

模拟酸雨胁迫下钙离子对 高羊茅种子发芽的影响

常青山¹, 张利霞², 万涛³, 王庆亚⁴, 王瑞⁵

(1. 河南科技大学林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003;
3. 景德镇高等专科学校生化系, 江西 景德镇 333000; 4. 南京农业大学生命科学学院, 江苏 南京 210095;
5. 南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095)

摘要:以高羊茅(*Festuca arundinacea*)为材料, 采用不同浓度 CaCl_2 溶液对高羊茅进行浸种处理, 测定模拟酸雨胁迫下高羊茅种子发芽和生长的影响, 旨在寻找高羊茅发芽阶段抗酸雨胁迫的最佳浸种浓度。结果表明, 随着钙溶液处理浓度的升高, 模拟酸雨胁迫下高羊茅种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、苗高、根长、鲜质量均呈先增加后下降的趋势, 幼苗的电导率则呈先下降后上升的趋势。主成分分析与隶属函数综合分析表明, 钙溶液浸种对模拟酸雨胁迫下高羊茅种子发芽能力影响效果由大到小依次为 50、25、10、100、5、0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 以 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钙溶液浸种处理对提高高羊茅种子发芽阶段抗酸雨胁迫的效果最佳。

关键词:高羊茅; 氯化钙溶液; 主成分分析

中图分类号:S543⁺.903.4; Q945.3

文献标识码:A

文章编号:1001-0629(2012)12-1903-07

* 1

酸雨是当今世界面临的重大环境污染因素之一^[1]。中国是目前世界上继欧洲和北美之后出现的第三大酸雨覆盖区域, 境内受污染的地区约占国土总面积的 40%。酸雨成为目前中国面临的极其严峻的环境污染问题之一^[2-3]。酸雨能使人类赖以生存的生态环境发生重大改变, 使土壤酸化、盐基离子流失, 导致作物根系发育严重受阻、活力显著下降, 并影响其对营养物质的吸收与利用, 从而直接或间接地对作物的生长及产量产生不良影响^[2,4-5]。一般来说, 植物种子在萌发与幼苗阶段极易受到酸雨胁迫的不良影响^[6-7]。因此, 许多缓解酸雨胁迫的相关研究均在植物种子萌发与幼苗期展开^[8-9]。大量研究表明, 外源钙处理可以降低细胞膜透性、稳定细胞膜、提高抗氧化酶活性、减轻胁迫造成的氧化伤害^[10-11], 可以缓解重金属胁迫^[12]、盐胁迫^[13-14]、酸雨胁迫等各种胁迫伤害^[8]。

然而, 外源钙对不同胁迫缓解作用的研究多集中在农作物^[12,15]与经济作物上^[16-17], 在草坪草中研究相对较少。随着长江中下游地区城市化进程的加快, 人们对城市园林绿化与生态环境的改善有了越

来越高的追求, 而酸雨却成为影响城市绿化, 特别是影响草坪绿化的一个重要因素^[18]。因此, 研究草坪草及其相关生态技术, 有效缓解酸雨胁迫带来的伤害, 对酸雨地区城市生态环境保护与防治具有重要意义。高羊茅(*Festuca arundinacea*)作为一种绿期较长的冷季型草坪草, 广泛用于城市园林绿化、运动场草坪的建植和公路护坡等生态建设工程中, 在长江中下游地区城市绿化中也有着大面积的应用^[19]。本研究以高羊茅种子为材料, 研究不同浓度 CaCl_2 溶液浸种对模拟酸雨胁迫下高羊茅种子萌发特性的影响, 以期对长江中下游酸雨地区高羊茅草坪建植提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 材料 高羊茅种子购自江苏省农业科学研究院, 从美国进口, 室内袋装贮藏, 品种为金质克拉多。

1.2 模拟酸雨的配制 根据江苏省实测降水中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的摩尔浓度之比 (约 5 : 1)^[20], 参照曹春信等^[21]的方法制备模拟酸雨: 配制 0.25 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 和 0.05 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HNO_3 溶液, 按等体积比配制模拟酸雨的酸母液; 配制浓度高于

