

干旱胁迫下华南地区3种苗木渗透调节物质的动态变化

潘 昕, 邱 权, 李吉跃, 苏 艳, 何 茜

(华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642)

摘要:采用盆栽法,在干旱胁迫条件下,对华南地区常见树种棘叶吴茱萸 *Evodia meliaefolia*、石斑木 *Rhaphiolepis indica* 和任豆 *Zenia insignis* 叶片中的渗透调节物质(脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质)进行了研究.以探明供试树种通过渗透调节来适应干旱胁迫的途径与机理,为华南石漠化干旱区的树种选择提供科学依据.结果表明:在干旱胁迫下,3个树种的脯氨酸和可溶性糖质量比均表现出逐渐增加的趋势,在重度干旱时达到最大值,其中石斑木的质量比最高(脯氨酸为490.86 $\mu\text{g/g}$,可溶性糖为38.13 mg/g),棘叶吴茱萸最低(脯氨酸为278.33 $\mu\text{g/g}$,可溶性糖为27.74 mg/g).而可溶性蛋白质质量比则表现出先增大后减小的规律,其中棘叶吴茱萸和任豆在轻度干旱时先达到最大值,分别为5.97和6.84 mg/g ,而石斑木在中度干旱时才达到最大值(7.44 mg/g),重度干旱时,只有石斑木的可溶性蛋白质质量比高出正常水分条件53.64%,表现出很强的渗透调节能力.综上可知:在3个供试树种中,石斑木具有很强的渗透调节能力,对干旱胁迫有较强的适应性,任豆次之,棘叶吴茱萸渗透调节能力最弱,抗旱适应性较差.

关键词:干旱胁迫;渗透调节物质;棘叶吴茱萸;石斑木;任豆

中图分类号:S718.43

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2012)04-0519-05

Changes in Osmosis-Regulating Substances of Three Tree Species Seedlings Under Drought Stress

PAN Xin, QIU Quan, LI Ji-yue, SU Yan, HE Qian

(College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: This study deals with the changes of osmosis-regulating substances (proline, soluble sugar and soluble protein) of three common tree species in south China area, i. e., *Evodia meliaefolia*, *Rhaphiolepis indica*, and *Zenia insignis*, under drought stress by means of pot experiment, with an aim to prove the approach and mechanism of how the trial species adapt to the drought stress so as to provide evidence for species selection in south China limestone area. Major findings were as follows: in condition of drought stress, contents of proline and soluble sugar of all three species showed an increasing trend, which peaked under heavy drought stress. Among them, *R. indica* was the highest (proline 490.86 $\mu\text{g/g}$, soluble sugar 38.13 mg/g), while *E. meliaefolia* was the lowest (proline 278.33 $\mu\text{g/g}$, soluble sugar 27.74 mg/g), *Z. insignis* was moderate. The content of soluble protein approximated a parabola: first an increase, later a decrease. *E. meliaefolia* (5.97 mg/g) and *Z. insignis* (6.84 mg/g) peaked under light drought stress, while *R. indica* (7.44 mg/g) peaked in moderate drought stress. In condition of heavy drought stress, only *R. indica*'s content of soluble protein (53.64%) was higher than that of normal condition, which approximated a great osmotic adjustment ability. In conclusion, *R. indica* shows a great osmotic adjustment ability, which can well adapt to drought stress condition; *Z. insignis* takes the second place, and *E. meliaefolia* is the worst.

Key words: drought stress; osmosis-regulating substances; *Evodia meliaefolia*; *Rhaphiolepis indica*; *Zenia insignis*

渗透调节是指在低水势条件下细胞可在一定程度上通过降低渗透势来平衡水势的降低,以维持膨压,从而保证细胞执行正常生理功能的一种内在调节机制.在干旱胁迫下植物体内会积累渗透调节物质,通过透调节作用平衡细胞渗透势,从而维持植物细胞正常水分和膨压等生理过程,如大量累积脯氨酸、增加可溶性糖、增加可溶性蛋白质以增强植株的保水能力,抵御干旱的影响^[1-4].所以渗透调节物质的动态变化是衡量植物抗旱性差异的重要指标,通过研究干旱胁迫对渗透调节物质的影响,便可以得出不同植物品种的抗旱性能差异,对此,国内外许多专家学者对其做了大量的科学研究^[5-9].表明干旱胁迫下植物受到的伤害程度与渗透调节变化密切相关.

