ > H₂ > H₃, 10. 00% PEG 6000 胁迫 3 d 时分别为(0. 671 ± 0. 017)、(0. 586 ± 0. 015)、(0. 467 ± 0. 046) μg/gFW。

表3 PEG 6000 模拟干旱胁迫对3种黑穗画眉草可溶性总糖含量的影响
Table 3 Effects of PEG 6000 simulated drought stress on total soluble sugar content of three *E. nigra*

材料 Material	处理时间 Processing time//d	PEG 6000 浓度 PEG 6000 concentration (W/V)			
		CK	5. 00%	7. 50%	10. 00%
H ₁	1	0. 134 ± 0. 006 d	0. 216 ± 0. 006 c	0. 424 ± 0. 012 b	0. 460 ± 0. 017 a
	2	0. 126 ± 0. 017 d	0. 234 ± 0. 012 c	0. 447 ± 0. 010 b	0. 561 ± 0. 015 a
	3	0. 156 ± 0. 012 d	0. 288 ± 0. 006 c	0. 478 ± 0. 012 b	0. 671 ± 0. 017 a
H ₂	1	0. 085 ± 0. 006 d	0. 191 ± 0. 012 c	0. 366 ± 0. 006 b	0. 415 ± 0. 006 a
	2	0. 078 ± 0. 006 d	0. 216 ± 0. 006 c	0. 403 ± 0. 000 b	0. 468 ± 0. 023 a
	3	0. 090 ± 0. 012 d	0. 242 ± 0. 006 c	0. 437 ± 0. 006 b	0. 586 ± 0. 015 a
H ₃	1	0. 084 ± 0. 006 d	0. 159 ± 0. 012 c	0. 255 ± 0. 006 b	0. 402 ± 0. 052 a
	2	0. 080 ± 0. 010 d	0. 175 ± 0. 021 c	0. 295 ± 0. 010 b	0. 424 ± 0. 012 a
	3	0. 084 ± 0. 012 d	0. 192 ± 0. 006 c	0. 343 ± 0. 006 b	0. 467 ± 0. 046 a

注:同行不同字母表示不同处理间在 0. 05 水平差异显著。
Note:Different letters in the same row indicated significant difference at 0. 05 level(P < 0. 05).

2.4 PEG 6000 模拟干旱胁迫对黑穗画眉草叶绿素含量的影响 由表4可知,随着干旱胁迫时间和强度的增加,3 种黑穗画眉草叶片叶绿素的相对含量减少。对照组(CK)处理 1 d 时叶绿素含量最高的是 H₁,为(36. 56 ± 1. 03) mg/g,其次是 H₂,为(35. 03 ± 4. 86) mg/g,最低的是 H₃,为(28. 33 ±

1. 52) mg/g。3 种黑穗画眉草的叶绿素相对含量初期下降较快,后期下降趋势渐缓。相同胁迫强度、胁迫时间条件下,黑穗画眉草 H₁ 的叶绿素相对含量均高于 H₂ 和 H₃;相同胁迫强度、胁迫时间条件下,H₂ 叶绿素相对含量高于 H₃,说明抗旱性以 H₁ 最强,H₂ 次之,H₃ 最弱。

表4 PEG 6000 模拟干旱胁迫对3种黑穗画眉草叶绿素相对含量的影响
Table 4 Effects of PEG 6000 simulated drought stress on chlorophyll relative content of three *E. nigra*

