

3 种禾本科牧草萌发期和苗期的抗旱性研究

熊阳阳^{1,2}, 韩博^{1*} (1. 云南农业大学动物科学技术学院, 云南昆明 650201; 2. 西南林业大学园林学院, 云南昆明 650224)

摘要 [目的]研究3种禾本科牧草萌发期和苗期的抗旱性。[方法]以特高多花多年生黑麦草、贝斯利斯克伏生臂形草及普通型狗牙根3种禾本科牧草为试验材料,采用PEG6000模拟干旱胁迫,测定不同PEG胁迫下各草种的发芽率、发芽势、叶片含水量、电导率、丙二醛含量等指标,探究3种禾本科牧草在昆明地区的抗旱性。[结果]干旱胁迫下,普通型狗牙根的发芽率和发芽势显著高于其他品种,并且其隶属函数均值最大。与对照相比,PEG胁迫对3种禾本科牧草发芽率、发芽势、叶片含水量、电导率、丙二醛含量的影响达到显著水平($P<0.05$)。[结论]3种禾本科牧草中,抗旱性最强的是普通型狗牙根。因此,普通型狗牙根可作为昆明地区首选抗旱品种。

关键词 禾本科牧草;PEG胁迫;抗旱性;隶属函数值
中图分类号 S54 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)07-0088-04

Study on the Drought Resistance of Three Kinds of Gramineae Forage in the Germination and Seedling Stages
XIONG Yang-yang^{1,2}, HAN Bo¹ (1. Institute of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201; 2. Institute of Landscape, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224)

Abstract [Objective] To study the drought resistance of three kinds of Gramineae forage in the germination and seedling stages. [Method] Taking three kinds of Gramineae forage (*Brachiaria decumbens* Stapf, *Lolium perenne* and *Cynodon dactylon* as test materials, PEG6000 was used to simulate drought stress. The germination rate, germination potential, leaf water content, electrical conductivity, malondialdehyde (MDA) content and other physiological indexes under different PEG stress were determined. And the drought resistance of three kinds of Gramineae forage was studied. [Result] Under drought stress, the germination rate and germination potential of *Cynodon dactylon* were significantly higher than that of other varieties, and its membership function value was the highest. Compared with CK, PEG stress had significant effects on the germination rate, germination potential, leaf water content, electrical conductivity, MDA content of three kinds of Gramineae forage ($P<0.05$). [Conclusion] Among three kinds of Gramineae forage, *Cynodon dactylon* had the strongest drought resistance. Therefore, *Cynodon dactylon* can be used as the first choice of drought resistant varieties of turfgrass in the Kunming area.

Key words Gramineae forage;PEG stress;Drought resistance;Membership function value

干旱是影响植物正常生长发育的主要生态因子之一,也是制约我国草业发展的主要因素。近年来,生物节水技术和海绵城市的理论相继被提出并已显示出其特点与优势,但我国干旱缺水情况依然严峻。云南地区虽然年均降水量较高,但是各季节间分布不均衡,以昆明为首的各地区干旱形势较为严峻,所以研究草坪草的抗旱性有助于昆明地区抗旱草种的选择和利用。同时,选育抗旱且节水性强的草地品种是牧草抗旱研究中的重要工作之一^[1]。植物的抗旱性是一个受多种因素影响的较为复杂的综合性状,这些因素的综合作用促进了抗旱性的形成。因此,植物抗旱性应该用多项指标来综合评价,才能使评定结果与实际结果更为接近^[2]。植物含水量是反映植物水分状况的重要指标,植物组织含水量不仅直接影响植物的生长、气孔状况,而且对光合作用甚至作物产量也有着至关重要的作用^[3]。相对电导率是反映植物膜系统状况的重要生理生化指标之一,植物在受到逆境或者其他损伤的情况下细胞膜容易破裂,膜蛋白受伤害而使胞质的胞液外渗而使相对电导率增大^[4]。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的主要产物之一,其累积可作为膜脂过氧化程度的指标之一,通常将其作为脂质过氧化指标,用于表示细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱^[5]。贝斯利斯克伏生臂形草(*Brachiaria decumbens* Stapf)、特高多花多年生黑麦草(*Lolium perenne*)和普通型狗牙根(*Cynodon dac-*