* 收稿日期: 2012-03-16 接受日期: 2012-05-07

基金项目: 河南科技大学博士科研启动基金项目 (09001690, 09001697)

作者简介: 常青山 (1979-), 男, 河南安阳人, 讲师, 博士, 从事园林植物与草坪学研究。E-mail: mehero2010@126.com

通信作者: 张利霞 E-mail: zhanglixia210@163.com

天然酸雨成分 1 000 倍的电解质母液, 含 $3.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 、 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}$ 、 $0.91 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 和 $0.75 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 。然后将电解质母液稀释 1 000 倍后, 用酸母液调节模拟酸雨的 pH 值为 2.5。

1.3 方法 利用 RXZ-300D 人工智能气候箱(宁波江南仪器制造厂)进行种子发芽试验。培养条件: 温度 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$, 每天光照 12 h, 相对湿度 80%。准确称取无水 CaCl_2 , 以去离子水配制成 0 (以无 CaCl_2 的去离子水作对照)、5、10、25、50、100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液。选取籽粒饱满、大小基本一致的高羊茅种子, 用 0.5% 的双氧水溶液消毒 30 min, 再经去离子水漂洗 3 次并用吸水纸吸干表面水分, 然后在上述配好的各种浓度 CaCl_2 溶液及去离子水(对照)中浸泡 24 h 后, 用去离子水漂洗种子 3 次, 吸水纸吸干种子表面的水分。将浸种处理过的种子放入预先铺上 2 层滤纸的培养皿中, 每皿 50 粒, 4 个重复, 保持间距尽量一致。每个培养皿加入 15 mL pH 值 2.5 的模拟酸雨溶液进行胁迫试验。每 2 d 换一次模拟酸雨溶液, 每天打开 2 次, 与外界换气 5 min, 每 24 h 观察记录发芽情况; 最后一天记录最终发芽数及幼苗鲜质量、苗高与根长。本试验采用国家标准^[22]规定的高羊茅末次计数时间(第 14 天), 从第 1 天开始每天统计发芽的种子数, 14 d 后计算以下相关指标^[23-24]:

1) 发芽率(GR) = $(n/N) \times 100\%$ (n 为最终达到的正常发芽粒数, N 为供试种子数);

2) 发芽势(GP) = $(n_5/N) \times 100\%$ (n_5 为种子发芽第 5 天的正常发芽粒数, N 为供试种子数);

3) 发芽指数(GI) = $\sum (G_t/D_t)$ (G_t 为在 t 天的发芽数, D_t 为相应的发芽天数);

4) 活力指数 = $GI \times S$ (GI 为发芽指数, S 为单株鲜质量);

5) 鲜质量、苗高和根长: 随机抽取 10 株, 计算高羊茅幼苗鲜质量单株平均值, 以及苗高与根长单株平均值。

1.4 质膜透性测定与计算 测量发芽第 14 天的正常幼苗电导率, 并以相对电导率来反映幼苗的膜透性^[25]。参考韩永华等^[26]的方法测定幼苗电导率: 从对照及不同处理中分别称取生长一致的鲜苗 0.1 g, 剪成长度为 0.5 cm 的小段, 3 个重复。用去离子水充分冲洗干净后, 用吸水纸吸干水分, 置于 20 mL 试管中, 并加 10 mL 去离子水, 摇匀、密封, 室温放

置 24 h, 用 DDB-6200 型数字电导仪测定电导率 E_1 ; 然后置沸水浴中煮 30 min, 冷却后测定电导率 E_2 ; 同时测定其背景电导值 E_0 。按下式计算电导率(P):

$$P = (E_1 - E_0) / (E_2 - E_0) \times 100\%.$$

1.5 统计分析 数据采用 SPSS 13.0 进行方差分析与多重比较(Duncan 新复极差法), 然后采用 Origin 8.0 作图。不同 CaCl_2 处理对酸雨胁迫下高羊茅种子发芽的影响采用主成分分析与隶属函数法进行评价^[27]。

