

杨 阳,刘秉儒,贾倩民,等. 赤霉素对干旱胁迫下沙冬青种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(5):271-275.

赤霉素对干旱胁迫下沙冬青种子萌发的影响

杨 阳,刘秉儒,贾倩民,韩丛丛

(宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,宁夏银川 750021)

摘要:以沙冬青为试验材料,采用恒温培养法研究不同浓度(5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%)聚乙二醇(PEG)、不同浓度(50、100、150、200、250、300、350 mg/L)赤霉素以及赤霉素对 PEG 模拟干旱胁迫下沙冬青种子萌发的影响。结果表明:在 PEG 模拟干旱胁迫下,沙冬青种子的萌发率与 PEG 浓度呈显著负相关, $r = -0.979\ 9$;低浓度(5%)的 PEG 能提高沙冬青种子的萌发率;当 PEG 浓度高于 10% 时,沙冬青种子的萌发率随 PEG 浓度的增加而显著下降,且不同浓度的 PEG 胁迫对沙冬青种子萌发具有一定的延缓作用。不同浓度赤霉素处理对沙冬青种子萌发具有不同的促进作用,且沙冬青种子萌发率与赤霉素浓度呈单峰曲线,以 200 mg/L 浓度最佳。说明赤霉素对沙冬青种子萌发具有低浓度的激活效应和高浓度的轻微抑制效应,适宜浓度的赤霉素能够缓解和刺激干旱胁迫下的沙冬青种子萌发,未萌发的沙冬青种子复 200 mg/L 赤霉素后的恢复萌发率均达到 40% 以上。尽管 200 mg/L 赤霉素对解除干旱胁迫后的沙冬青种子萌发具有促进作用,但不能促进浓度超过 25% 的 PEG 胁迫下的种子萌发,表明在一定范围的干旱胁迫下,沙冬青种子仍具有较高的萌发潜力,但 PEG 浓度过高会导致种子失活;结果还表明,幼苗鲜质量可作为赤霉素促进作用和沙冬青植株与干旱胁迫相抗衡的重要指标。

关键词:沙冬青;PEG;赤霉素;干旱胁迫;种子萌发

中图分类号:S793.905;Q946.885⁺.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2014)05-0271-04

沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)是亚洲中部荒漠地区唯一的常绿阔叶灌木^[1-2],属于国家二级保护植物,其抗逆性极强^[3]。沙冬青以种子作为繁殖材料,因而种子萌发是其生活史中的关键阶段,对干旱胁迫的响应反映了其适应环境的生态机制^[4],并且种子萌发时期的耐旱程度在一定程度上是其抗旱性研究的重要内容^[5]。近年来,聚乙二醇(PEG)模拟高渗溶液法已经成为研究种子萌发性状的重要方法,在水稻、小麦等农作物上被广泛使用^[6-8]。关于沙冬青的耐旱性研究已有一些报道,最早见于对其形态解剖特征及理化性质等方面^[9-10]。本试验以 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫,研究 7 种不同浓度(5%~35%)PEG 对沙冬青种子萌发的影响,以期系统了解沙冬青种子萌发阶段的耐旱性特征并揭示其抗旱机理,为开发利用荒漠植物种质资源、进行植被的恢复与重建提供参考和借鉴。

赤霉素是一类重要的植物生长调节激素,在植物的生长发育中起重要作用,它主要通过细胞数目的增加和细胞的伸长来完成作用^[11]。目前,关于赤霉素缓解盐胁迫对种子萌发和幼苗生长的影响已经在水稻、番茄等作物上有所报道^[12-13],但尚未有关于赤霉素缓解干旱胁迫对沙冬青种子萌发影响的报道,因此深入了解赤霉素对沙冬青种子萌发的干旱胁迫缓解机制显得尤为重要。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用材料为沙冬青种子,于 2012 年采集于宁夏银川市东部的灵武市荒漠区,千粒质量为 53.2 g。选取健壮饱满、无损伤、无虫害的种子,用 65% 乙醇消毒 5 min 后,再用蒸馏水冲洗干净,用 100 ℃ 水处理 5 min 后常温放置 24 h。

1.2 试验设计

选取上述处理的均匀一致的沙冬青种子,将其整齐地排列在铺有数层滤纸的培养皿中,每个培养皿 100 粒。室温下采用不同质量浓度的聚乙二醇(PEG-6000)溶液(5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%)模拟干旱胁迫,并用不同浓度的赤霉素溶液(50、100、150、200、250、300、350 mg/L)进行处理,对照用去离子水进行培养。每个浓度梯度设 3 个重复,培养过程中每天向培养皿中加入相应的处理溶液,并保持滤纸相对湿润,每 3 d 更换 1 次滤纸。培养条件:24 h 光照,光照强度 2 000 lx,恒温 25 ℃,相对湿度 75%~80%。

每天记载沙冬青种子的萌发数,以出现胚根为标志,及时移除已经萌发的种子。萌发 9 d 后测定并记录移除种子的鲜质量和最终萌发率,将 PEG 处理的全部未发芽的种子一部分经复蒸馏水处理,另一部分复 200 mg/L 赤霉素处理。每天观察并记录 2 种处理的种子萌发恢复情况,萌发率用已发芽的种子数占全部种子数的百分率来表示。