tylon)在云南热带及亚热带利用较为广泛,昆明地区较为常见,可作为牧草及草坪草。但迄今为止,关于这3种牧草抗旱性比较的研究鲜见报道。笔者使用不同浓度PEG6000模拟干旱胁迫,对3种禾本科牧草萌发期的发芽情况进行比较,同时采用盆栽试验的方法在苗期对3种禾本科牧草进行干旱胁迫,研究干旱胁迫对3种禾本科牧草生理指标的影响,比较3种禾本科牧草的抗旱性,筛选出最适合在昆明地区种植的抗旱品种,旨在为干旱半干旱地区禾本科牧草的引进和推广提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料 供试材料为云南省普遍种植的多年生特高多花黑麦草、贝斯利斯克伏生臂形草、普通型狗牙根,由云南农业大学动物科学技术学院草业科学实验室提供。

1.2 试验设计 将种子用PEG6000处理,参照苏秀红等^[6]的方法设置3个浓度梯度(5%、10%、15%),以蒸馏水为对照,每个处理3次重复。每个重复在铺有2层灭菌试纸的培养皿中放入50粒种子,将试纸浸透后置于16℃条件下8h,白天/黑夜条件的人工气候培养箱下进行培养,每天定期浇蒸馏水1次,浇至滤纸完全浸润即可。生长至第5天各种子发芽出苗整齐时进行发芽势测定,生长至第7天全部种子进入发芽终期时进行发芽率的测定。将用于生长至幼苗的种子种植于装有石英砂的花盆中,在生长初期用等量的完全培养液进行浇灌,待幼苗长至五叶期时使用浓度分别为10%、20%的PEG胁迫液进行处理,每次胁迫液的使用量约为10 mL,处理72h后幼苗叶尖开始发黄,将长势基本一致的幼苗叶片剪下,进行各指标的测定。

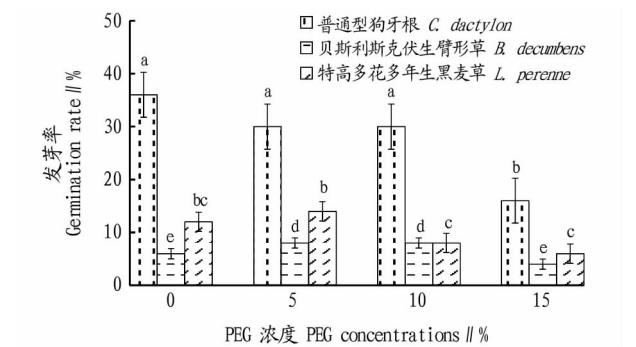
基金项目 云南省教育厅科学研究基金项目(2016ZZX104)。
作者简介 熊阳阳(1994—),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,研究方向:园林植物与观赏园艺。*通讯作者,讲师,博士,从事牧草遗传育种研究。
收稿日期 2017-12-12; **修回日期** 2017-12-20

1.3 测定项目与方法 发芽率是指发芽终期全部正常种子数占供测样品种子数的百分比^[7]。发芽势是指在规定的发芽时间内发芽种子数达到最高峰时,发芽的种子数占供测样品种子数的百分率。相对电导率的测定参照孙群等^[8]的电导仪法。相对含水量的测定参照张鹤山等^[9]的称重法。丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸显色法^[10]。