隶属函数值计算公式:

$$R(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

反隶属函数值计算公式:

$$R(X_j) = 1 - \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中, X_j 为第 j 个综合指标, $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别为第 j 个综合指标的最小值和最大值。若所测指标与抗性指标正相关则采用公式(1), 反之采用公式(2)。最后用各指标的隶属函数值乘以相应的权重系数(权重系数为负值时取绝对值)来计算综合评定值。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨胁迫下高羊茅种子的发芽率和发芽势 在模拟酸雨胁迫条件下, 经过 CaCl_2 浸种的高羊茅种子的发芽率与发芽势呈现先增加后降低的趋势(图 1A、图 1B)。各处理均高于对照, 其中 25~100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 处理与对照差异显著($P < 0.05$)。随着 CaCl_2 溶液浓度的升高, 在 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液浸种处理下高羊茅发芽率与发芽势达到最大, 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液处理开始下降, 但仍高于对照。在 25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液浸种下, 高羊茅的发芽率与发芽势分别比对照增加了 12.41% 和 41.10%; 在 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液浸种下, 高羊茅的发芽率与发芽势分别比对照增加了 21.82% 和 58.40%。

2.2 CaCl_2 溶液浸种对高羊茅种子发芽指数与活力指数的影响 不同浓度的 CaCl_2 处理对模拟酸雨胁迫下的高羊茅种子的发芽指数与活力指数影响明显, 均高于对照; 随着 CaCl_2 溶液浓度的升高, 二者均呈先上升后下降的趋势(图 1C、图 1D)。25 和 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液处理下发芽指数显著高于对照($P < 0.05$), 分别比对照增加了 23.37% 和 31.98%。10~100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液处理

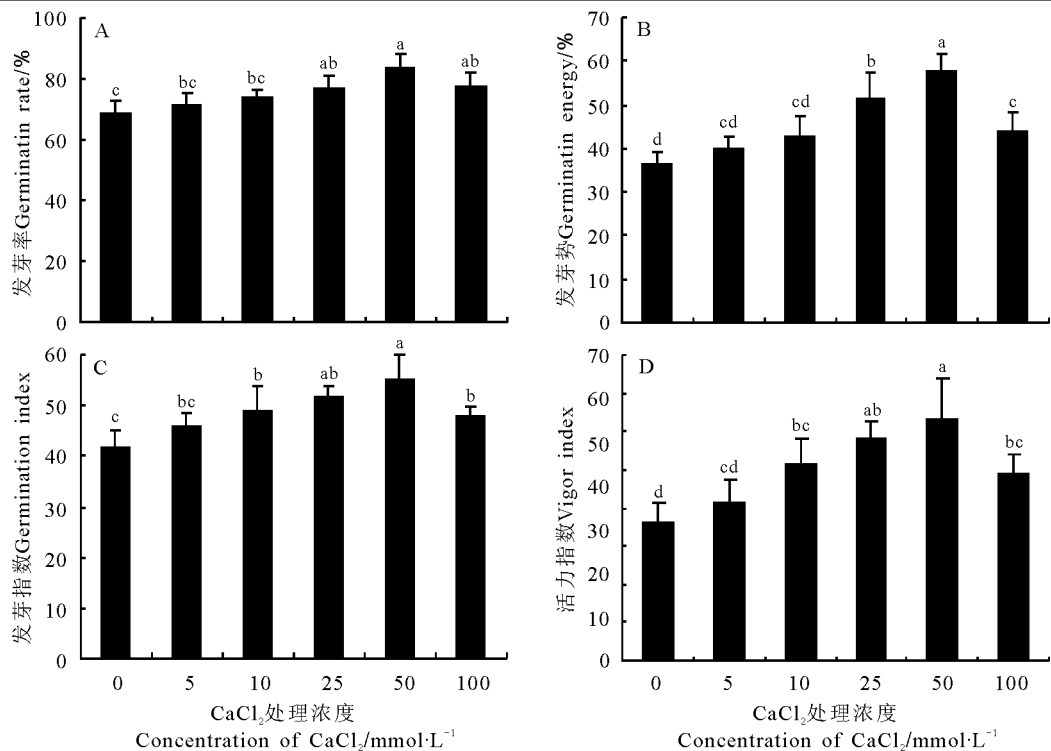


图 1 CaCl_2 溶液浸种对模拟酸雨胁迫下高羊茅种子发芽率(A)、发芽势(B)、发芽指数(C)和活力指数(D)的影响

Fig. 1 Effects of seed soaking in CaCl_2 solution on germination rate (A), germination energy (B), germination index (C) and vigor index (D) of *Festuca arundinacea* seeds under simulated acid rain stress

注:不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lower case letters show significant difference at 0.05 level. The same below.