石灰岩裸露地区具有土体浅薄,蓄水能力差的特征,华南石灰岩地区面积约占全国裸石区面积的60.6%^[10],作为全国的主要裸石地区,对其进行造林和植被恢复显得尤为重要.针对华南石灰岩地区的特殊地理构造,必须选择抗旱性能较好的物种才能适应石灰岩地区经常出现的持续性干旱逆境.

就目前国内外的研究来看,对于石灰岩地区植物的抗旱性能研究不是很多,而对于石灰岩地区干旱胁迫对渗透调节物质的动态变化这一相关课题就更少.本次研究基于华南石灰岩地区常见植物任豆,以及2种石灰岩地区造林供选树种棘叶吴茱萸、石斑木通过对比分析三者在不同的水分条件下的动态变化规律,并最终做出3种植物抗旱性能差异的评价.通过本次研究,初步筛选出抗旱性能较好的树种,为华石灰岩地区的造林和植被恢复提供重要的理论支持和参考依据,特别是对华南缺水的石灰岩地区具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为盆栽植物棘叶吴茱萸 *Evodia glabrifolia*、石斑木 *Rhaphiolepis indica*、任豆 *Zenia insignis* 各30株,苗木具体生长情况见表1,种植在华南农业大学林学院温室内.所用花盆上口径20 cm,下口径15 cm,高23 cm,3个树种所用土壤相同,为华南农业大学树木园内林地赤红壤.棘叶吴茱萸和石斑木为2年生苗,任豆为接干苗.所测土壤田间持水量为 (268.66 ± 20.73) g/kg,容重为 (1.34 ± 0.07) g/cm³.

表1 3种苗木的基本情况

Tab.1 Three kinds of basic conditions of seedlings

树种	苗高/m	地径/mm
棘叶吴茱萸	0.75 ± 0.06	6.30 ± 0.98
石斑木	0.60 ± 0.07	6.65 ± 1.31
任豆	0.65 ± 0.05	12.16 ± 2.17

1.2 研究方法

对苗木进行日常浇水管理,选择长势良好、形态特征相近的3种苗木各30株.为了减少株间差异,对每株植株中生长位置和叶片朝向相同、大小相似的5~8片叶片进行挂牌标记,于2011年7月1日所有苗木浇透水后,对花盆进行套袋处理,防止土壤水分蒸发,并于当日第1次采样,作为供试苗木正常水分条件的对照,之后在干旱第3、6、9、12、15、19、24天采样,每次分别取3株同树种的挂牌叶片进行试验,设3个重复.随着干旱的进行,每次都需测定土壤含水量(表2)并选用未取过叶片的植株进行取样,用以测定供试苗木的脯氨酸、可溶性糖及可溶性蛋白质含量.

表2 苗木干旱胁迫各时期的土壤含水量及水分状况

Tab.2 Seedlings at different stages of drought stress of the relationship between soil moisture and field capacity %

项目	苗木种类	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	15 d	19 d	24 d
土壤含水量(<i>w</i>)	棘叶吴茱萸	32.58	25.62	17.47	13.47	11.97	9.63	6.40	4.48
	石斑木	30.88	23.76	18.00	14.25	11.96	9.52	6.36	4.49
	任豆	29.15	22.24	13.63	11.30	11.16	8.39	6.09	4.16
占田间持水量的比例	棘叶吴茱萸	121.25	95.35	65.03	50.15	44.55	35.85	23.82	16.68
	石斑木	114.94	88.44	67.00	53.05	44.50	35.44	23.67	16.72
	任豆	108.50	82.78	50.72	42.06	41.56	31.22	22.67	15.50
水分状况		正常	正常	轻度干旱	轻度干旱	中度干旱	中度干旱	重度干旱	重度干旱

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤质量含水量 用土壤含水量快速测定

仪 Easttest(美国)测定体积含水量.土壤含水量($w/\%$) = 体积含水量($\%$)/土壤容重(g/cm^3)(通常

认为1 g 水的体积就是1 cm³).

1.3.2 脯氨酸含量的测定 脯氨酸含量的测定用:酸性茚三酮法^[11].

1.3.3 可溶性糖含量的测定 可溶性糖含量的测定用蒽酮法测定^[12].

1.3.4 可溶性蛋白含量测定 利用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量^[13].

1.4 数据处理

试验中的数据使用 SPSS 软件进行处理.