材料 Material	处理时间 Processing time//d	PEG 6000 浓度 PEG 6000 concentration (W/V)			
		CK	5. 00%	7. 50%	10. 00%
H ₁	1	36. 56 ± 1. 03 a	28. 26 ± 0. 61 b	12. 47 ± 0. 67 c	4. 60 ± 1. 11 d
	2	36. 53 ± 0. 64 a	26. 50 ± 6. 49 b	11. 60 ± 3. 63 c	3. 33 ± 0. 91 d
	3	36. 03 ± 1. 71 a	16. 67 ± 1. 66 b	7. 80 ± 0. 70 c	2. 67 ± 0. 06 d
H ₂	1	35. 03 ± 4. 86 a	24. 90 ± 2. 43 b	11. 60 ± 0. 81 c	4. 20 ± 0. 30 d
	2	33. 00 ± 0. 44 a	17. 27 ± 1. 70 b	9. 30 ± 0. 56 c	2. 37 ± 0. 45 d
	3	33. 53 ± 3. 76 a	10. 00 ± 0. 26 b	6. 90 ± 0. 44 c	2. 77 ± 0. 61 d
H ₃	1	28. 33 ± 1. 52 a	23. 03 ± 0. 61 b	11. 03 ± 0. 57 c	3. 60 ± 0. 26 d
	2	29. 50 ± 6. 06 a	17. 60 ± 1. 08 b	8. 37 ± 0. 85 c	2. 10 ± 0. 20 d
	3	28. 36 ± 4. 47 a	8. 23 ± 0. 55 b	6. 27 ± 1. 07 c	1. 70 ± 0. 44 d

注:同行不同字母表示不同处理间在 0. 05 水平差异显著。
Note:Different letters in the same row indicated significant difference at 0. 05 level(P < 0. 05).

2.5 PEG 6000 模拟干旱胁迫黑穗画眉草光合作用相关参数测定 由表5可知,PEG 6000 模拟干旱胁迫下,H₁、H₂、H₃ 叶蒸腾速率表现为下降趋势。相同处理时间下,随胁迫强度增加气孔导度先增加后减小,H₂、H₃ 在 5. 00% PEG 6000 浓度处理下取得最大值,在浓度 7. 50% 和 10. 00% 处理下逐渐减小;相同胁迫强度下,气孔导度随处理时间延长而减小;相同处理时间,气孔导度随胁迫强度增加而减少,H₁ 在 0% PEG 6000 处理 1 d 时有最大值(6. 23 ± 0. 25) mmol/(m² · s)。相同处理时间下,净光合速率随处理浓度增大而减小;相同处理浓度下,净光合速率随处理时间延长而下降。3 种黑穗画眉草胞间 CO₂ 浓度随处理时间和 PEG 6000 处理浓度增加呈上升趋势;黑穗画眉草 H₃ 胞间 CO₂ 浓度随 PEG 6000 浓度增加变化最大。

3 讨论与结论

植物在逆境中会诱发膜脂过氧化作用,其中 MDA 是膜脂过氧化作用最重要的产物之一,因此,可通过测定 MDA 含量了解膜脂过氧化程度,间接测定膜系统受损程度及植物抗逆性^[16]。该研究中,干旱胁迫对 MDA 含量影响明显,MDA 含量与胁迫强度和处理时间呈正相关,与韩永华^[17] 对大豆的研究结果一致。可见,植物体内 MDA 含量可以作为衡量胁迫强度的指标。

植物对抗逆境会产生大量活性氧,引起膜脂过氧化,导致植物损伤。而抗氧化酶能够及时消除活性氧,避免损伤,但过度逆境胁迫会导致植物机体受损,进而减少抗氧化酶产生。该研究中,3 种黑穗画眉草抗氧化酶 POD、APX、CAT 酶的活性均与胁迫强度和处理时间呈正相关,在长时间重度胁

迫情况下,3 个抗氧化酶活性也是迅速上升,并未出现刘晓东等^[18]对玉带草的研究以及胡景江等^[19]对元宝枫的研究中“抗氧化酶先上升后下降”的现象,而是和季杨等^[20]对鸭茅的研究结果一致,表明在该研究中干旱胁迫强度未达到黑穗画眉草的抗旱极限,黑穗画眉草是一种具有良好抗旱性的草种。同时,采自昆明呈贡县的黑穗画眉草 H₁ 在相同的胁迫时间、胁迫强度条件下,各类抗氧化酶活性高于 H₂ 和 H₃,可以认为 H₁ 的抗旱性要高于 H₂、H₃。

表 5 PEG 6000 模拟干旱胁迫对 3 种黑穗画眉草光合参数的影响
Table 5 Effects of PEG 6000 simulated drought stress on photosynthetic parameters of three *E. nigra*