下的高羊茅种子活力指数均显著高于对照,其中 25 和 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液处理下的活力指数分别比对照提高了 61.86% 和 76.10%。

2.3 CaCl_2 溶液浸种对模拟酸雨胁迫下高羊茅幼苗生长的影响 不同浓度下 CaCl_2 溶液浸种处理对模拟酸雨胁迫下高羊茅种子幼苗苗高的影响明显,均显著高于对照 ($P < 0.05$), 25 和 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理幼苗苗高与对照相比分别增加了 49.08% 和 56.35%, 但二者差异不显著(图 2A、图 2B)。从根长来看,除 5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 外,其他 CaCl_2 浓度处理下的根长均显著高于对照, 25 和 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理的根长与对照相比分别增加了 10.10 和 6.96 倍。从增加的幅度来看, CaCl_2 浸种处理对根长的影响高于对苗高的影响。

各处理下的幼苗鲜质量均高于对照,除 5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理外,其他处理均与对照差异

显著 ($P < 0.05$) (图 2 C)。随着处理浓度的增加,幼苗鲜质量先增加,然后在 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下降低。25 和 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理可以显著提高高羊茅种子在模拟酸雨胁迫下的鲜质量,其鲜质量分别比对照增加了 34.82% 和 37.20%,但这两个处理之间差异不显著。

2.4 不同浓度 CaCl_2 浸种处理对模拟酸雨胁迫下高羊茅幼苗质膜相对透性的影响 不同浓度 CaCl_2 溶液处理下,高羊茅幼苗的电导率均显著低于对照 ($P < 0.05$) (图 2D)。在 5~25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 浓度范围,电导率随 CaCl_2 处理浓度升高而降低,在 25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液处理下,其电导率达到最低值。在 50 和 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理下,高羊茅幼苗的电导率随 CaCl_2 浓度增加而升高,幼苗的细胞膜透性增加。25 和 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 处理的电导率与对照相比分别减少 44.36% 与 32.39%。

