

PEG 胁迫对萌动苦豆子子叶抗旱生理 及氧化苦参碱含量的影响

刘 丹,王 雪,杨 毅,段启荣,李亚斌,刘 晶,刘 萍
(宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:以 PEG-6000 模拟干旱条件,测定苦豆子种子萌发、萌动种子子叶中质膜相对透性(PMP)、丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量以及抗氧化酶 POD、CAT、SOD 酶活性以及氧化苦参碱含量,探讨苦豆子种子的抗旱适应性。结果表明:10% PEG 胁迫下,种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数均达到最高,依次为 66.67%,78.67%,24.40 和 183.79,20% PEG 胁迫种子仍有较高的发芽能力。随 PEG 胁迫程度加剧,萌动苦豆子种子子叶中质膜相对透性和 Pro 含量逐渐上升,MDA 含量逐渐下降;POD、CAT 和 SOD 3 种保护酶对于干旱胁迫的保护作用不尽相同,中轻度胁迫(PEG≤20%)时 POD 酶起主要作用,重度胁迫(PEG>20%)时 CAT 和 SOD 酶起主要作用。PEG 胁迫使子叶中 OMA 含量下降,OMA 含量与抗旱生理指标间均存在负相关。适度干旱有助于苦豆子种子萌发,萌动种子对于干旱有强的防御机制。

关键词: 苦豆子;萌动种子;PEG 胁迫;抗旱生理;氧化苦参碱
中图分类号: Q945.34; S567.2 **文献标志码:** A

Influence of PEG stress on cotyledons physiology and oxymatrine content in germinating seeds of *Sophora alopecuroides*

LIU Dan, WANG Xue, YANG Yi, DUAN Qi-rong, LI Ya-bin, LIU Jing, LIU Ping
(College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: The drought resistance and physiological characteristic and oxymatrine (OMA) content of *Sophora alopecuroides* germinating seed were investigated under the simulation drought stress by PEG-6000. The results showed that germinating energy, germinating percentage, germinating index, and seeds vigor index of *S. alopecuroides* simultaneously reached maximum at 10% PEG, with maximum value of 66.76%, 78.67%, 24.40, and 183.79 respectively. Meanwhile, at 20% PEG stress, significant germinating capability was still detected in germinating seed of *S. alopecuroides*. With increasing PEG stress, the relative permeability of plasma membrane and proline content increased gradually, while malonaldehyde (MDA) content in cotyledon of *S. alopecuroides* germinating seed decreased. It was found that the protecting mechanisms of peroxidase (POD), catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) for *S. alopecuroides* germinating seed under PEG stress varied, with POD playing major role under mild stress (PEG≤20%) but CAT and SOD under severe stress (PEG>20%). OMA content in cotyledons of *S. alopecuroides* germinating seed decreased with higher PEG stress and OMA content was found to be negatively correlated with relative permeability of plasma membrane, proline and MDA content, and activities of SOD, POD and CAT. These results indicate that moderate drought stress is helpful to *S. alopecuroides* at seed germination stage.

Keywords: *Sophora alopecuroides*; germinating seed; PEG stress; cotyledons physiology; oxymatrine

苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)是豆科槐属多年生草本植物^[1],主要生长于沙质土壤中,耐沙埋、抗风蚀,具有良好的沙生特点,在宁夏的盐池、灵武、陶乐等沙漠和荒漠地区有较丰富的资源,是宁夏自然植被的重要组成部分^[2]。苦豆子味极苦,具有清热解毒、抗菌消炎、止痛杀虫等作用^[3]。苦豆子中用

收稿日期:2015-09-10
基金项目:宁夏自然科学基金项目(NZ14033);国家级大学生创新创业训练计划项目(131074909)
作者简介:刘 丹(1990—),女,宁夏中卫人,学士,主要从事植物种质资源研究。E-mail: yichuan yuzhong@126.com。
通信作者:刘 萍(1961—),女,上海人,教授,主要从事植物种质资源研究。E-mail: liupnxdx@126.com。

