

9 个高羊茅品种种子萌发和幼苗生长 对锌胁迫的响应*

张远兵¹ 刘爱荣² 董建国² 崔丙香²

(1. 安徽科技学院城建与环境学院 凤阳 233100; 2. 安徽科技学院生命科学学院 凤阳 233100)

摘 要 采用液培试验,研究了不同浓度 Zn^{2+} (0、75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫对 9 个高羊茅品种种子发芽势、发芽率、幼苗根长、苗高、鲜重、叶绿素含量、丙二醛含量、细胞质膜透性的影响。结果表明,随 Zn^{2+} 浓度增加,供试品种中“爱瑞 3 号”的发芽势和“火凤凰”幼苗的鲜重呈先上升后下降趋势,其他品种两指标均呈下降趋势;“红象”、“金娜多”、“宇宙星”、“火凤凰”、“爱瑞 3 号”等品种种子的发芽率呈先上升后下降的变化趋势,其他 4 个品种呈下降趋势;9 个品种的幼苗根长、苗高、叶绿素含量均呈下降趋势,丙二醛含量和细胞质膜透性均呈上升趋势。采用 Delphi 法对 8 项指标进行综合分析显示,75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn^{2+} 胁迫下,耐锌性顺序为“火凤凰”>“红象”>“缤狗”、“家园”>“宇宙星”、“里园 2 号”>“麦哲伦”>“金娜多”>“爱瑞 3 号”;150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn^{2+} 胁迫下,耐锌性顺序为“火凤凰”、“里园 2 号”>“缤狗”>“金娜多”>“爱瑞 3 号”>“宇宙星”>“红象”>“麦哲伦”>“家园”。因此,在治理 Zn^{2+} 污染时,要根据污染程度,合理选用高羊茅品种。

关键词 Zn 胁迫 高羊茅 种子萌发 幼苗生长 幼苗生理 耐锌性 Delphi 法

中图分类号: S688.4 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2010)02-0371-06

Response of germination and growth of nine *Festuca arundinacea* Schreb varieties to zinc stress

ZHANG Yuan-Bing¹, LIU Ai-Rong², DONG Jian-Guo², CUI Bing-Xiang²

(1. College of Urban Construction and Environment, Anhui University of Science and Technology, Fengyang 233100, China;

2. College of Life Sciences, Anhui University of Science and Technology, Fengyang 233100, China)

Abstract The effect of different Zn^{2+} concentrations (0, 75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) on seed germination potential, germination rate as well as seedling root length, shoot height, fresh weight, chlorophyll content, malondialdehyde (MDA) content and cell membrane permeability of nine varieties of *F. arundinacea* were studied via a solution culture experiment. With increasing Zn^{2+} concentration, germination potential of “Arid 3” and fresh weight of “Fire phoenix” initially increase followed by a decrease. Those of the other varieties steadily decrease with increasing Zn^{2+} concentration. Germination rate of “Red elephant”, “Coronado gold”, “Ascending star”, “Fire phoenix” and “Arid 3” increases initially before decreasing, whereas that of the other four varieties steadily declines. Root length, shoot height and chlorophyll content of the nine varieties decline, while MDA content and cell membrane permeability rise. Synthetic analysis of eight parameters via Delphi method indicates that at 75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn^{2+} stress, the order of zinc tolerance of the nine varieties is “Fire phoenix” > “Red elephant” > “Bingo” and “Plantation” > “Ascending star” and “Wrangler II” > “Magellan” > “Coronado gold” > “Arid 3”. Under 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn^{2+} stress, zinc tolerance order is “Fire phoenix” and “Wrangler II” > “Bingo” > “Coronado gold” > “Arid 3” > “Ascending star” > “Red elephant” > “Magellan” > “Plantation”. The varieties of *F. arundinacea* should therefore be reasonably selected in environmental management of Zn^{2+} pollution based on pollution degree.