1.4 数据处理 试验数据使用 Excel 2007 软件进行处理后,再使用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析和 Duncan’s 多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 3 种禾本科牧草种子发芽率和发芽势的影响 从图 1 和图 2 可以看出,普通型狗牙根在 3 种禾本科牧草中发芽率和发芽势最高,其次是特高多花多年生黑麦草,贝斯利斯克伏生臂形草的发芽率最低。3 种禾本科牧草种子的发芽率随着 PEG 胁迫浓度的增加总体呈下降趋势,当 PEG 浓度为 5% 时种子的发芽率和发芽势基本呈上升趋势,但当 PEG 浓度大于 10% 后 3 种禾本科牧草种子的发芽率普遍呈下降趋势。当 PEG 浓度为 5% 时 3 种禾本科牧草种子的发芽势与对照相比略有上升,当 PEG 浓度大于 5% 时 3 种禾本科牧草种子的发芽势总体上呈下降趋势。



注:同一浓度 PEG 处理不同种牧草间标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters among different varieties of forage with the same concentration of PEG indicated significant differences ($P < 0.05$)

图 1 PEG 胁迫对 3 种禾本科牧草种子发芽率的影响

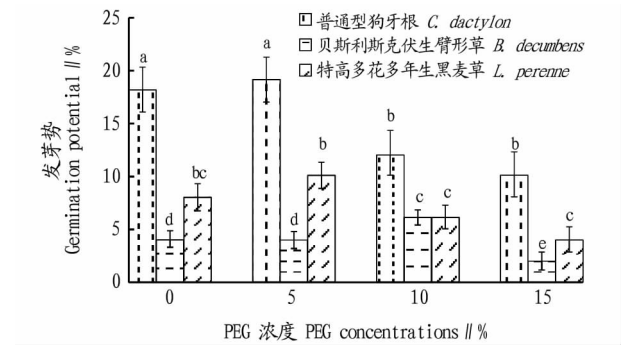
Fig. 1 The effects of PEG stress on the seed germination rate of three kinds of Gramineae forage

表 1 PEG 胁迫对 3 种禾本科牧草幼苗相对含水量的影响			
Table 1 The effects of PEG stress on relative water content in the seedlings of three kinds of Gramineae forage			
牧草类型 Types of forage	PEG 浓度 PEG concentrations // %		
	0	10	20
普通型狗牙根 <i>C. dactylon</i>	19.49 ± 0.56 a	16.90 ± 0.23 a	15.97 ± 0.18 a
贝斯利斯克伏生臂形草 <i>B. decumbens</i>	16.43 ± 0.18 b	12.40 ± 0.43 b	11.06 ± 0.52 b
特高多花多年生黑麦草 <i>L. perenne</i>	13.57 ± 0.35 c	11.11 ± 0.15 b	8.93 ± 0.45 c

注:同列不同字母表示显著差异($P < 0.05$)

Note: Different small letters in the same column indicated significant difference ($P < 0.05$)

2.2 干旱胁迫对 3 种禾本科牧草幼苗丙二醛含量的影响 丙二醛(MDA)是由于植物器官衰老或在逆境条件下受到损伤,其组织或器官发生过氧化反应而产生的。MDA 是



注:同一浓度 PEG 处理不同种牧草间标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters among different varieties of forage with the same concentration of PEG indicated significant differences ($P < 0.05$)

图 2 PEG 胁迫对 3 种禾本科牧草种子发芽势的影响

Fig. 2 The effects of PEG stress on the seed germination potential of three kinds of Gramineae forage

2.2 干旱胁迫对 3 种禾本科牧草幼苗相对含水量的影响 在干旱或高温等逆境胁迫下,植物相对含水量会下降,胁迫程度越深,相对含水量越低,使组织中束缚水的含量相对增加,从而使植物抗逆性增加。由表 1 可知,随着 PEG 胁迫强度的增加,3 种禾本科牧草的相对含水量均呈下降趋势,其中普通型狗牙根幼苗的相对含水量的下降趋势最为平缓。与对照相比,当 PEG 浓度为 20% 时普通型狗牙根幼苗的相对含水量为 19.49%,贝斯利斯克伏生臂形草幼苗的相对含水量为 16.43%,特高多花多年生黑麦草幼苗的相对含水量为 13.57%。由此可见,普通型狗牙根的抗旱性更好。