于药物开发的主要有氧化苦参碱 (Oxymatrine, OMA), 苦参碱 (Matrine, MA), 槐果碱 (Sophocarpine) 和氧化槐果碱 (Oxysophocarpine) 等多种生物碱^[4]。有研究认为氧化苦参碱有抗乙型肝炎病毒、抗肝纤维化的药理作用, 是治疗慢性乙型肝炎的常用药物^[5-6], 还能抑制细胞生长和在体外诱导细胞凋亡^[7]。由于苦豆子较高的生态功能和药用价值, 苦豆子资源的合理保护与开发利用越来越受到人们的重视, 宁夏回族自治区将苦豆子列入重点保护的六大地道药材之一, 纳入国家中药现代化科技产业行动计划中, 生产基地建设和深层次领域开发都有长足的发展^[8]。

种子萌发是植物生长的重要阶段, 不仅受到自身遗传物质的控制, 还受干旱、高温、盐碱等环境因子的影响, 其中干旱胁迫影响植物的形态结构和生理功能, 严重影响植物的生长、发育和繁殖等生命活动^[9-11]。章炳醒等^[12]研究认为干旱胁迫影响黄檗幼苗的生理性状及叶片中小檗碱含量, 王进等^[13]认为 PEG 胁迫导致苦豆子种子的吸胀速率、发芽率、发芽指数、苗高和根长、组织饱和含水量等指标明显降低, 而苗干重、根干重和根冠比呈先升后降, 表明干旱是影响苦豆子种子萌发和幼苗生长主要的非生物胁迫因子之一。段启荣等^[14]认为干旱胁迫使得苦豆子幼苗叶片质膜相对透性增高, 长时间重度胁迫促使脯氨酸含量显著增加; POD、CAT 和 SOD 三种保护酶先后交替发挥作用, 苦豆子幼苗对干旱胁迫表现出较强的适应能力。然而对于干旱胁迫条件下苦豆子种子萌发阶段与抗旱相关的生理特性和氧化苦参碱含量的系统性研究还鲜见报道, 本文以 PEG 模拟干旱环境研究苦豆子种子在干旱条件下的萌发、萌发种子子叶的生理活性及氧化苦参碱含量变化, 旨在探讨干旱胁迫条件下萌动苦豆子种子各项抗旱生理指标的动态变化规律以及与氧化苦参碱含量之间的关系, 为揭示苦豆子的抗旱机制和苦豆子的人工栽培以及幼苗培育提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

苦豆子荚果采自宁夏永宁县杨和乡 (106°144', 38°138'), 经自然干燥后脱粒精选饱满的子粒, 种子用 98% H₂SO₄ 处理 20 min 以破除硬实, 清水反复冲洗后晾干备用。

1.2 种子萌发

用质量分数 5%、10%、15%、20%、25%、30% PEG 溶液模拟干旱胁迫, 以去离子水为对照处理苦

豆子种子, 每胁迫处理 3 个重复, 各处理随机取 100 粒种子于培养皿 ($\varphi = 15 \text{ cm}$) 内, 加入适量处理溶液后加盖, 25℃ 恒温培养。为减少种子吸水引起培养皿内水势的变化, 每 12 h 更换一定量 PEG 处理液。第 3 天测定发芽势, 第 7 天测定发芽率, 发芽种子的鲜重、胚根长、胚根粗和干重等的称量参见阳翠等^[15]的方法, 分别计算发芽指数和活力指数。发芽指数 (GI) = $\Sigma (G_t / D_t)$ (其中 G_t 表示第 t 天的发芽数, D_t 表示相应的发芽天数); 活力指数 (VI) = $S \times GI$ (式中 S 为幼苗鲜质量重, GI 为发芽指数)^[16]。

用于萌动种子生理活性测定和氧化苦参碱提取的种子萌发过程如下: 取苦豆子种子在 25℃ 恒温箱中萌发, 挑出刚露白的种子, 分别以 5%、10%、15%、20%、25%、30% PEG 溶液模拟干旱胁迫处理已萌动的苦豆子, 以去离子水为对照, 重复 3 次, 余下处理同上。经胁迫处理 72 h 的萌动种子, 迅速去除种皮剪取子叶, 蒸馏水漂洗几次后吸干残留水分, 精确称取 0.5 g, 液氮冷冻, -70℃ 保存用于测定各生理指标 (电导率和 MDA 含量直接用鲜样测定); 其余子叶于 80℃ 烘箱中烘干, 用于氧化苦参碱 (OMA) 的提取。