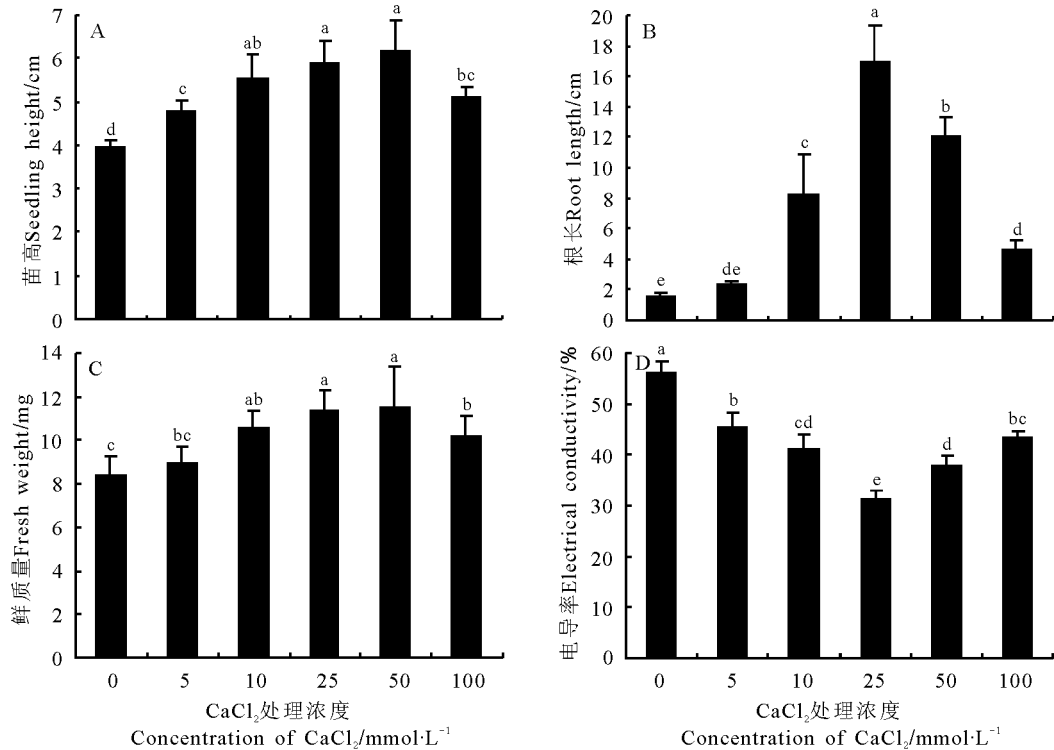


图 2 CaCl_2 溶液浸种对模拟酸雨胁迫下高羊茅幼苗苗高 (A)、根长 (B)、鲜质量 (C) 和电导率 (D) 的影响

Fig. 2 Effects of seed soaking in CaCl_2 solution on seedling height (A), root length (B), fresh weight (C) and electrical conductivity (D) of *Festuca arundinacea* seedlings under simulated acid rain stress

2.5 不同浓度 CaCl_2 浸种处理对模拟酸雨胁迫下高羊茅种子萌发的综合评定 主成分分析表明,第 1 主成分中,发芽率等发芽指标对应的相关系数分别为 0.920、0.959、0.984、0.996、0.983、0.907、0.985 和 -0.913,特征根为 7.319,累积贡献率为 91.49%。根据主成分的累积方差贡献率大于 80%~85% 的原则^[28],选留第 1 主成分。发芽指数、活力指数、苗高在此成分上有较高载荷,说明钙溶液浸种处理对模拟酸雨胁迫下的高羊茅这 3 个指标的影响很大。提取这一主成分基本上可以反映全部指标的信息,因此,应用这一综合变量来代替原来的 8 个变量。通过计算,获得主成分表达式:

$$F_1 = 0.340x_1 + 0.354x_2 + 0.364x_3 + 0.368x_4 + 0.363x_5 + 0.335x_6 + 0.364x_7 - 0.337x_8。$$

式中, x 代表主成分表达式中的主成分变量, x_1 为发芽率, x_2 为发芽势; x_3 为发芽指数, x_4 为活力指数, x_5 为苗高, x_6 为根长, x_7 为鲜质量, x_8 为电导率。

根据主成分表达式各指标权重值的大小可以看出各指标在钙浸种对模拟酸雨胁迫下种子发芽特性

影响大小的重要性,由大到小依次为发芽指数、活力指数、苗质量、鲜质量、发芽势、根长、发芽率、电导率。根据主成分表达式计算出各钙溶液浸种处理的得分,5 种浓度 CaCl_2 溶液浸种处理影响耐酸雨胁迫的能力由强到弱依次为 50、25、10、100、5、0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1)。

表 1 CaCl_2 浸种对模拟酸雨胁迫下高羊茅种子发芽特性的影响能力得分

Table 1 The scores of effects of seed soaking in CaCl_2 solution on germination characteristics of *Festuca arundinacea* seeds under simulated acid rain stress

CaCl ₂ 浓度 CaCl ₂ concentration/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	得分 Score	排序 Order
0	-3.814	6
5	-2.022	5
10	0.211	3
25	2.570	2
50	3.353	1
100	-0.298	4

为避免单一指标的片面性并克服多个指标的复杂性,全面而准确地评价 CaCl_2 溶液浸种处理对高羊茅种子发芽特性及幼苗生长状况的影响,本研究采用隶属函数法对不同浓度 CaCl_2 溶液浸种处理对模拟酸雨胁迫的影响进行评定,确定不同 CaCl_2 溶液浸种处理对模拟酸雨胁迫的影响大小。依据各指标的隶属函数值,结合主成分分析中各指标的权重