2.3 干旱胁迫对 3 种禾本科牧草幼苗相对电导率的影响 相对电导率是反映植物膜系统状况的一个重要指标,在正常生长状况下植物细胞膜保持着良好的选择透性,当植物组织受到逆境伤害时细胞膜容易破裂,膜蛋白受伤害使细胞质的胞液外渗^[11]。由表 2 可知,随着胁迫程度的加深,普通型狗牙根相对电导率的变化趋势较为平缓,最为明显的是贝斯利斯克伏生臂形草。当 PEG 浓度为 20% 时,普通型狗牙根的相对电导率比对照增加了 4.3 百分点,特高多花多年生黑麦草的相对电导率比对照增加了 6.3 百分点,而贝斯利斯克伏生臂形草的相对电导率比对照增加了 34.3 百分点。

植物器官在逆境条件下发生膜脂过氧化作用的产物之一。由表 3 可知,随着 PEG 胁迫浓度的增加,3 种禾本科牧草幼苗 MDA 含量也相应增加。随着 PEG 胁迫浓度的增加,普通

型狗牙根幼苗 MDA 含量的上升趋势相对平缓,特高多花多年生黑麦草与贝斯利斯克伏生臂形草的上升幅度较为明显。当 PEG 浓度为 20% 时,普通型狗牙根幼苗的 MDA 含量比对照增加了 3.3 百分点,特高多花多年生黑麦草幼苗的 MDA 含量增加了 7.09 百分点,而贝斯利斯克伏生臂形草幼苗的 MDA 含量则增加了 7.12 百分点。

表 2 PEG 胁迫对 3 种禾本科牧草幼苗相对电导率的影响

Table 2 The effects of PEG stress on the relative electrical conductivity in the seedlings of three kinds of Gramineae forage				%
牧草类型 Types of forage	PEG 浓度 PEG concentrations//%			
	0	10	20	
普通型狗牙根 <i>C. dactylon</i>	48.5 ± 2.97 b	49.6 ± 1.40 bc	52.8 ± 4.64 c	
贝斯利斯克伏生臂形草 <i>B. decumbens</i>	32.9 ± 4.65 c	52.7 ± 3.27 b	67.2 ± 2.49 b	
特高多花多年生黑麦草 <i>L. perenne</i>	83.4 ± 1.39 a	86.9 ± 0.38 a	89.7 ± 1.13 a	
注:同列不同小写字母表示显著差异($P < 0.05$) Note:Different small letters in the same column indicated significant differences($P < 0.05$)				

表 3 PEG 胁迫对 3 种禾本科牧草幼苗丙二醛含量的影响

Table 3 The effects of PEG stress on MDA content in the seedlings of three kinds of Gramineae forage				μmol/g
牧草类型 Types of forage	PEG 浓度 PEG concentrations//%			
	0	10	20	
普通型狗牙根 <i>C. dactylon</i>	2.71 ± 0.17 c	4.96 ± 0.84 b	6.01 ± 0.37 c	
贝斯利斯克伏生臂形草 <i>B. decumbens</i>	6.28 ± 0.93 a	8.27 ± 0.93 a	13.40 ± 0.93 a	
特高多花多年生黑麦草 <i>L. perenne</i>	4.27 ± 0.16 b	7.92 ± 1.09 ab	11.36 ± 0.57 b	
注:同列不同小写字母表示显著差异($P < 0.05$) Note:Different small letters in the same column indicated significant differences($P < 0.05$)				

2.5 隶属函数值法综合分析评价 采用模糊数学中的隶属函数值法评价 3 种禾本科草坪草种子萌发期和苗期抗旱性,隶属函数分析方法在多指标测定的基础上对材料特性进行综合评价,避免了仅利用少数生理指标对较少的品种进行评价的不准确性。通过对 3 种禾本科牧草的发芽率、发芽势、叶片含水量、电导率、MDA 含量 5 项指标进行分析,若隶属函数值的均值越大,则抗旱性越强^[12]。