Key words Zn stress, *Festuca arundinacea* Schreb, Seed germination, Seedling growth, Seedling physiology, Zn tolerance, Delphi method

(Received Sept. 28, 2009; accepted Dec. 11, 2009)

* 安徽省科技厅 2007 年度重点科研项目(07020304093)和安徽省教育厅自然科学基金项目(2005KJ325z)资助

张远兵(1966-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事草坪栽培学研究。E-mail: zyb2246@163.com

收稿日期: 2009-09-28 接受日期: 2009-12-11

锌(Zn)是植物生长发育必需的营养元素,若环境缺Zn,植物不能正常生长或生长不良;同时Zn又是有毒重金属之一,当环境中Zn含量过高时,会对植物生长产生毒害效应。锌矿开采、冶炼、镀锌加工等含Zn工业“三废”的不合理排放,使土壤中Zn超常积累^[1]。采用工程措施或化学方法治理土壤重金属Zn污染,不仅成本昂贵,而且会破坏土壤结构及微生物区系,还可能造成“二次污染”。植物提取修复技术作为一种新兴的绿色生物技术,在不破坏土壤生态环境、保持土壤结构和微生物活性的条件下,通过植物根系直接吸收大量重金属,从土壤中带走重金属,从而修复被污染土壤^[2]。这种技术在土壤污染治理方面具有极大潜力,已引起广泛关注。国外已报道Zn超积累植物有18种^[3],主要为十字花科的遏蓝菜属(*Thlaspi*)植物,如Zn超积累植物*Thlaspi caerulescens*,对Zn最高积累量为43 710 mg·kg⁻¹(干重)^[4];国内也有关于Zn超积累植物的报道^[5]。但由于这些超积累植物生物量小、不宜栽培、实用价值不高,限制了作为植物修复的可操作性。因此,开发和利用生长速度快、生物量较大、修复效果好的富集植物是研究热点之一。已有Zn²⁺胁迫对草坪草生长影响的相关报道^[6-14],并发现黑麦草(*Lolium perenne* Linn.)为Zn富集植物^[6,8]。高羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)是禾本科羊茅属多年生草本植物,又称苇状羊茅,为冷季型草种,丛生型,具有生长迅速,生物量较大,再生能力强,适应性广,易于种植,抗性强等特点,且我国绝大部分地区都有栽培。在水土保持、构建生态环境、土壤改良等方面都具有重要作用^[15-17]。袁敏等^[11]的盆栽试验结果表明,高羊毛、早熟禾(*Poa annua* Linn.)、黑麦草能在尾矿污染土壤生长,且Zn在植株地上部的质量分数为高羊毛>黑麦草>早熟禾,地下部则为黑麦草>高羊毛>早熟禾,高羊茅对Zn的转运系数高于黑麦草;Zhao和Duo^[12]也认为高羊茅耐Zn能力较强,对Zn污染具有较高的生态阈值。但有关Zn胁迫对不同品种高羊茅种子萌发和幼苗生长影响至今鲜见报道。因此,本试验以我国广泛栽培的9个高羊茅品种为材料,探究Zn胁迫对这些品种种子萌发和幼苗生长的影响,旨在为高羊茅生长初期耐锌性鉴定和强耐锌高羊茅品种的筛选提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试高羊茅品种

供试9个高羊茅品种种子均由山东农业大学草坪研究所提供。品种分别为“红象”、“金娜多”、“宇宙星”、“火凤凰”、“缤狗”、“麦哲伦”、“里园2号”、

“爱瑞3号”和“家园”。

1.2 高羊茅幼苗培养与Zn²⁺处理

分别将9个品种高羊茅种子用0.1% HgCl₂溶液消毒10 min,先用自来水再用蒸馏水各冲洗3次,蒸馏水浸泡12 h,播于直径11 cm、垫有2张滤纸的培养皿中,每皿150粒。以ZnSO₄·7H₂O为Zn²⁺供体,用蒸馏水配制Zn²⁺浓度分别为0(对照)、75 mg·L⁻¹、150 mg·L⁻¹的处理液,每皿加入10 mL,每处理设5个重复,共135个培养皿。将培养皿置于25 /18 (昼/夜)恒温箱中培养,第7 d从恒温箱中取出培养皿,每皿分别加入用Hoagland营养液配制的相同浓度的Zn²⁺处理液10 mL,再置于RXZ型智能人工气候箱中,温度25 /18 (昼/夜),光强为600 μmol·m⁻²·s⁻¹,光照时间14 h·d⁻¹,以后每天更换处理液,继续培养。

1.3 发芽势、发芽率、根长、苗高、鲜重的测定

参照文献[18],Zn²⁺处理后第3 d测发芽势,发芽势(%)=第3 d已发芽的种子数/供试种子数×100%;Zn²⁺处理后第7 d测定发芽率,发芽率(%)=第7 d已发芽种子数/供试种子数×100%;第20 d从培养皿随机挑取幼苗测量根长、苗高并称量鲜重,每处理重复3次,每重复10株,结果取其平均值。