值进行综合评定,综合评定值越大,表明钙溶液浸种对高羊茅在模拟酸雨胁迫下发芽能力的提高作用愈明显。由表 2 可知,5 种钙溶液浸种处理对酸雨胁迫下高羊茅种子发芽能力的影响由强到弱的顺序依次为 50、25、10、100、5、0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。两种方法分析结果的一致性说明了本研究结果科学可靠。

表 2 CaCl_2 浸种对模拟酸雨胁迫下的高羊茅发芽各指标影响的隶属函数分析

Table 2 Subordinate function analysis of effects of seed soaking in CaCl ₂ solution on indices of seeds germination of <i>Festuca arundinacea</i> under simulated acid rain stress										
CaCl ₂ 浓度	隶属函数值 Subjection value								综合评定	排名
CaCl ₂ concentration/ mmol • L ⁻¹	发芽率	发芽势	发芽指数	活力指数	苗高	根长	鲜质量	电导率	Comprehensive evaluation value	Order
	rate	energy	index	index	height	length	weight	conductivity		
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6
5	0.143	0.143	0.312	0.185	0.372	0.049	0.169	0.440	0.645	5
10	0.357	0.286	0.528	0.556	0.704	0.439	0.687	0.600	1.477	3
25	0.571	0.714	0.731	0.815	0.870	1.000	0.936	1.000	2.346	2
50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.689	1.000	0.720	2.627	1
100	0.571	0.333	0.462	0.481	0.507	0.199	0.569	0.520	1.289	4

3 讨论

3.1 钙溶液浸种处理可以提高对模拟酸雨胁迫下的高羊茅种子发芽的数量与品质 钙是植物的必需元素之一,在细胞伸长、分裂以及细胞膜构成、渗透性等方面具有重要作用,已有大量研究证明其可以有效提高种子的活力^[10,17,29]。与对照相比,适宜的钙溶液浸种不仅显著提高种子的发芽势、活力指数及幼苗的苗高、根长、鲜质量,而且降低了幼苗的电导率,说明钙溶液浸种在提高种子发芽率的同时,种子的品质与活力也得以大幅度提高,这与前人的相关研究结果一致^[8,30]。钙溶液浸种可以提高模拟酸雨胁迫下高羊茅种子的发芽能力,一方面在于钙溶液可以缓解模拟酸雨本身的酸度^[31],另一方面在于钙可以激活 H^+ -ATP 酶增强植物对细胞质 pH 值的调节,同时激活部分保护酶活性,从而减轻模拟酸雨胁迫对细胞膜结构的破坏,增强细胞抗酸胁迫的能力^[16,32-34]。

3.2 钙溶液浸种处理对模拟酸雨胁迫下高羊茅种子的发芽特性相关指标的影响作用不同 钙处理对模拟酸雨胁迫下高羊茅发芽的各指标

中的幼苗根长影响作用最大,50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液浸种处理的根长是对照的 7.96 倍,其次为活力指数,50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液浸种处理的活力指数比对照提高 76.10%,该处理下的发芽势与苗高分别比对照提高 58.40%和 56.35%,仅对发芽率的影响在各指标中最小,比对照提高 21.82%。模拟酸雨胁迫显著抑制草坪草根系的生长,对根长的影响要显著大于对幼苗苗高的影响^[35],而钙溶液浸种处理则可显著减少模拟酸雨胁迫对幼苗苗高与根长的影响,对根长的影响作用显著大于对幼苗苗高的影响作用。原因可能在于随着钙对模拟酸雨胁迫的缓解,幼苗胚根所受胁迫减轻,高羊茅种子的胚根生长速度快于胚芽,因而钙处理表现对高羊茅根长的影响较大。在钙处理对盐胁迫下的高羊茅种子萌发影响的研究中,高浓度钙处理对高羊茅种子萌发产生伤害,其处理效果甚至低于对照^[30]。而在本研究中,高浓度处理虽然效果较差,但仍高于对照,原因可能在于钙处理对酸雨胁迫的缓解效果好于对盐胁迫的缓解效果。