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对苗木脯氨酸含量的影响

从表3可以看出正常水分条件下,3种植物叶片脯氨酸含量相差不显著,其质量比分别为椴叶吴茱萸 50.80 μg · g⁻¹,石斑木 28.68 μg · g⁻¹,任豆 36.72 μg · g⁻¹.当苗木遭受干旱胁迫时,随着土壤含水量的减少,3种植物叶片脯氨酸含量都表现出逐渐增加的规律,从第3天开始3种植物间存在显著差

异.其中椴叶吴茱萸和任豆叶片中的脯氨酸含量在干旱胁迫初期缓慢增加,干旱胁迫12 d后才呈现迅速增加的现象.而石斑木叶片中初期脯氨酸含量始终低于另两个树种,干旱胁迫9 d后开始快速增加,之后一直处于3个树种的最大值.一般认为土壤含水量占田间持水量80%以上为正常水平,70%~50%为轻度干旱,50%~30%为中度干旱,低于30%为重度干旱.3种植物叶片中脯氨酸含量都在中度干旱(9~12 d)后开始快速增加,并在干旱胁迫24 d(重度干旱)达到峰值,峰值分别为:石斑木 490.86 μg · g⁻¹ > 任豆 320.76 μg · g⁻¹ > 椴叶吴茱萸 278.33 μg · g⁻¹,石斑木的最大含量分别是任豆和椴叶吴茱萸的1.5和1.8倍.脯氨酸含量的峰值与对照相比,石斑木增加15.16倍、任豆增加6.74倍、椴叶吴茱萸增加3.78倍.方差分析结果表明,水分胁迫24 d后3种苗木的脯氨酸含量差异显著(P<0.05),与正常水分条件相比差异显著(P<0.05).可见水分胁迫对苗木叶片中脯氨酸含量有较大的影响.

表3 干旱胁迫对苗木脯氨酸含量的影响¹⁾

Tab.3 Drought stress on proline content of seedlings

w(脯氨酸)/(μg · g⁻¹)

苗木	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	15 d	19 d	24 d
椴叶吴茱萸	50.80±7.03a	71.81±6.11a	70.40±5.14b	81.76±12.30b	99.69±8.13c	132.67±12.20c	198.34±17.04c	278.33±20.11c
石斑木	28.68±3.21a	33.21±4.80c	35.77±2.03c	49.77±20.78c	143.88±20.71a	219.67±17.70a	379.73±24.51a	490.86±20.01a
任豆	36.72±4.33a	60.87±6.04b	75.87±8.18a	88.67±4.01a	107.11±9.50b	167.98±16.29b	248.67±18.02b	320.76±21.16b

1) 同列数据后,凡具有一个相同小写字母者,表示在0.05水平上差异不显著(Duncan's 多重比较法).

2.2 干旱胁迫对苗木可溶性糖含量的影响

表4表明,在正常水分条件下,3种植物叶片所含可溶性糖的水平基本一致,分别为椴叶吴茱萸 8.70 mg/g、石斑木 7.96 mg/g、任豆 7.65 mg/g.在干旱胁迫程度逐渐加深的情况下,土壤含水量也逐渐变小,植物叶片中可溶性糖含量都表现出逐渐增大的规律,干旱胁迫3~6 d内,3种苗木间可溶性糖含量差异不显著,在重度干旱时期(24 d)达到峰值,分别为:石斑木 38.18 mg/g,任豆 30.89 mg/g,椴叶吴茱萸 27.74 mg/g,峰值时石斑木的可溶性糖含量比任豆和椴叶吴茱萸高出7.29和10.44 mg/g.方差分析结果表明,3种苗木与正常水分条件下相比差异极显著(P<0.01),较正常水分条件相比,石斑木叶片

中可溶性糖含量增加最多,为30.17 mg/g,其次任豆增加23.24 mg/g,椴叶吴茱萸增加最少,为19.04 mg/g.在水分胁迫0~6 d,3种苗木叶片中可溶性糖含量增加缓慢,任豆和椴叶吴茱萸从第6天才开始迅速增加,增幅相对稳定,维持在5%左右.而石斑木叶片中可溶性糖含量的变化与另2个树种有一定区别,从正常水分条件下到干旱胁迫第12天,石斑木叶片的可溶性糖含量始终低于任豆和椴叶吴茱萸,在干旱胁迫第9天(轻度干旱),石斑木的可溶性糖含量才开始大幅度增加,比任豆和椴叶吴茱萸迟了3 d,15 d后完全高于另外2个树种,且增幅比另外两个树种高出160.10%(椴叶吴茱萸)和75.2%(任豆).