1.4 生理指标测定

Zn²⁺处理25 d后随机挑取幼苗,按照王学奎的方法^[19]测定叶绿素和丙二醛含量,按照李振国的方法^[20]测定细胞质膜透性。每个指标每处理重复3次,结果取平均值。

1.5 数据统计分析

采用Excel2003对数据进行预处理,用DPS软件进行单因素方差分析,并对平均数做Duncan's新复极差法多重比较。对不同指标的综合分析采用Delphi法^[21],不同品种耐锌性按下式计算:

$$S_j = \sum_{i=1}^{m_j} R_{ji} \quad (1)$$

式中, S_j 为综合耐Zn等级和, R_{ji} 表示第*i*个指标的等级。

2 结果与分析

2.1 Zn²⁺胁迫对高羊茅种子发芽和幼苗生长的影响

由表1可知,Zn²⁺胁迫下,供试9个高羊茅品种中,随Zn²⁺浓度增加,除“爱瑞3号”的发芽势呈先略上升后下降趋势外,其余8个品种的发芽势均呈下降趋势,且Zn²⁺浓度越高下降幅度越大;Zn²⁺胁迫下各品种间发芽势变化幅度不同,下降幅度最大的是“家园”,下降率达20.6%,下降幅度最小的是“爱瑞3号”。随Zn²⁺浓度增加,“缤狗”、“麦哲伦”、“里

园 2 号”、“家园”4 个品种种子发芽率呈下降趋势, 而其余 5 个品种则呈先上升后下降趋势; Zn^{2+} 胁迫下, 9 个品种间发芽率变化幅度差别不大, 只有“红象”下降率达 11.5%, 其余品种的下降低率在 5.0% 以下; Zn^{2+} 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, “宇宙星”、“火凤凰”的发芽率仍略高于对照, 其他 7 个品种均低于对照, 9 个品种的发芽率均在 70% 以上。

表 2 表明, Zn^{2+} 胁迫下供试的 9 个高羊茅品种幼苗根长和苗高均低于相应的对照, 且随 Zn^{2+} 浓度增高, 下降幅度增大; Zn^{2+} 胁迫下不同品种的下降低幅不同, Zn^{2+} 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 根长下降率最小的品种是“里园 2 号”, 最大的是“宇宙星”, 达 82.5%; 苗高下降幅度最小的是“红象”, 为 21.9%, 最大的是“麦哲伦”, 达 38.8%; 相同浓度的 Zn^{2+} 胁迫下, 除“火凤凰”外, 其他 8 个品种根长的下降幅度均大于苗高。 Zn^{2+} 胁迫下, 除“火凤凰”外, 其他 8 个高羊茅品种幼苗鲜重均低于相应的对照, 且随 Zn^{2+} 浓度增加, 下降幅度增大; 而“火凤凰”的鲜重呈先略上升后下降趋势, Zn^{2+} 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

时, 鲜重低于对照。 Zn^{2+} 胁迫下 9 个品种间鲜重下降幅度不同, 下降幅度最大的是“麦哲伦”, 下降幅度最小的是“火凤凰”。

2.2 Zn^{2+} 胁迫对叶绿素含量的影响

从表 3 可以看出, Zn^{2+} 胁迫下供试 9 个高羊茅品种幼苗的叶绿素含量均呈下降趋势, 随 Zn^{2+} 浓度增大, 下降幅度增加; 不同品种的下降低幅不同, 下降幅度最大的是“里园 2 号”, 下降幅度最小的是“缤狗”。

2.3 Zn^{2+} 胁迫对丙二醛含量和细胞质膜透性的影响

由表 4 可知, Zn^{2+} 胁迫下供试的 9 个高羊茅品种丙二醛含量和细胞质膜透性均呈上升趋势, 且随 Zn^{2+} 浓度增加上升幅度增大; 不同品种的上升幅度不同。丙二醛含量和细胞质膜透性增加幅度最大的分别是“里园 2 号”和“宇宙星”, 增加幅度最小的分别是“火凤凰”和“里园 2 号”。