3.3 模拟酸雨胁迫下高羊茅种子发芽随钙处理浓度增大具有先促进后抑制的特点 钙能

参与膜结构的保持与修复,稳定膜脂及膜蛋白的结构,维持植物细胞内离子的平衡,保持细胞结构与功能的完整,使植物维持正常的生理活动^[15,17]。添加适量的钙,可以维持钙信号系统的正常发生与传递,加强质膜的稳定性,并进一步维持细胞内离子的平衡。从本研究结果也可以看出,适宜浓度的钙溶液浸种有效降低幼苗的电导率,减少植物体内细胞膜的损伤。而在 50 和 100 mmol · L⁻¹ CaCl₂ 处理下电导率则开始升高,相对增加了膜透性,原因可能在于较高浓度的钙处理可能超过植物的吸收能力使植物造成渗透胁迫,导致细胞内的离子平衡被打破,形成类似盐害的破坏作用从而增加膜透性^[30]。

综合分析认为,钙溶液浸种可有效提高模拟酸雨胁迫下高羊茅种子的发芽能力,随着 CaCl₂ 处理浓度的增加,高羊茅在模拟酸雨胁迫下种子发芽能力逐渐提高,但超过一定浓度后反而使高羊茅种子的发芽能力降低。其中以 50 mmol · L⁻¹ CaCl₂ 处理对模拟酸雨胁迫下的高羊茅种子发芽作用最好,本研究对于长江中下游酸雨地区高羊茅草坪建植具有一定的指导意义,至于应用于其他草坪草种是否有明显的缓解效果则有待于进一步验证。

参考文献

- [1] Menz F C, Seip H M. Acid rain in Europe and the United States: an update[J]. Environmental Science & Policy, 2004, 7(4): 253-265.
- [2] 赵艳霞, 侯青. 1993—2006 年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 1032-1042.
- [3] 赵栋, 潘远智, 邓仕槐, 等. 模拟酸雨对茶梅生理生态特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3191-3198.
- [4] 周琴, 张佩, 曹春信, 等. 外源抗坏血酸对酸雨胁迫油菜幼苗的缓解效应[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1437-1442.
- [5] 童贯和, 程滨, 胡云虎. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗生物量和某些生理活动的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(9): 1207-1214.
- [6] 周青, 曾庆玲, 黄晓华, 等. 三类抗性种子萌发对酸雨胁迫响应[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 2029-2036.
- [7] 赵春旭, 刘芳芳, 赵韦, 等. 水杨酸浸种对高羊茅在干旱胁迫下萌发的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(11): 1945-1949.
- [8] 向仰州, 刘方. 酸水浸泡下钙盐溶液浸种的白三叶‘海法’种子萌发特性初探[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(4): 735-737.
- [9] 边才苗, 王锦文. 镧对西葫芦幼苗模拟酸雨胁迫的缓解效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 1030-1034.
- [10] Lin S Z, Zhang Z Y, Lin Y Z, et al. The role of calcium and calmodulin in freezing-induced freezing resistance of *Populus tomentosa* cuttings[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2004, 30(1): 59-68.
- [11] Xiong L M, Schumaker K S, Zhu J K. Cell signaling during cold, drought, and salt stress[J]. Plant Cell, 2002, 14: 165-183.
- [12] 陈金峰, 胡斌杰, 韩艳霞, 等. 钙对铜胁迫下大豆种子的解毒作用[J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 1072-1075.
- [13] Tattini M, Traversi M L. On the mechanism of salt tolerance in olive (*Olea europaea* L.) under low- or high-Ca²⁺ supply[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65(1): 72-81.
- [14] 张振兴, 孙锦, 郭世荣, 等. 钙对盐胁迫下西瓜光合特性和果实品质的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(10): 1929-1938.
- [15] 郑青松, 刘海燕, 隆小华, 等. 盐胁迫对油菜幼苗离子吸收和分配的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(1): 65-70.
- [16] 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 模拟酸雨胁迫下钙对龙眼光合功能的调节作用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1072-1076.
- [17] 薛延丰, 刘兆普. 钙离子对盐胁迫下菊芋幼苗的生长、生理反应[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 44-47.
- [18] 方志伟. 南平市园林绿化植物抗酸雨能力的研究[J]. 福建林学院学报, 2003, 23(1): 9-13.
- [19] 孙彦, 张芸芸. 5 种冷季型草坪草的耐热性研究[J]. 草业科学, 2011, 28(11): 1909-1914.
- [20] 范元中. 江苏省酸雨污染十五年趋势分析[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(21): 53-54.
- [21] 曹春信, 周琴, 韩亮亮, 等. 模拟酸雨对油菜花期生理特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2057-2062.
- [22] 王彦荣, 孙建华, 余玲, 等. GB/T 2930. 1—2930. 11—2001 牧草种子检验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 31-48.
- [23] 张震, 徐丽, 马艳婷, 等. 喜旱莲子草组织水浸液对黑麦草种子和幼苗的化感效应[J]. 西北植物学报, 2009, 29(1): 148-153.
- [24] 陈忠林, 张学勇, 张绵, 等. 碱胁迫对结缕草、高羊茅种子萌发及其胚生长的影响[J]. 种子, 2010(12):