材料 Material	光合参数 Photosynthetic parameters	处理时间 Processing time//d	PEG 6000 浓度 PEG 6000 concentration (W/V)			
			CK	5.00%	7.50%	10.00%
H ₁	净光合速率 μmol/(m ² ·s)	1	23.70±0.29 a	16.77±0.03 b	12.57±0.06 c	10.85±0.03 d
		2	22.44±0.30 a	13.27±0.07b	10.29±0.07 c	8.39±0.14 d
		3	23.12±0.52 a	12.11±0.29 b	8.37±0.08 c	7.98±0.08 c
	蒸腾速率 mmol/(m ² ·s)	1	5.38±0.20 a	4.75±0.13 b	4.57±0.01 b	4.24±0.02 c
		2	5.52±0.04 a	4.61±0.07 b	4.31±0.03 c	4.09±0.11 d
		3	5.35±0.10 a	4.15±0.02 b	3.97±0.09 c	3.71±0.13 d
	气孔导度 mmol/(m ² ·s)	1	6.23±0.25 a	5.27±0.06 b	3.27±0.06 c	1.10±0.10 d
		2	5.17±0.15 a	3.53±0.15 b	3.03±0.06 c	2.60±0.10 d
		3	5.53±0.21 a	3.40±0.20 b	2.63±0.15 c	2.60±0.10 d
H ₂	净光合速率 μmol/(m ² ·s)	1	579.00±5.20 a	556.67±0.58 b	539.67±2.31 c	522.00±1.00 d
		2	569.00±8.72 a	534.33±4.04 b	524.33±3.06 c	511.00±5.29 d
		3	570.67±3.79 a	514.67±1.53 b	494.00±7.55 c	472.00±3.61 d
	蒸腾速率 mmol/(m ² ·s)	1	21.35±0.03 a	15.92±0.05 b	11.45±0.04 c	10.75±0.03 d
		2	20.66±0.17 a	13.14±0.09 b	9.67±0.12 c	8.19±0.03 d
		3	21.18±0.70 a	11.45±0.26 b	9.26±0.08 c	8.28±0.05 d
	气孔导度 mmol/(m ² ·s)	1	5.50±0.12 a	4.66±0.10 b	4.36±0.03 c	4.18±0.02 d
		2	5.57±0.10 a	4.50±0.02 b	4.22±0.08 c	3.89±0.05 d
		3	5.44±0.03 a	4.01±0.16 b	3.83±0.17 c	3.42±0.10 d
H ₃	净光合速率 μmol/(m ² ·s)	1	2.93±0.06 c	4.03±0.06 a	3.53±0.06 b	2.97±0.06 c
		2	2.77±0.06 c	4.77±0.06 a	3.23±0.15 b	1.77±0.06 d
		3	2.80±0.10 c	4.53±0.25 a	3.10±0.10 b	1.63±0.15 d
	蒸腾速率 mmol/(m ² ·s)	1	571.33±7.64 a	538.33±4.62 b	524.67±5.03 c	508.33±6.51 d
		2	569.67±17.01 a	527.33±3.51 b	505.00±5.29 c	490.67±5.69 d
		3	565.33±7.51 a	504.33±1.53 b	483.33±3.79 c	447.00±9.54 d
	气孔导度 mmol/(m ² ·s)	1	19.36±0.03 a	15.86±0.01 b	10.28±0.02 c	10.19±0.08 c
		2	21.08±0.55 a	13.58±0.19 b	8.95±0.29 c	8.32±0.19 d
		3	20.87±0.48 a	12.56±0.09 b	8.73±0.14 c	8.22±0.10 d
H ₃	蒸腾速率 mmol/(m ² ·s)	1	5.35±0.12 a	4.62±0.11 b	4.22±0.03 c	3.92±0.04 d
		2	5.34±0.20 a	4.33±0.02 b	3.97±0.12 c	3.40±0.11 d
		3	5.30±0.05 a	4.08±0.04 b	3.86±0.01 c	3.28±0.06 d
	气孔导度 mmol/(m ² ·s)	1	2.03±0.06 c	5.73±0.06 a	4.17±0.06 b	1.93±0.06 c
		2	1.90±0.17 c	5.13±0.12 a	3.90±0.10 b	1.70±0.20 c
		3	1.77±0.06 c	4.43±0.21 a	3.43±0.06 b	1.50±0.10 c
	胞间 CO ₂ 浓度 mmol/(m ² ·s)	1	570.00±1.73 a	539.00±8.19 b	509.33±6.66 c	494.33±5.69 d
		2	568.33±5.51 a	525.00±6.00 b	495.00±2.65 c	473.67±2.08 d
		3	566.67±7.51 a	487.33±9.71 b	462.00±7.94 c	446.00±3.61 d