2.4 不同高羊茅品种的耐锌性

运用 Delphi 法^[20]对供试 9 个高羊茅品种以上各项指标进行综合评价, 具体方法是: ①按(处理组数据 - 各自对照组数据)/对照组数据 $\times 100\%$ 计算相对

表 1 Zn^{2+} 胁迫对 9 个高羊茅品种种子发芽率和发芽势的影响

Tab. 1 Effect of Zn^{2+} stress on seed germination potential and germination rate of *F. arundinacea* varieties

%

品种 Variety	Zn^{2+} 浓度 Zn^{2+} concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)					
	0		75		150	
	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate
红象 Red elephant	76.8d	82.3e	74.0c	85.8c	62.5e	72.8d
金娜多 Coronado gold	74.8d	87.8cd	72.3c	88.0c	61.5e	84.8c
宇宙星 Acending star	88.8b	93.3b	88.7b	95.3a	84.5b	95.0a
火凤凰 Fire phoenix	74.8d	85.0de	73.3c	87.2c	69.5c	85.7bc
缤狗 Bingo	95.8a	97.7a	91.8ab	96.8a	91.5a	96.2a
麦哲伦 Magellan	76.2d	89.8bc	73.7c	88.5c	67.8cd	86.0bc
里园 2 号 Wrangler	95.5a	98.3a	94.2a	97.3a	91.2a	96.8a
爱瑞 3 号 Arid 3	74.0d	91.3bc	75.2c	92.0b	71.8c	88.5b
家园 Plantation	82.2c	88.5cd	73.8c	86.8c	65.3de	86.7bc

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。 Different small letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$. The same below.

表 2 Zn^{2+} 胁迫对 9 个高羊茅品种幼苗根长、苗高和鲜重的影响

Tab. 2 Effect of Zn^{2+} stress on seedling root length, shoot height and fresh weight of *F. arundinacea* varieties

品种 Variety	Zn^{2+} 浓度 Zn^{2+} concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)								
	0			75			150		
	根长 Root length (cm)	苗高 Shoot height (cm)	鲜重 Fresh weight ($\text{mg} \cdot 10\text{plant}^{-1}$)	根长 Root length (cm)	苗高 Shoot height (cm)	鲜重 Fresh weight ($\text{mg} \cdot 10\text{plant}^{-1}$)	根长 Root length (cm)	苗高 Shoot height (cm)	鲜重 Fresh weight ($\text{mg} \cdot 10\text{plant}^{-1}$)
红象 Red elephant	3.68b	7.32fg	305.3bc	3.35a	6.82c	242.4de	0.89c	5.72abc	188.0bc
金娜多 Coronado gold	3.68b	7.20g	347.6a	1.95cd	6.22d	230.6e	1.21a	5.22cd	207.3ab
宇宙星 Acending star	5.15a	8.36de	267.5de	1.45e	7.00bc	256.6cd	0.90c	6.19ab	141.7e
火凤凰 Fire phoenix	3.72b	8.69cd	250.7e	3.09a	7.02bc	267.2bc	1.03abc	5.61bc	219.6a
缤狗 Bingo	3.63b	9.49a	293.8c	2.77b	7.54ab	277.2b	0.93bc	6.04ab	206.7ab
麦哲伦 Magellan	3.66b	7.68f	282.0cd	2.11c	6.51cd	187.2f	0.89c	4.70d	159.7de
里园 2 号 Wrangler	3.12c	8.81bc	246.8e	1.72d	7.91a	204.8f	1.10ab	6.29a	174.8cd
爱瑞 3 号 Arid 3	3.61b	8.30e	301.9bc	1.74d	6.54cd	198.4f	0.69d	5.70abc	189.4bc
家园 Plantation	3.61b	9.08b	322.8b	2.20c	6.87c	312.4a	0.85cd	5.79abc	182.7c

增长率(表 5); ②对每个积极性指标(发芽势、发芽率、根长、苗高、鲜重、叶绿素含量)按相对增长率由大到小分别给予等级 1、2、3、4、5、6、7、8、9; 对于消极性指标(丙二醛含量和质膜透性)按相对增长率由小到大分别给予等级 1、2、3、4、5、6、7、8、9(表 6); ③将各指标的等级数按式(1)求和, 再排序(表 7)。由表 7 可知, $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Zn}^{2+}$ 胁迫下 9 个高羊茅品种的耐锌性顺序为“火凤凰” > “红象” > “缤狗”、“家园” > “宇宙星”、“里园 2 号” > “麦哲伦” > “金娜多” > “爱瑞 3 号”; $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Zn}^{2+}$ 胁迫下耐锌性顺序为“火凤凰”和“里园 2 号” > “缤狗” > “金娜多” > “爱瑞 3 号” > “宇宙星” > “红象” > “麦哲伦” > “家园”。