1.3 萌动种子生理活性测定方法

电解质外渗量法测定质膜相对透性 (Plasma membrane permeability, PMP)^[17], 硫代巴比妥酸法测定丙二醛 (MDA) 含量^[17], 茚三酮显色法测定脯氨酸 (Pro) 含量^[17], 紫外吸收法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性^[17], 氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性^[17], 愈创木酚法测定过氧化物酶 (POD) 活性^[18]。

1.4 萌动种子氧化苦参碱的提取和含量的测定

精确称取干燥苦豆子子叶粉末 0.20 g 于锥形瓶中, 分别加入 1.0 mL 氨水、20 mL 三氯甲烷, 摇匀, 浸润 12 h 后超声提取 40 min, 取 15 mL 提取液经中性氧化铝小柱过滤, 并用 10 mL 氯仿: 甲醇 (7:3) 混合液清洗氧化铝小柱, 旋转蒸发除去溶液, 残渣用 50% 甲醇超声溶解并定容至 10 mL, 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min。上清液过 $\Phi 0.2 \mu\text{m}$ 滤膜后即有待测样品。

岛津 LC-20AT 型高效液相色谱仪, SPD-M20A 二极管阵列检测器, 岛津 LC-solution 工作站, 检测波长 210 nm, 柱温 30℃, 流动相为乙腈-0.2% 磷酸水溶液 (0.035:0.965), 进样量 10 μL , 流速 1 mL·min⁻¹。将浓度为 595.000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的氧化苦参碱标准品分别稀释 0, 2, 4, 8, 16, 32 倍, 按上述色谱条件分别测定, 以峰面积 A 为纵坐标对浓度 C 为横坐标作图, 得回归方程: $A = 1 \times 10^7 C + 49646$,

$r = 0.9993$, 氧化苦参碱浓度范围为 $18.594 \sim 595.000 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

1.5 数据处理

采用 DPS 6.0 软件对所有试验数据进行统计、分析,Duncan 法多重比较,Excel 绘图,不同小写字母表示显著性差异($P \leq 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 PEG 胁迫对苦豆子种子萌发的影响

随着 PEG 处理浓度的增加,苦豆子种子发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、发芽种子鲜重、胚根长、胚根粗等均表现为先升高再下降(表 1),10% PEG 胁迫下种子的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数都达到最高。方差分析表明,在较高浓度 PEG ($> 20\%$ PEG)胁迫下除发芽率外与发芽相关的其余指标和对照相比均存在显著差异,高浓度 PEG 严重

影响苦豆子种子萌发。

2.2 PEG 胁迫对萌动苦豆子子叶生理特性的影响

随 PEG 浓度的增加,萌动苦豆子种子子叶 PMP 和 Pro 含量表现为上升(表 2),5% 以上的 PEG 胁迫,就足以引起 PMP 的显著改变($P \leq 0.05$),而 Pro 含量的显著增加($P \leq 0.05$)则需要重度胁迫(PEG $\geq 25\%$)。5% PEG 胁迫下 MDA 含量最高,随胁迫的加剧,MDA 含量逐渐下降($P \leq 0.05$),但均高于 CK。CAT 和 SOD 活性在轻度胁迫(PEG $\leq 10\%$)下均略有下降,在中、重度胁迫(PEG $\geq 15\%$)下,两者的活性有所上升,但各处理组 CAT 活性与 CK 无显著差异,而 SOD 酶在中、重度胁迫下的活性却显著高于轻度胁迫下的活性($P \leq 0.05$),是其 7.6 ~ 13.0 倍。POD 活性表现为先上升再下降的趋势,15% PEG 胁迫下 POD 酶活性达到最大,随后迅速降低,30% PEG 胁迫下 POD 酶活性最低且小于 CK。

表 1 PEG 胁迫对苦豆子种子萌发的影响
Table 1 The indexes of seeds germination of *S. alopecuroides* after PEG stress

PEG 质量分数 PEG concentration /%	发芽势 Germination energy /%	发芽率 Germination /%	发芽指数 Germination index (GI)	活力指数 Vigor index (VI)	发芽种子鲜重 Germination seed frash weight/g	发芽种子干重 Germination seed dry weight/g	胚根长 Radical length /cm	胚根粗 Radical width /cm
0	61.33 ab	72.67 a	22.41 ab	171.19 a	4.48 a	0.52 c	3.44 a	0.24 a
5	57.33 b	73.33 a	21.66 bc	153.63 a	4.13 a	0.55 bc	3.69 a	0.23 a
10	66.67 a	78.67 a	24.40 a	183.79 a	4.33 a	0.63 ab	3.58 a	0.23 a
15	53.33 bc	74.00 a	21.34 bc	118.59 b	3.24 b	0.61 abc	2.65 b	0.23 a
20	48.67 c	72.67 a	19.84 c	99.61 b	2.93 b	0.68 a	2.08 c	0.23 a
25	20.00 d	65.33 b	13.78 d	41.64 c	1.89 c	0.66 a	0.83 d	0.19 b
30	2.67 e	7.33 c	1.43 e	1.57 d	0.15 d	0.07 d	0.24 e	0.04 c