隶属函数值的计算公式^[13]如下:

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) \times (X_{\max} - X_{\min})$$

式中, X_i 为指标测定值,其中 $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 为所参试材料某一指标的最大值和最小值。

若为负相关,则计算公式为: $R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) \times (X_{\max} - X_{\min})$ 。

由表 4 可知,普通型狗牙根在各项生理指标下的隶属函数值均比特高多花多年生黑麦草及贝斯利斯克伏生臂形草高。由此可见,其抗旱性最强,其次是贝斯利斯克伏生臂形草,而特高多花多年生黑麦草的抗旱性最弱。从叶片相对含水量来看,当 PEG 浓度为 20% 时隶属函数均值最高;从相对电导率来看,当 PEG 浓度为 10% 时 3 种禾本科牧草幼苗的抗旱性最强;从 MDA 含量来看,当 PEG 浓度为 10% 时隶属函数值最高,其抗旱性最强。

表 4 3 种禾本科牧草各指标在各浓度 PEG 下的隶属函数值

Table 4 Membership function values of each index of three kinds of Gramineae forage under the treatment of different concentrations of PEG									
牧草类型 Types of forage	相对含水量 Relative water content			相对电导率 Relative electrical conductivity			MDA 含量 MDA content		
	CK	10% PEG	20% PEG	CK	10% PEG	20% PEG	CK	10% PEG	20% PEG
普通型狗牙根 <i>C. dactylon</i>	34.81	20.25	44.89	-791.5	0	0	0	0	0
贝斯利斯克伏生臂形草 <i>B. decumbens</i>	8.68	5.85	21.44	0	-114.6	-531.2	-13.79	-9.96	-22.27
特高多花多年生黑麦草 <i>L. perenne</i>	0	0	0	-1 346.9	-1 390.3	-2 549.2	-5.04	-8.80	-27.62
均值 Mean	14.50	8.70	22.08	-712.8	-501.6	-1 026.8	-6.28	-6.25	-14.96

3 讨论与结论

相对含水量、丙二醛含量、相对电导率在鉴定种子抗旱性方面已经得到了广泛应用^[14-16],并能够反映出干旱胁迫对牧草的伤害程度、细胞器膜系统的破坏和种子的抗旱性。在干旱胁迫条件下,对 3 种禾本科牧草种子的发芽率和发芽势以及幼苗的叶片含水量、相对电导率及丙二醛含量进行综合分析发现,3 种禾本科牧草种子的发芽率随着 PEG 胁迫浓

度的增加总体上呈下降趋势,当 PEG 浓度低于 10% 时,种子发芽率与发芽势与对照相比未受明显影响,而当 PEG 浓度大于 10% 时种子发芽率与发芽势受到明显抑制,这与苏秀红等^[6]的试验结果基本一致。由此可见,PEG 胁迫对牧草种子萌发的进程有一定的延缓作用,低浓度(5%、10%)PEG 胁迫能提高牧草种子的活力指数,高浓度(15%)PEG 胁迫则会显著抑制种子萌发。这与马海鸽等^[17]和李志萍等^[18]的研究结

果相一致。随着 PEG 浓度的增加, 贝斯利斯克伏生臂形草的叶尖处出现发黄直至萎蔫, 其次是特高多花多年生黑麦草, 而普通型狗牙根的萎蔫程度不明显。这与抗旱性强的植物叶片含水量较高且变化幅度较小的结论^[19]相一致。植物在受到逆境的影响时, 蒸腾速率和水分吸收能力下降, 但蒸腾量大于水分吸收量, 造成植物含水量下降, 引起气孔关闭, 表现出抗旱特征; 电导率上升幅度小, 说明植物细胞膜伤害程度不大^[20]。研究表明, 在持续干旱条件下, MDA 含量逐渐上升, 而且抗旱性越强的品种 MDA 含量上升幅度小^[20-22]。