表 3 Zn^{2+} 胁迫对 9 个高羊茅品种叶绿素含量的影响
Tab. 3 Effect of Zn^{2+} stress on seedling chlorophyll content of *F. arundinacea* varieties $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$

品种 Variety	Zn^{2+} 浓度 Zn^{2+} concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	0	75	150
红象 Red elephant	1.37d	1.22ab	0.79de
金娜多 Coronado gold	1.65bc	1.03bc	0.91cd
宇宙星 Acending star	1.92a	0.96c	0.72e
火凤凰 Fire phoenix	1.54c	1.09bc	0.48f
缤狗 Bingo	1.70b	1.45a	1.43a
麦哲伦 Magellan	1.63bc	1.34a	1.22b
里园 2 号 Wrangler	1.91a	0.87c	0.75de
爱瑞 3 号 Arid 3	1.76b	1.03bc	1.00c
家园 Plantation	1.64bc	1.41a	1.31ab

表 4 Zn^{2+} 胁迫对 9 个高羊茅品种丙二醛含量和细胞质膜透性的影响
Tab. 4 Effect of Zn^{2+} stress on seedling MDA content and cell membrane permeability of *F. arundinacea* varieties

品种 Variety	Zn^{2+} 浓度 Zn^{2+} concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)					
	0		75		150	
	丙二醛含量 MDA content [$\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$]	细胞质膜透性 Cell membrane permeability (%)	丙二醛含量 MDA content [$\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$]	细胞质膜透性 Cell membrane permeability (%)	丙二醛含量 MDA content [$\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$]	细胞质膜透性 Cell membrane permeability (%)
红象 Red elephant	5.190e	20.73d	6.718g	63.95ab	6.941e	79.74a
金娜多 Coronado gold	7.106bc	21.15d	8.080ef	67.53a	9.256d	75.08ab
宇宙星 Acending star	6.766cd	14.80e	7.578fg	49.68cd	8.826d	60.76c
火凤凰 Fire phoenix	8.573a	33.72a	9.004cd	57.82b	10.704c	74.16ab
缤狗 Bingo	6.318d	30.03ab	9.696c	36.78e	11.133bc	53.42d
麦哲伦 Magellan	7.533b	26.42bc	8.768de	59.17b	12.245b	72.34b
里园 2 号 Wrangler	7.201bc	30.80ab	10.816b	43.62d	15.328a	44.85e
爱瑞 3 号 Arid 3	7.344bc	24.90cd	12.063a	51.14c	14.417a	70.93b
家园 Plantation	7.738b	24.89cd	7.944ef	43.26d	10.533c	70.95b

表 5 Zn^{2+} 胁迫下 9 个高羊茅品种种子发芽和幼苗生长、生理的 8 个指标相对于对照的增长率
Tab. 5 Increment rate relative to CK of eight indexes of seed germination and seedling growth and physiology of *F. arundinacea* varieties under Zn^{2+} stress %

品种 Variety	Zn^{2+} 浓度 Zn^{2+} concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)							
	75		150		75		150	
	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	根长 Root length	苗高 Shoot height	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	根长 Root length	苗高 Shoot height
红象 Red elephant	-3.65	-18.62	4.25	-11.54	-8.97	-75.82	-6.83	-21.86
金娜多 Coronado gold	-3.34	-17.78	0.23	-3.42	-47.01	-67.12	-13.61	-27.50
宇宙星 Acending star	-0.11	-4.84	2.14	1.82	-71.84	-82.52	-16.27	-25.96
火凤凰 Fire phoenix	-2.01	-7.09	2.59	0.82	-16.94	-72.31	-19.22	-35.44
缤狗 Bingo	-4.18	-4.49	-0.92	-1.54	-23.69	-74.38	-20.55	-36.35
麦哲伦 Magellan	-3.28	-11.02	-1.45	-4.23	-42.35	-75.68	-15.23	-38.80
里园 2 号 Wrangler	-1.36	-4.50	-1.53	-1.02	-44.87	-64.74	-10.22	-28.60
爱瑞 3 号 Arid 3	1.62	-2.97	0.77	-3.07	-51.80	-80.89	-21.20	-31.33
家园 Plantation	-10.22	-20.56	-1.92	-2.03	-39.06	-76.45	-24.34	-36.23