表 2 PEG 胁迫对萌动苦豆子种子子叶生理特性的响应
Table 2 Responses of physiological activity to PEG stress in cotyledon of *S. alopecuroides* germinating seed

PEG 质量分数 PEG concentration /%	PMP /%	Pro /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	MDA /($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	CAT /($\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	SOD /($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	POD /($\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)
0	0.79 bc	1.16 b	5.06 d	230.08 ab	27.21 cd	65.10 b
5	0.80 c	1.16 b	7.37 a	208.49 ab	6.86 d	111.98 b
10	0.84 ab	1.33 b	6.27 c	196.91 b	5.18 d	109.38 b
15	0.84 ab	1.18 b	6.19 c	214.76 ab	52.69 bc	161.46 a
20	0.84 ab	1.21 b	6.62 b	220.70 ab	65.02 ab	103.52 ab
25	0.86 ab	1.59 a	6.23 c	313.28 a	70.82 ab	62.50 b
30	0.89 a	1.74 a	5.91 cd	319.21 a	89.74 a	36.46 b

2.3 PEG 胁迫对萌动苦豆子子叶氧化苦参碱含量的影响

干旱胁迫使萌动苦豆子子叶中 OMA 含量发生变化。在 15% PEG 胁迫下,子叶中 OMA 含量降到

最低,与 CK 差异显著($P \leq 0.05$),但 20% 的 PEG 胁迫却使 OMA 含量上升,且是各实验组中最大,虽略低于 CK,但与其无显著差异;在 PEG 重度胁迫下,OMA 的含量明显下降(图 1)。

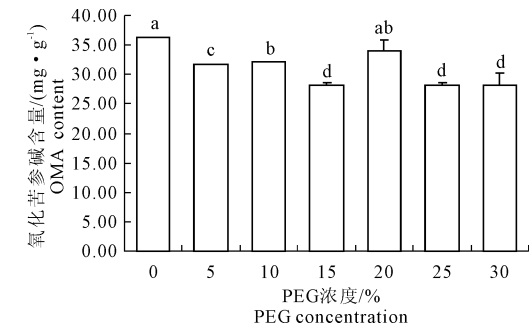


图 1 PEG 胁迫萌动苦豆子种子后子叶中氧化苦参碱含量的变化

Fig.1 The content of oxymatine under PEG stress in cotyledon of *S. alopecuroides* germinating seeds

2.4 萌动苦豆子子叶生理活性与氧化苦参碱含量的关系

研究显示萌动苦豆子种子经 PEG 胁迫后,其子叶中质膜透性与 Pro 含量、SOD 酶活性显著正相关,Pro 含量与 CAT 活性极显著正相关,SOD、POD 活性与 CAT 活性显著正相关;OMA 含量与膜透性、Pro 和 MDA 含量、SOD、POD 和 CAT 活性间都存在负相关

表 3 PEG 胁迫下萌动苦豆子子叶各生理指标和 OMA 含量的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of physiological activity and OMA content in cotyledon of *S. alopecuroides* germinating seed

	PMP	Pro	MDA	SOD	POD	CAT	OMA
PMP	1	0.860*	-0.210	0.771*	-0.331	0.698	-0.702
Pro		1	-0.170	0.670	-0.704	0.901**	-0.547
MDA			1	-0.226	0.428	-0.272	-0.365
SOD				1	-0.423	0.792*	-0.404
POD					1	0.764*	-0.168
CAT						1	-0.421
OMA							1