表4 干旱胁迫对苗木可溶性糖含量的影响¹⁾

Tab.4 Drought stress on soluble sugar content of seedlings

w(可溶性糖)/(mg · g⁻¹)

苗木	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	15 d	19 d	24 d
椴叶吴茱萸	8.70±0.71a	9.80±0.83a	11.00±0.92a	16.00±1.10a	18.28±0.77b	20.65±1.51b	21.98±1.53c	27.74±1.33c
石斑木	7.96±0.62a	8.87±0.81a	9.00±0.84a	11.00±1.22b	18.00±1.21b	24.00±1.20a	30.00±1.80a	38.13±1.80a
任豆	7.65±0.52a	8.90±0.55a	10.70±0.60a	16.78±0.80a	21.00±1.10a	23.00±1.09a	26.00±1.83b	30.89±1.59b

1) 同列数据后,凡具有一个相同小写字母者,表示在0.05水平上差异不显著(Duncan's 多重比较法).

2.3 干旱胁迫对苗木可溶性蛋白质含量的影响

数据经方差分析(表5)表明,3种植物在正常水分条件下可溶性蛋白质含量差异显著.在干旱胁迫程度逐渐加深的情况下,苗木叶片中可溶性蛋白质含量总体表现出先增大后减小的规律,3种苗木间可溶性蛋白质含量差异显著,且除24 d外,3个树种可溶性蛋白质都高于正常水分条件下的值.在干旱胁迫第9天(轻度干旱)楝叶吴茱萸和任豆最先达到峰值,其中楝叶吴茱萸叶片中可溶性蛋白质质量比为5.97 mg/g,任豆为6.84 mg/g,而石斑木在干旱胁迫

第12天(中度干旱)才达到峰值7.44 mg/g,楝叶吴茱萸的含量比石斑木和任豆分别高出24.6%和8.77%.轻度干旱时期(3~9 d),石斑木叶片中可溶性蛋白质含量始终低于另外2个树种.在峰值之后3种苗木叶片中可溶性蛋白质的含量都逐渐下降,且楝叶吴茱萸和任豆下降速率快于石斑木,但可溶性蛋白质含量却远低于石斑木.在干旱胁迫24 d时,楝叶吴茱萸和任豆分别低于正常水分条件51.2%和16.95%,石斑木却比正常水分条件高了53.64%.

表5 干旱胁迫对苗木可溶性蛋白质含量的影响¹⁾

Tab.5 Drought stress on soluble protein content of seedlings

$w(\text{可溶性蛋白质})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$

苗木	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	15 d	19 d	24 d
楝叶吴茱萸	1.66 ± 0.20a	2.58 ± 0.3a	4.58 ± 0.2a	5.97 ± 0.47b	4.34 ± 0.35c	2.87 ± 0.33c	1.98 ± 0.15c	0.8 ± 0.26b
石斑木	1.51 ± 0.20a	2.04 ± 0.3b	3.69 ± 0.35b	5.23 ± 0.38c	7.44 ± 0.16a	5.98 ± 0.27a	3.98 ± 0.21a	2.3 ± 0.33a
任豆	1.18 ± 0.10b	2.76 ± 0.2a	3.75 ± 0.16b	6.84 ± 0.25a	5.98 ± 0.33b	3.70 ± 0.13b	2.57 ± 0.34b	0.9 ± 0.35b

1) 同列数据后,凡具有一个相同小写字母者,表示在0.05水平上差异不显著(Duncan's 多重比较法).

3 讨论与结论

3.1 干旱胁迫对植物体内脯氨酸含量的影响

脯氨酸是植物体内的一种重要渗透调节物质,对干旱胁迫反应较敏感,累积数量的多少可作为衡量作物抗旱力的生理指标,在植物体内大量积累的现象已被许多试验所证实^[14-16].因此在干旱处理时脯氨酸含量越高,显示其抗旱能力越强.本试验中,3种植物在轻度干旱时体内脯氨酸含量缓慢提升,中度干旱时开始急速增加,重度干旱时期达到最大值,且石斑木在轻度干旱时期叶片中脯氨酸含量低于另外两个树种,重度干旱时期为3个树种最大,24 d时的峰值最大,分别是任豆和楝叶吴茱萸的1.5倍和1.8倍.说明石斑木对干旱条件的适应性、自我调节能力强,抗旱能力好.这与梁文斌等^[17]对干旱胁迫下光皮树 *Cornus wilsoniana* 不同无性系苗木的生理生化变化和朱万泽等^[18]对台湾桤木 *Alnus formosana* 和四川桤木 *A. cremastogyne* 种源苗木对水分胁迫的生理响应的试验结果一致.