	鲜重 Fresh weight		叶绿素含量 Chlorophyll content		丙二醛含量 MDA content		质膜透性 Cell membrane permeability	
红象 Red elephant	-20.60	-38.42	-10.87	-42.22	29.44	33.74	208.49	284.66
金娜多 Coronado gold	-33.66	-40.36	-44.43	-37.63	13.71	30.26	219.29	254.99
宇宙星 Acending star	-4.07	-47.03	-50.12	-62.50	12.00	30.45	235.68	310.54
火凤凰 Fire phoenix	6.58	-12.41	-29.02	-68.54	5.03	24.86	71.47	119.93
缤狗 Bingo	-5.65	-29.65	-16.03	-15.12	53.47	76.21	22.48	77.89
麦哲伦 Magellan	-33.62	-43.37	-17.93	-25.46	16.39	62.55	123.96	173.81
里园 2 号 Wrangler	-17.02	-29.17	-60.94	-54.67	50.20	112.86	41.62	45.62
爱瑞 3 号 Arid 3	-34.28	-37.26	-41.32	-42.97	64.26	96.31	105.38	184.86
家园 Plantation	-3.22	-43.40	-13.84	-20.39	2.66	36.12	73.80	185.05

表 6 Zn^{2+} 胁迫下 9 个高羊茅品种种子发芽和幼苗生长、生理的 8 个指标相对于对照的增长率排序
Tab. 6 Order of increment rate relative to CK of eight indexes of seed germination and seedling growth and physiology of *F. arundinacea* varieties under Zn^{2+} stress

品种 Variety	Zn^{2+} 浓度 Zn^{2+} concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)							
	75	150	75	150	75	150	75	150
	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	根长 Root length	苗高 Shoot height				
红象 Red elephant	7	8	1	9	1	6	1	1
金娜多 Coronado gold	6	7	5	7	7	2	3	3
宇宙星 Acending star	2	4	3	1	9	9	5	2
火凤凰 Fire phoenix	4	5	2	2	2	3	6	6
缤狗 Bingo	8	2	6	4	3	4	7	8
麦哲伦 Magellan	5	6	7	8	5	5	4	9
里园 2 号 Wrangler	3	3	8	3	6	1	2	4
爱瑞 3 号 Arid 3	1	1	4	6	8	8	8	5
家园 Plantation	9	9	9	5	4	7	9	7

	鲜重 Fresh weight		叶绿素含量 Chlorophyll content		丙二醛含量 MDA content		质膜透性 Cell membrane permeability	
	75	150	75	150	75	150	75	150
红象 Red elephant	6	5	1	5	6	4	7	8
金娜多 Coronado gold	8	6	7	4	4	2	8	7
宇宙星 Acending star	3	9	8	8	3	3	9	9
火凤凰 Fire phoenix	1	1	5	9	2	1	3	3
缤狗 Bingo	4	3	3	1	8	7	1	2
麦哲伦 Magellan	7	7	4	3	5	6	6	4
里园 2 号 Wrangler	5	2	9	7	7	9	2	1
爱瑞 3 号 Arid 3	9	4	6	6	9	8	5	5
家园 Plantation	2	8	2	2	1	5	4	6

表 7 9 个高羊茅品种耐锌性的 Delphi 法排序结果
Tab. 7 Sequence of Zn resistance of *F. arundinacea* varieties by Delphi method

品种 Variety	各指标排序值总和 Sequence of value sum of all indexes		耐锌性排序 Order of Zn resis- tance	
	Zn^{2+} 浓度	Zn^{2+} concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	75	150
	75	150	75	150
红象 Red elephant	30	46	2	6
金娜多 Coronado gold	48	38	6	3
宇宙星 Acending star	42	45	4	5
火凤凰 Fire phoenix	25	30	1	1
缤狗 Bingo	40	31	3	2
麦哲伦 Magellan	43	48	5	7
里园 2 号 Wrangler	42	30	4	1
爱瑞 3 号 Arid 3	50	43	7	4
家园 Plantation	40	49	3	8