注:同行不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。
Note:Different letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level(P<0.05)。

可溶性糖是植物体内的渗透调节物质,植物能通过调节可溶性糖糖含量改变体内渗透势,从而改变植物抗旱能力,一般来说,植物体内可溶性糖含量越高,渗透势越高,抗旱能力就越强^[21]。该研究表明,干旱胁迫对可溶性糖含量有显著影响:3 种黑穗画眉草的 H₁、H₂、H₃ 可溶性糖含量随胁迫强度以及胁迫时间的增加而增加;相同胁迫条件下,可溶性总糖含量大小为 H₁ > H₂ > H₃。

干旱胁迫下气孔阻力增加,随着胁迫强度增大甚至导致气孔关闭,一方面阻碍蒸腾作用,进一步使叶片缺水,致使叶

绿素遭到破坏,叶绿素含量减少;另一方面气孔关闭阻碍空气中 CO₂ 进入叶片,导致净光合作用下降。该研究表明,叶绿素含量均与胁迫强度和处理时间呈负相关,H₁ 的叶绿素含量在相同处理时间和胁迫强度条件下都高于 H₂、H₃。3 种黑穗画眉草的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(C_i) 总体呈下降趋势。不同的是,黑穗画眉草 H₂ 的 P_n、T_r、G_s 和 C_i 均与处理时间和胁迫强度呈负相关;黑穗画眉草 H₂ 和 H₃ 的 P_n、T_r、C_i 与处理时间和胁

胁迫强度呈负相关,但 G_s 随处理时间的延长先增加后减小,轻度胁迫时有最大值,而在中度和重度胁迫时, G_s 均随处理时间和胁迫强度的增加而降低。这是由于干旱胁迫下气孔部分关闭,影响 T_r 以及 C_i ,使 P_n 下降。不同的是, H_2 和 H_3 的 G_s 参数变化与 H_1 不一致,表明干旱胁迫对黑穗画眉草光合作用的影响有一部分非气孔因素^[22]。

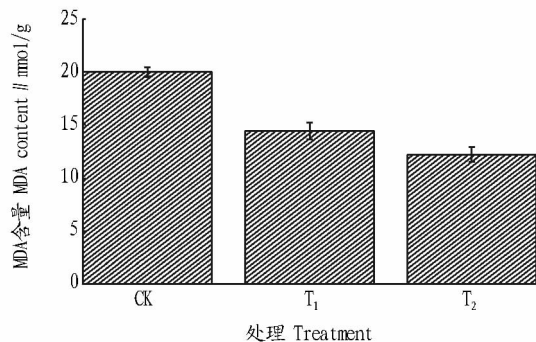
综上所述,3 种黑穗画眉草均有一定的抗干旱胁迫能力,MDA 含量、抗过氧化酶活性、可溶性糖含量、叶绿素含量以及 4 个光合作用参数的数据说明采自昆明呈贡县的黑穗画眉草 H_1 的抗旱能力高于其他 2 种,更能适应干旱缺水的环境。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第 10 卷第 1 分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 21.
- [2] 杨泽新, 唐成斌, 刘世凡, 等. 贵州天然禾本科牧草种质资源研究 [J]. 草业科学, 1996, 13(1): 11–15.
- [3] 中国药材公司. 中国中药资源志要 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [4] 尹俊, 孙振中, 蒋龙, 等. 画眉草研究进展 [J]. 草业科学, 2009, 26(12): 60–62.
- [5] MULU A, BLUM A, NGUYEN H T. Diversity for osmotic adjustment and root depth in TEF [*Eragrostis tef* (Zucc) Trotter] [J]. Euphytica, 2001, 121(3): 237–249.
- [6] ROSS M A. Concurrent changes in plant weight and soil water regimes in herbaceous communities in Central Australia [J]. Australian journal of ecology, 1977, 2(3): 257–268.
- [7] 于云江, 史培军, 贺丽萍, 等. 风沙流对植物生长影响的研究 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 262–267.