3.2 干旱胁迫对植物体内可溶性糖含量的影响

可溶性糖是一种重要的渗透调节物质,在干旱逆境条件下,植物体内可溶性糖含量会出现不同程度的增加,通过渗透调节降低水分胁迫对苗木的伤害,在一定程度上能反映其对不良环境的适应能力^[19-24].本试验结果表明,随着土壤水分的下降和胁迫时间的延长,石斑木能迅速适应环境条件,在干旱胁迫中期和末期,苗木可溶性糖含量增加最快,这与韩蕊莲等^[25]对沙棘 *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* 的可溶性糖主要在胁迫中、后期才开始累积

的结果一致.其次是任豆,而抗旱性弱的楝叶吴茱萸的这种能力较弱,叶片中可溶性糖含量增加更少.在胁迫后期,可溶性糖含量又迅速升高,这与吉增宝等^[26]在不同季节干旱及复水对刺槐 *Robinia pseud-acacia* 幼苗可溶性糖含量的影响和梁文斌等^[17]对干旱胁迫下光皮树不同无性系苗木的生理生化变化研究结果相同,可能是由于严重胁迫导致呼吸速率降低所致.较正常水分条件相比,石斑木叶片中可溶性糖含量增加最多为30.17 mg/g,其次任豆增加23.24 mg/g,楝叶吴茱萸增加最少为19.04 mg/g.且石斑木较另外2个树种峰值都大,说明该树种对干旱环境的适应性和抗旱性较另外两树种强,并有很强的自我调节能力.

3.3 干旱胁迫对植物体内可溶性蛋白质含量的影响

干旱引起植物体内活性氧的积累,导致膜脂过氧化和蛋白质(酶)、核酸等分子的破坏,为了避免胁迫造成伤害,会诱导产生一些抗逆蛋白质,高含量的可溶性蛋白可帮助维持植物细胞较低的渗透势,抵抗水分胁迫导致的伤害,所以抗旱性强的植物种类或品种的可溶性蛋白含量较高^[27-29].本试验中,水分胁迫0~19 d可溶性蛋白质含量均高于正常水分条件,24 d时石斑木依旧高于正常值,而楝叶吴茱萸、任豆低于正常值.在干旱胁迫第9天(轻度干旱)楝叶吴茱萸和任豆最先达到峰值,而石斑木在干旱胁迫第12天(中度干旱)才达到峰值,这可能是由于干旱处理初期植物体内的不溶蛋白转变为可溶蛋白以增强渗透调节能力,但随着干旱时间的延长,植物对干旱的忍耐能力降低,植物体内代谢受阻,导致蛋白质降解,这与张晓海等^[30]在干旱胁迫对烤烟

幼苗生长及抗性生理的影响的研究结果一致。

综上所述,本试验研究了楝叶吴茱萸、石斑木、任豆3个树种在正常生长环境下和干旱胁迫处理条件下与抗旱性密切相关的生理指标:脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质含量的动态变化。由上述的分析可以得出,在干旱胁迫下,石斑木具有较为理想的抗旱特性,其次是任豆,楝叶吴茱萸的抗旱能力较差。希望本试验结果能为在石灰岩地区选育优良的抗旱、节水树种提供理论依据,为建立更加完善的抗旱指标体系做好基础。