3 讨论

不同高羊茅品种种子发芽势、发芽率、根长、苗高、鲜重等指标的变化情况表明, Zn^{2+} 胁迫下, 有的品种如“缤狗”和“里园 2 号”种子萌发速度快, Zn^{2+} 进入种子内部的量少, 可能种胚几乎未受到 Zn^{2+} 毒害, 故种子萌发受影响较小; 有的品种如“红象”、“金娜多”、“宇宙星”、“火凤凰”、“爱瑞 3 号”可能有少量 Zn^{2+} 进入种子内部, 对萌发有一定促进效应。9 个品种中除“火凤凰”外, 其他品种根长、苗高、鲜重的下降幅度均大于发芽势和发芽率, 说明随 Zn^{2+} 浓度增加和幼苗继续生长, Zn^{2+} 进入植株

体内的量增加, Zn^{2+} 胁迫加剧, 幼苗受 Zn^{2+} 毒害加重。所测定的指标中, Zn^{2+} 胁迫对根长影响最大, 这可能是根直接接触 Zn^{2+} 的缘故。

叶绿素是评价草坪草叶色和观赏品质的重要指标, 同时又是绿色植物收集光能和进行光能转换的主要色素^[22]。本试验中, Zn^{2+} 胁迫下 9 个高羊茅品种叶绿素含量均下降(这与丁海东等^[23]关于 Zn 胁迫导致番茄叶绿素含量下降的报道一致), 外观上均表现叶色发黄, 观赏品质也因此下降; 但由于叶绿素含量下降率各不相同, 各品种叶色发黄程度不同, 光合能力下降程度也不同, 净同化物积累量减少因品种而异, 导致植株生物量下降各品种也不同。至于 Zn^{2+} 胁迫下叶绿素含量下降可能是由于过量 Zn^{2+} 进入植株体内, 抑制了叶绿素生物合成途径中几种酶活性, 从而阻碍了叶绿素合成^[16], 或 Zn^{2+} 毒害产生过多自由基直接导致叶绿素分子结构破坏^[24], 或叶绿素分子中 Mg^{2+} 被 Zn^{2+} 所取代所致^[25], 尚需进一步试验研究。

细胞膜是选择透过性膜, 具有调节和控制细胞内外物质运输和交换的作用, 其透性值的大小反映细胞内一些可溶性物质外渗量的多少, 细胞质膜透性是评定植物对逆境条件反应的指标之一。丙二醛是膜脂过氧化的重要产物之一, 可与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联, 形成不溶性的化合物(脂褐素)沉积, 干扰细胞的正常生命活动, 因而常被作为脂质过氧化指标, 表示植物对逆境条件反应的强

弱^[26-27]。Zn²⁺胁迫下, 9 个高羊茅品种细胞质膜透性和丙二醛含量呈上升趋势, 但上升率因品种而异, 显示细胞内物质外渗量和膜质过氧化作用程度也因品种而异, 细胞的正常生命活动受干扰的程度因品种而不同, 生长受抑制也因品种而不同, 故导致高羊茅品种耐锌性强弱不同。

对 Zn²⁺胁迫下 9 个高羊茅品种发芽势、发芽率、根长、苗高、鲜重 5 个生物性状指标与叶绿素含量、丙二醛含量、细胞质膜透性 3 个生理指标的分析发现, 9 个高羊茅品种的各项指标变化幅度不同, 可能是品种本身特性所致, 若用某单一指标来评价高羊茅耐锌性, 难免有片面性; 因此, 采用 Delphi 法对 8 项指标相对增长率进行综合评价, 是较为全面的方法, 能较好地对不同品种耐锌性进行鉴定。

4 结论

本试验中, Zn²⁺胁迫下 9 个高羊茅品种幼苗叶绿素含量均低于对照, 而丙二醛含量、细胞质膜透性均高于对照, 表明各品种生理代谢的稳态受到影响; 但 150 mg · L⁻¹ Zn²⁺胁迫下, 9 个高羊茅品种均无死苗现象, 且与对照相比鲜重下降率小于 50%。因此, 9 个高羊茅品种在种子萌发和生长初期能耐 < 150 mg · L⁻¹ 的 Zn²⁺胁迫。