注 (Note): *, $P\leq0.05$; **, $P\leq0.01$ 。

CAT、SOD 和 POD 等是细胞抵御活性氧伤害的重要保护酶,在清除超氧自由基、过氧化氢和过氧化物以及阻止或减少自由基产生等方面起着重要作用^[19]。但这三种保护酶对干旱胁迫反应的灵敏程度不同,因而对逆境下苦豆子的保护作用也有所不同。轻度胁迫下,CAT 和 SOD 保护酶基本不起作用,其酶活性不但不增加反而略有下降,但 POD 保护酶对中、轻度干旱胁迫反应迅速,酶活性是 CK 的 1.6~2.5 倍。研究认为萌动苦豆子种子在受到中、轻度干旱胁迫时 POD 保护酶起主要作用,在受到重度干旱胁迫时 CAT 和 SOD 保护酶则起主要作用。

相关分析显示与抗旱相关的各项生理指标间表现出显著或极显著正相关,但各指标与 OMA 含量均表现为负相关,说明这些生理指标在苦豆子种子萌

关系,但差异不显著(表 3)。

3 讨论

苦豆子种子在 10% PEG 溶液中,其发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数等都达到最高,说明适度的干旱对苦豆子种子萌发具有较好的引发作用,苦豆子在 20% PEG 的胁迫下,依然具有较高的萌发能力,说明苦豆子种子在萌发过程中对干旱有一定的耐受性。

本研究中萌动苦豆子在 5% PEG 的轻度胁迫下,子叶中 MDA 含量达到最大,说明萌动的苦豆子种子对干旱胁迫较为敏感,但对更高程度的干旱胁迫却能够迅速做出响应,因而伴随胁迫的加剧,MDA 含量不是升高,反而有所下降,即使是在重度胁迫下,其含量也没有超过 5% PEG 胁迫;此外,PEG 胁迫后,子叶中 PMP 有所增高,除 30% PEG 胁迫外,各胁迫处理的 PMP 和对照无显著差异,这些研究均显示苦豆子对干旱有极强的防御机制,使其对细胞膜的伤害降到最低,这一点在保护性物质 Pro 随胁迫程度增加含量上升也得到印证。

发过程中能够协同抵御干旱胁迫,同时苦豆子种子在萌发过程中较高的抗旱性是以减少次生代谢产物积累为代价的;PEG 胁迫使子叶中 OMA 含量下降,可能与干旱促使种子在萌动过程中加速消耗其部分生物碱以减少对其生长影响有关,因此,为使苦豆子种子获得较高产量的 OMA,在人工栽培条件下,在种子成熟期应给予适当的水分补充。

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(第四十卷)[M].北京:科学出版社,1998,40:80-81.
[2] 李爱华,孙兆军.苦豆子资源开发现状及前景初探[J].宁夏大学学报,2000,21(4):354-356.
[3] 江苏新医学院.中药大辞典[M].上海:上海科技出版社,1997.

束作用,但作物可用水资源量减少的诱发因子除降水外,还可能与温度升高等因素有关。因此,如何剔除掉温度等因子的影响仍需要进一步讨论。

区域粮食生产适应度的高低,受本底资源、气候条件 and 生产投入等诸多因素的影响,如农作物本身抗旱能力的增强、农户有效的田间抗旱耕作,以及基础水利设施建设等。针对该区域农业粮食生产气候适应度变化的驱动因子有待深入研究。

致谢:感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院研究生杨帅、赵凡在野外调查中为本论文付出的辛勤工作。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国应对气候变化的政策与行动 [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/zhxx/hjyw/200810/t20081030-130641.htm>, 2008-10-30/2012-11-20.

[2] IPCC. IPCC Third Assessment Report (AR3) [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[3] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report (AR4) [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[4] 王长科. WMO 强调适应气候变化的重要性[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 191.

[5] 居 焯, 李玉娥, 许吟隆, 等. 气候变化适应行动实施框架[J]. 气象与环境学报, 2010, 6(6): 55-59.

[6] 居 焯, 韩 雪. 气候变化适应行动进展及对我国行动策略的若干思考[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 257-260.

[7] UNISDR. Drought Risk Reduction Framework and Practices: Contributing to the Implementation of the Hyogo Framework for Action [R]. United Nations secretariat of International Strategy for Disaster

Reduction, Geneva, Switzerland, 2009.

[8] AMCDR: Disaster Risk Reduction for Climate Change Adaptation [R]. Converge, 2010.

[9] 刘明亮. 我国近期粮食生产的波动性及其与农业自然灾害发生状况的相关分析[J]. 灾害学, 2000, 15(4): 78-86.