综合分析几项指标可知, 3 种禾本科牧草中, 普通型狗牙根的抗旱性最强, 这与郭爱贵等^[2]的试验结果基本一致。干旱胁迫下, 3 种禾本科牧草的相对电导率与丙二醛含量随着干旱胁迫程度的增加而增加, 二者与干旱胁迫浓度均呈极显著的正相关; 3 种禾本科牧草的发芽率、发芽势及叶片相对含水量则随着干旱胁迫浓度的增加而不断降低, 二者与干旱胁迫浓度呈极显著的负相关。普通型狗牙根的发芽率和发芽势显著高于其他品种, 且其叶片含水量最高。随着 PEG 胁迫浓度的增加, 普通型狗牙根的叶片含水量下降幅度较为平缓, 并且相对电导率和丙二醛含量呈较为稳定的上升趋势, 而特高多花多年生黑麦草与贝斯利斯克伏生臂形草的情况差别不大。适宜浓度的胁迫处理对植物的生长具有一定的推动作用, 但若胁迫浓度过高则会对植物正常生长发育产生不利影响。在相同胁迫条件下, 3 种禾本科草坪草的抗旱性从强到弱依次为普通型狗牙根、贝斯利斯克伏生臂形草、特高多花多年生黑麦草。因此, 在昆明地区普通型狗牙根可以作为首选的抗旱牧草品种。近年来, 随着分子生物学和生物技术的兴起和发展及“海绵城市”理论的提出, 为生物性节水和抗旱带来了巨大活力。

参考文献

[1] 郑铁琦, 臧国长. PEG 胁迫对冷季型草坪草种子萌发和幼苗生长的影

响[J]. 种子, 2011, 30(12): 34-37.

- [2] 郭爱贵, 刘建秀, 郭海林. 几种暖季型草坪草抗旱性的初步鉴定[J]. 草业科学, 2002, 19(8): 61-62.
- [3] 龚子端, 李高阳. PEG 干旱胁迫对植物的影响[J]. 河南林业科技, 2006, 26(3): 21-23.
- [4] 陈爱葵, 韩瑞宏, 李东洋, 等. 植物叶片相对电导率测定方法比较研究[J]. 广东教育学院学报, 2010, 30(5): 88-91.
- [5] 聂石辉, 齐军仓, 张海禄, 等. PEG6000 模拟干旱胁迫对大麦幼苗丙二醛含量及保护酶活性的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(1): 11-17.
- [6] 苏秀红, 殷鹏辉, 董诚明, 等. 聚乙二醇-6000 对冬凌草种子萌发、幼苗生长及次生代谢产物积累的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2011, 17(5): 119-121.
- [7] 韩建国. 实用牧草种子学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1997: 133.
- [8] 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, 2004: 125-130.
- [9] 张鹤山, 刘洋, 王凤, 等. 紫花苜蓿品种耐热性研究[C]//农区草业论坛论文集. 北京: 中国草学会, 2008: 541-546.
- [10] 陈水红, 杨厚安, 张剑云, 等. NaCl 胁迫对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 塔里木大学学报, 2009, 21(1): 23-26.
- [11] 吴艳华, 陈雅君, 夏忠强. 草坪草抗旱生理机制的研究进展[J]. 四川草原, 2005(8): 37-39.
- [12] 魏永胜, 梁宗锁, 山仑, 等. 利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性[J]. 草业科学, 2005, 22(6): 33-36.
- [13] 刘华, 王峰, 李娜, 等. 隶属函数值法对 12 个树种抗旱性的综合评价[J]. 中国农村小康科技, 2010(10): 39-41.
- [14] 魏明丽. 干旱胁迫下冰草种子主要生理生化特征的变化与分析[J]. 种子世界, 2011(4): 20-21.
- [15] 汝红, 王瑞贞, 常海飞, 等. 干旱胁迫下早熟禾幼苗几种抗旱性指标的变化[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(34): 17258-17259.
- [16] 薛建鹏, 王秋玉, 任欢. 干旱胁迫下白桦主要生理指标的变化及相互关系[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(8): 12-15.
- [17] 马海鸽, 蒋齐, 王占军, 等. PEG 胁迫下野生甘草种子萌发和幼苗生长[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1487-1492.
- [18] 李志萍, 张文辉, 崔豫川. PEG 模拟干旱胁迫对栓皮栎种子萌发及生长生理的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(10): 2043-2049.
- [19] 栾忠奇, 刘晓红, 王国栋. 水分胁迫下小麦叶片的电容与水分含量关系[J]. 西北植物学报, 2007, 27(11): 2323-2327.
- [20] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(3): 92-100.
- [21] 洪丽芸, 田大伦, 李芳, 等. 不同灌溉方式对银杏水分生理的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(1): 49-52.
- [22] 刘茜. 樟树叶片蒸腾特性及其与生理生态因子关系分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(1): 1-5.