运用 Delphi 法对 9 个高羊茅品种种子萌发和幼苗期 8 项指标评价结果表明, 75mg · L⁻¹ Zn²⁺胁迫下, 耐锌性顺序为“火凤凰” > “红象” > “缤狗”、“家园” > “宇宙星”、“里园 2 号” > “麦哲伦” > “金娜多” > “爱瑞 3 号”; 150 mg · L⁻¹ Zn²⁺胁迫下, 耐锌性顺序为“火凤凰”、“里园 2 号” > “缤狗” > “金娜多” > “爱瑞 3 号” > “宇宙星” > “红象” > “麦哲伦” > “家园”。

Zn²⁺胁迫下, 耐锌性强的品种为“火凤凰”和“缤狗”; 有的品种如“红象”、“家园”在低浓度 Zn²⁺胁迫下耐锌性较强, 但高浓度 Zn²⁺胁迫下耐锌性弱。因此, 在治理 Zn²⁺污染时, 要根据污染严重程度, 合理选用高羊茅品种。

参考文献

- [1] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 37-43
- [2] Schnoor J L. Emerging chemical contaminants[J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37(21): 357-388
- [3] Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, et al. The possibility of *in situ* heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J]. Resource, Conservation and Recycling, 1994, 11: 41-49
- [4] Reeves R D, Brooks R R. European species of *Thlaspi* L. (Cruciferae) as indicators of Ni and Zn[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1983, 18: 275-283
- [5] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天(*Sedum alfredii* H.)——一种新的锌超积累植物[J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1003-1006
- [6] 徐卫红, 熊治庭, 王宏信, 等. 锌胁迫对重金属富集植物黑麦草养分吸收和锌积累的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 32-35
- [7] 李文一, 徐卫红, 胡小凤, 等. Zn 胁迫对黑麦草幼苗生长、生理生化及 Zn 吸收的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 190-194
- [8] 徐卫红, 王宏信, 王正银, 等. 金属富集植物黑麦草对锌、镉复合污染的响应[J]. 水土保持学报, 2006, 22(6): 365-368
- [9] 崔玮, 谢宗平, 马嘉琦, 等. 镍锌离子对高羊茅幼苗生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1093-1096
- [10] 徐卫红, 熊治庭, 李文一, 等. 4 品种黑麦草对重金属 Zn 的耐性及 Zn 积累研究[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(6): 785-790
- [11] 袁敏, 铁柏清, 唐美珍, 等. 4 种草对铅锌尾矿污染土壤重金属的抗性吸收特性[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 43-47
- [12] Zhao S L, Duo L A. Initial growth effect and ecological threshold of *Festuca arundinacea* L. under progressive stress of Cu²⁺ and Zn²⁺[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 1098-1105
- [13] 马博英. 铅、锌诱导的高羊茅叶片过氧化物酶活性变化[J]. 浙江教育学院学报, 2008(4): 77-81
- [14] 多立安, 高玉葆, 赵树兰. 早熟禾对 4 种重金属胁迫生长响应特征[J]. 西北植物学报, 2006, 26(1): 183-187
- [15] 孙吉雄. 草坪学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 1-17
- [16] 徐胜, 李建龙, 赵德华. 高羊茅的生理生态及其生化特性研究进展[J]. 草业学报, 2004, 13(1): 58-64
- [17] 黄锦文, 骆娟, 陈冬梅, 等. 低温胁迫下高羊茅抑制消减文库的构建与分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1162-1167
- [18] 国家种子检验协会(ISTA). 1996 国际种子检验规程[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 134-136, 280-281
- [20] 李振国. 植物细胞质膜透性的测定[M]//中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999: 302-303
- [21] 朱永达. 农业系统工程[M]. 北京: 农业出版社, 1995: 44-53, 203-206
- [22] 刘爱荣, 张远兵, 何小丽, 等. 空心莲子草水浸液对黑麦草和高羊茅种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(5): 96-101
- [23] 丁海东, 齐乃敏, 朱为民, 等. 镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及其脯氨酸与谷胱甘肽含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 53-55
- [24] Liang P, Pardee A B. Differential display of Eukaryotic messenger RNA by means of the Polymerase Chain Reaction[J]. Science, 1992, 257(14): 967-971
- [25] Kupper H, Kupper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47: 259-266
- [26] Chris B, Marc V H, Dirk I. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 43: 83-116
- [27] 徐勤松, 施国新, 杜开和. 镉胁迫对水车前叶片抗氧化酶系统的亚微结构的影响[J]. 农业生态环境, 2001, 17(2): 30-34