- [8] 于云江, 史培军, 鲁春霞, 等. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 53–58.
- [9] 胥晓刚, 王锦平, 杨冬升, 等. 弯叶画眉草在风化石边种植的适应性研究 [J]. 公路, 2003(11): 106–108.
- [10] HEATH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. Archives of biochemistry and biophysics, 1968, 125(1): 189–198.
- [11] CHAKRABARTY D, DATTA S K. Micropropagation of gerbera: Lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities during acclimatization process [J]. Physiol Plant, 2008, 30(3): 325–331.
- [12] CHANCE B, MAEHLY A C. The assay of catalases and peroxidases [J]. Methods of biochemical analysis, 1955, 1: 357–424.
- [13] AEBI H. Catalase *in vitro* [J]. Methods in enzymology, 1984, 105(2): 121–126.
- [14] 孙群, 胡景江. 植物生理学研究技术 [M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006.
- [15] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [16] 杨帆, 苗灵凤, 胥晓, 等. 植物对干旱胁迫的响应研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(4): 586–591.
- [17] 韩永华. 水分胁迫对大豆幼苗叶片细胞质膜的影响 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 1999, 17(4): 85–87.
- [18] 刘晓东, 李洋洋, 何森, 等. PEG 模拟干旱胁迫对玉带草生理特性的影响 [J]. 草业科学, 2012, 29(5): 687–693.
- [19] 胡景江, 顾振瑜, 文建雷, 等. 水分胁迫对元宝枫膜脂过氧化作用的影响 [J]. 西北林学院学报, 1999, 14(2): 7–11.
- [20] 季杨, 张新全, 彭燕, 等. 干旱胁迫对鸭茅根叶保护酶活性、渗透物质含量及膜脂过氧化作用的影响 [J]. 草业学报, 2014, 23(3): 144–151.
- [21] 张玉霞, 杜晓艳, 张玉芹, 等. 胁迫对苔草渗透调节特性的影响 [J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2008, 23(3): 289–292.
- [22] ESCALONA J. Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis under water stress in field-grown grapevines [J]. Journal of plant physiology, 1999, 26(1): 421–433.

(上接第 5 页)



注: CK 为清水对照; T_1 为普通蒸腾抑制剂处理; T_2 为海藻蒸腾抑制剂处理。

Note: CK. Clear water control; T_1 . Conventional anti-transpirants treatment; T_2 . Seaweed anti-transpirants treatment.

图 3 不同处理对龙爪槐叶片 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on MDA content of *Sophora japonica* leaves

果最好。另外, 叶面喷施海藻蒸腾抑制剂还具有延缓植物衰老的效果。

综上所述, 叶面喷施富含海藻活性物质的海藻蒸腾抑制剂 150 倍稀释液, 能够有效抑制夏季高温条件下龙爪槐叶片的水分散失, 维持较好的叶片水分状况, 减轻水分胁迫的伤害, 延缓叶片衰老, 使叶片水平的蒸腾效率增加, 对促进光合作用也具有一定效果。

参考文献

- [1] 师长海, 孔少华, 翟红梅, 等. 喷施抗蒸腾剂对冬小麦旗叶蒸腾效率的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1091–1095.
- [2] 姚全胜, 雷新涛, 苏俊波, 等. 喷施蒸腾抑制剂对毛叶枣叶片光合参数的影响 [J]. 热带作物学报, 2009, 30(2): 131–134.
- [3] 郭艳玲, 乔振杰, 郭昌春, 等. 海藻肥对蔬菜种子萌发的影响 [J]. 安徽农学通报, 2008, 14(14): 68–69.
- [4] 王强, 石伟勇. 海藻肥对番茄生长的影响及其机理研究 [J]. 浙江农业科学, 2003(2): 67–70.
- [5] 周英, 陈振德, 王海华, 等. 海藻叶面肥对菠菜和不结球白菜产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2011(1): 69–72.
- [6] 李冰. 浒苔硫酸多糖对 NaCl 胁迫下植物的影响 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013: 14–16.
- [7] 杨廷杰, 王晓伟, 赵康, 等. 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6074–6080.