[10] 王静爱, 史培军. 论内蒙古农牧交错地带土地资源利用及区域发展战略[J]. 地域研究与开发, 1988, 7(1): 24-29.

[11] 史培军. 中国北方农牧交错地带的降水变化与“波动农牧业”[J]. 干旱区资源与环境, 1989, 3(3): 3-9.

[12] 侯向阳, 韩 颖, 内蒙古典型地区牧户气候变化感知与适应的实证研究[J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1753-1765.

[13] 孙 芳. 农业适应气候变化能力研究—种植结构与技术方向 [D]. 北京: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 2008.

[14] 尹 君, 苏 筠. 农谚在河南冬小麦种植及气候适应中的应用 [J]. 地域研究与开发, 2011, 30(4): 153-158.

[15] 张建松, 王静爱, 李 睿, 等. 农牧交错带农业旱灾适应模式与区域可持续发展—以内蒙古兴和县为例[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 91-96.

[16] 汪青春, 张国胜, 李 琳, 等. 干旱气候生态因素对青海省粮食产量影响的研究[J]. 干旱区农业研究, 1999, 17(4): 80-85.

[17] 侯乐锋, 史培军. 近百年来季风区雨带的动态变化与其预测 [J]. 干旱区资源与环境, 1992, 6(3): 18-27.

[18] 王光宇. 安徽省农业气象灾害粮食损失率评估[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(3): 330-332.

[19] 苏 筠. 内蒙古乌兰察布盟农业土地利用变化对粮食稳产的影响分析[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 99-103.

[20] 郑景云. 自然灾害粮食损失的评估模型及粮食灾损量的估计 [J]. 中国农业气象, 1994, 15(6): 7-10.

[21] 王馥棠. 我国粮食产量气象预测预报研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1989.

(上接第 168 页)

[4] 周福生, 穆 青. 野生植物苦豆子的化学成分和主要药理作用 [J]. 中国野生植物资源, 2006, 25(4): 1-3.

[5] Shao H M, Yang B W, Hu R R, et al. Matrine effectively inhibits the proliferation of breast cancer cells through a mechanism related to the NF- κ B signaling pathway[J]. Oncology Letters, 2013, 6(2): 517-520.

[6] Li J Q, Li C Q, Zeng M D, et al. Preliminary study on therapeutic effect of oxymatrine in treating patients with chronic hepatitis C[J]. Chinese Journal of Integrated Traditional and Western Medicine, 1998, 18(4): 227-229.

[7] Wei J H, Zhu Y, Xu G, et al. Oxymatrine extracted from *Sophora flavescens* inhibited cell growth and induced apoptosis in human osteosarcoma MG-63 cells in vitro[J]. Cell Biochemistry and Biophysics, 2014, 70(2): 1439-1444.

[8] 高晓原, 贝鑫临, 雷 茜, 等. 宁夏苦豆子资源基本情况及综合开发现状[J]. 中国野生植物资源, 2009, 28(2): 17-20.

[9] Michelen V A, Boyer J S. Complete turgor maintenance at low water potentials in the elongating regions of maize leaves[J]. Plant Physiology, 1982, 69: 1145-1149.

[10] Neumann P M. The role of cell wall adjustment in plant resistance to water deficits[J]. Crop Science, 1995, 35(5): 1258-1266.

[11] 鲁 松. 干旱胁迫对植物生长及其生理的影响[J]. 江苏林业科技, 2012, 39(4): 51-54.

[12] 章炳醒, 姚丽萍, 周志强. 干旱胁迫对黄檗幼苗生理及叶片中小檗碱含量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3): 26-30.

[13] 王 进, 罗光宏, 颜 霞, 等. 干旱胁迫对苦豆子种子吸胀萌发和幼苗生长的影响[J]. 中草药, 2011, 42(9): 1807-1811.

[14] 段启荣, 刘 丹, 王 雪, 等. PEG 渗透胁迫对苦豆子幼苗生理的影响[J]. 农业科学研究, 2015, 36(1): 20-24.

[15] 阳 翠, 杨 飞, 刘 萍, 等. 苦豆子种质资源调查及种子生物学特性研究[J]. 中国中药杂志, 2010, 35(7): 817-820.

[16] 胡 晋. 种子生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 154-158.

[17] 邹 琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 159-174.

[18] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-165.

[19] Bowler C, Montagu M V, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 43: 83-116.