(上接第 79 页)

- [3] ABRIL S, OLIVERAS J, GÓMEZ C. Effect of temperature on the oviposition rate of Argentine ant queens (*Linepithema humile* Mayr) under monogynous and polygynous experimental conditions[J]. Journal of insect physiology, 2008, 54(1): 265-272.
- [4] ABRIL S, OLIVERAS J, GÓMEZ C. Effect of temperature on the development and survival of the Argentine ant, *Linepithema humile* [J]. Journal of insect science, 2010, 10(2): 1-13.
- [5] ANDERSON K E, MUNGER J C. Effect of temperature on brood relocation in *Pogonomyrmex salinus* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. Western North American naturalist, 2003, 63(1): 122-128.
- [6] WILLIAMS D F. Oviposition and growth of the fire ant *Solenopsis invicta* [M] // VAN DER MEER R K, JAFFÉK, CEDENO A. Applied myrmecology: A world perspective. Boulder: Westview Press, 1990: 150-157.
- [7] DREES B M, SUMMERLIN B, VINSON S B. Foraging activity and temperature relationship for the red imported fire ant [J]. Southwestern entomologist, 2007, 32(3): 149-155.
- [8] LU Y Y, WANG L, ZENG L, et al. The effects of temperature on the foraging activity of red imported fire ant workers (Hymenoptera: Formicidae) in South China [J]. Sociobiology, 2012, 9(2): 573-583.

- [9] CHEN J. Advancement on techniques for the separation and maintenance of the red imported fire ant colonies [J]. Insect science, 2007, 14(1): 1-4.
- [10] VALLES S M, PORTER S D. Identification of polygynous and monogynous fire ant colonies (*Solenopsis invicta*) by multiplex PCR of *Gp-9* alleles [J]. Insectes sociaux, 2003, 50(2): 199-200.
- [11] XU Y J, LU Y Y, PAN Z P, et al. Heat tolerance of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in Mainland China [J]. Sociobiology, 2009, 54(1): 115-126.
- [12] PORTER S D, TSCHINKEL W R. Fire ant thermal preferences: Behavioral control of growth and metabolism [J]. Behavioral ecology & sociobiology, 1993, 32(5): 321-329.
- [13] TSCHINKEL W R. The fire ants [M]. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 2006: 247-308.
- [14] KASPARI M. Body size and microclimate use in Neotropical granivorous ants [J]. Oecologia, 1993, 96(4): 500-507.
- [15] CERDÁ X, RETANA J. Links between worker polymorphism and thermal biology in a thermophilic ant species [J]. Oikos, 1997, 78(3): 467-474.
- [16] CLÉMENCET J, COURNAULT L, ODENT A, et al. Worker thermal tolerance in the thermophilic ant *Cataglyphis cursor* (Hymenoptera, Formicidae) [J]. Insectes sociaux, 2010, 57(1): 11-15.