- 27-30.
- [25] Silva I R, Smyth T J, Raper C D, *et al.* Differential aluminum tolerance in soybean: an evaluation of the role of organic acids[J]. *Physiologia Plantarum*, 2001, 112(2): 200-210.
- [26] 韩永华, 郑易之, 李甜, 等. 高温/渗透双重胁迫对大豆某些生理反应具累加效应的初报[J]. *大豆科学*, 2001, 20(1): 41-44.
- [27] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 等. 紫花苜蓿抗旱性主成分及隶属函数分析[J]. *草地学报*, 2006, 14(2): 142-146.
- [28] 朱仁海, 杨琪瑜, 沈文瑛. 统计分析方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 266-283.
- [29] 韦慧彦, 郭振清, 崔素娟. 钙不依赖性钙调素结合蛋白的研究进展[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2007, 34(2): 124-131.
- [30] 朱义, 何池全, 杜玮, 等. 盐胁迫下外源钙对高羊茅种子萌发和幼苗离子分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 133-137.
- [31] 廖柏寒, 蒋青. 我国酸雨中盐基离子的重要性[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(4): 254-256.
- [32] Kinoshita T, Nishimura M, Shimazaki K. Cytosolic concentration of Ca^{2+} regulates the plasma membrane H^{+} -ATPase in guard cells of fava bean[J]. *Plant Cell*, 1995, 7: 1333-1342.
- [33] Gerendás J, Schurr U. Physiochemical aspects of ion relations and pH regulation in plants-A quantitative approach[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50: 1101-1114.
- [34] Giraldez-Ruiz N, Bonilla I, Fernandez-Pinas F. Role of external calcium in homeostasis of intracellular pH in the cyanobacterium *Anabaena* sp. strain PCC7120 exposed to low pH[J]. *New Phytologist*, 1999, 141: 225-230.
- [35] 田如男, 张培东, 程澄. 模拟酸雨胁迫对 4 种草坪草种子萌发的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(5): 5-10.

Effects of Ca^{2+} on germination characteristics of *Festuca arundinacea* seeds under simulated acid rain stress

CHANG Qing-shan¹, ZHANG Li-xia², WAN Tao³, WANG Qing-ya⁴, WANG Rui⁵

(1. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

3. Department of Biology and Chemistry, Jingdezhen Comprehensive College, Jingdezhen 333000, China;

4. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

5. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to find the optimum CaCl_2 concentration and study effects of CaCl_2 on seed germination characteristics under simulated acid rain stress, *Festuca arundinacea* seeds were treated with different concentration CaCl_2 solutions and the related germination indexes were measured after seed soaking. The results indicated that seed germination percentage, germination energy, germination index, vigor index, seedling height, root length and seedling fresh weight increased firstly, and then declined with increasing CaCl_2 concentrations continually, while electrical conductivity of seedlings was opposite, declined firstly and then increased. The results obtained from the comprehensive evaluation of principal component and subordinate function analysis showed that the order (from strong to weak) of effects promoted by Ca^{2+} was 50, 25, 10, 100, 5 and 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. The 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 solution soaking seeds was the best for *F. arundinacea* to improve the resistance to acid rain at the germination phase.

Key words: *Festuca arundinacea*; CaCl_2 solution; principal components analysis