致谢:本试验所用苗木为华南农业大学林学院庄雪影教授提供,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] HSHAO T C. Plant responses to waters tress[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1973, 24: 519-570.
- [2] NUCCIO M L, RHODES D, McNEIL S D, et al. Metabolic engineering of plants for osmotic stress resistance [J]. Curr Opin Plant Biol, 1999, 2(2): 128-134.
- [3] SMIRNOFF N. Plan tresistance to environmental stress [J]. Curr Opin Biotechnol, 1998, 9(2): 214-219.
- [4] MENDY M C. Active oxygen species in plant defense against pathogens[J]. Plant Physiol, 1994, 105(2): 467-472.
- [5] 李德全, 邹琦, 程炳嵩. 植物在逆境下的渗透调节[J]. 山东农业大学学报, 1989(2): 75-80.
- [6] 马双艳, 姜远茂, 彭福田, 等. 干旱胁迫对不同板栗品种叶片渗透调节物质含量及光合的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 114-119.
- [7] 王琼, 宋桂龙, 韩烈保, 等. 5种野生护坡植物的抗旱综合性评价[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2008, 37(2): 153-157.
- [8] 夏尚光, 张金池, 梁淑英, 等. 水分胁迫下3种榆树幼苗生理变化与抗旱性的关系[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 131-134.
- [9] 蒲光兰, 袁大刚, 胡学华, 等. 土壤干旱胁迫对3个杏树品种生理生化特性的影响[J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(4): 375-379.
- [10] 秦飞, 陈平, 王朋, 等. 我国石灰岩地区森林培育技术研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 120-124.
- [11] 白宝璋, 汤学军. 植物生理学测试技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 76-157.
- [12] 王晶英, 敖红, 张杰, 等. 植物生理化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003: 12-13.
- [13] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 世界图书出版社, 2000: 137-138.
- [14] 马双艳, 姜远茂, 彭福田, 等. 干旱胁迫对苹果叶片中甜菜碱和丙二醛及脯氨酸含量的影响[J]. 落叶果树, 2003(5): 1-4.
- [15] 律秀娜, 任丽娜, 黄真真, 等. 干旱胁迫对月见草体内游离脯氨酸含量的影响[J]. 高师理科学刊, 2007, 27(3): 66-68.
- [16] 李波, 贾秀峰, 白庆武, 等. 干旱胁迫对首蓿脯氨酸累积的影响[J]. 植物研究, 2003, 23(2): 189-191.
- [17] 梁文斌, 蒋丽娟, 马倩, 等. 干旱胁迫下光皮树不同无性系苗木的生理生化变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(4): 13-19.
- [18] 朱万泽, 王金锡, 薛建辉. 台湾桧木和四川桧木种源苗木对水分胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报, 2005, 25(10): 1969-1975.
- [19] TAN Wei-xing, BLAKE T J, BOYLE T J B. Drought tolerance in faster-and slower-growing black spruce (*Picea mariana*) progenies: II: Osmotic adjustment and changes of soluble carbohydrates and amino acids under osmotic stress[J]. Physiol Plant, 1992, 85(4): 645-651.
- [20] GUEHL J M, CLEMENT A, KAUSHAL P, et al. Planting stress, water status and non-structural carbohydrate concentrations in Corsican pine seedlings[J]. Tree Physiol, 1993, 12(2): 173-183.
- [21] 陈立松, 刘星辉. 水分胁迫对荔枝叶片糖代谢的影响及其与抗旱性的关系[J]. 热带作物学报, 1999, 20(2): 31-36.
- [22] 童方平, 方伟, 马履一, 等. 湿地松优良半同胞家系蛋白质及糖类对水分胁迫的生理响应[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 459-464.
- [23] 汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性[J]. 植物生理学通讯, 1983, 19(4): 1-7.
- [24] SUBBZRAO G V, CHAUHAN Y S, JOHANAN C. Patterns of osmotic adjustment in pigeonpea: Its importance as a mechanism of drought resistance [J]. Eur J Agron, 2000, 12(3/4): 239-249.
- [25] 韩蕊莲, 李丽霞, 梁宗锁. 干旱胁迫下沙棘叶片细胞膜透性与渗透性调节物质研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(1): 23-27.
- [26] 吉增宝, 王进鑫, 李继文, 等. 不同季节干旱及复水对刺槐幼苗可溶性糖含量的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1358-1363.
- [27] 刘娥娥, 汪沛洪, 郭振飞. 植物的干旱诱导蛋白[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(2): 155-160.
- [28] 吴志华, 曾富华, 马生健. ABA对PEG胁迫下狗牙根可溶性蛋白质的影响[J]. 草业学报, 2004, 13(5): 75-78.
- [29] XIONG Li-ming, SCHUMAKER K S, ZHU Jian-kang. Cell signaling during cold, drought, and salt stress[J]. Plant Cell, 2002, 14(增刊1): 165-183.
- [30] 张晓海, 蔡寒玉, 汪耀富, 等. 干旱胁迫对烤烟幼苗生长及抗性生理的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 189-192.