1.3 种子萌发指标的测定

种子萌发的相关计算公式为:

萌发率 = 种子发芽数 / 供试种子数 × 100%;

萌发恢复率 = $[(X - Y) / (Z - Y)] \times 100\%$ 。

式中: X 为全部时间的发芽种子数; Y 为 PEG 溶液中的发芽种子数; Z 为试验用该处理的全部种子数。

收稿日期:2013-10-08

基金项目:国家“973”计划前期专项(编号:2012CB723206);国家科技支撑计划(编号:2011BAC07B03)。

作者简介:杨 阳(1988—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,主要从事恢复生态学研究。E-mail:yangyangnature@163.com。

通信作者:刘秉儒,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事生态恢复理论与技术研究。E-mail:bingru.liu@163.com。

1.4 数据分析

试验结果用“平均值 ± 标准误”表示,用 Excel 2003 软件作图,SPSS 18.0 进行数据分析。

2 结果与分析

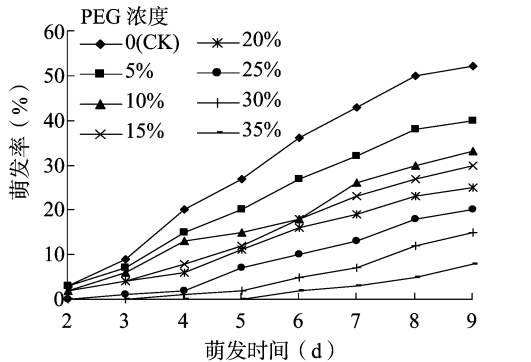
2.1 赤霉素和 PEG 处理的沙冬青种子萌发率

由表 1 可以看出,随着 PEG 浓度的升高,沙冬青种子萌发率呈显著的下降趋势,可能随着干旱胁迫的加重,沙冬青种子萌发受到的抑制作用变强,尤其从 15% PEG 处理开始变得很明显,而 5% PEG 处理反而提高了沙冬青种子的萌发率,10% PEG 处理的沙冬青种子与对照组无极大明显差异,但达显著差异 ($P < 0.05$);当 PEG 浓度高于 10% 时,沙冬青种子的萌发率急剧下降,且显著低于对照;PEG 浓度达到 25% 以上时,沙冬青种子萌发率很低;PEG 浓度在 30%、35% 时,沙冬青种子的萌发率之间差异并不显著,在较高 PEG 浓度 (35%) 下的萌发率仅为 7.03%。由图 1 可见,沙冬青种子萌发率与 PEG 浓度呈显著负相关,相关系数达到 -0.9799 。

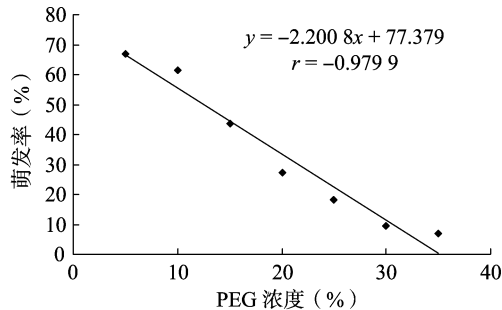
表 1 赤霉素和 PEG 处理沙冬青种子的萌发率

| 赤霉素浓度 (mg/L) | 萌发率 (%) | PEG 浓度 (%) | 萌发率 (%) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| 50 | 63.21 ± 1.05e | 5 | 66.74 ± 2.03a |
| 100 | 75.31 ± 2.12d | 10 | 61.38 ± 1.98b |
| 150 | 86.89 ± 2.65c | 15 | 43.48 ± 2.56c |
| 200 | 95.40 ± 1.98a | 20 | 27.12 ± 2.48d |
| 250 | 90.74 ± 1.37b | 25 | 18.32 ± 1.87e |
| 300 | 85.56 ± 1.68c | 30 | 9.47 ± 2.59f |
| 350 | 83.36 ± 2.34c | 35 | 7.03 ± 1.39f |
| 0 (CK) | 62.05 ± 1.02e | 0 (CK) | 62.05 ± 1.02a |

注:同列数据后不同小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$)。



a.不同浓度 PEG 在不同萌发时间对沙冬青萌发率的影响



b.PEG 浓度与沙冬青种子平均萌发率的关系

图1 PEG 对沙冬青种子萌发的影响

经赤霉素处理的沙冬青种子萌发率也不同,从表 1 可以看出,7 个不同浓度的赤霉素处理均能促进沙冬青种子萌发,并且各浓度 (除 50 mg/L 以外) 赤霉素处理的种子萌发率与对照相比均有显著提高,种子萌发率与赤霉素浓度间呈单峰曲线,以 200 mg/L 赤霉素浓度处理的萌发率最高,达 95.40%,远远高于对照组;而 50 mg/L 赤霉素浓度处理下的萌发率与对照组间无显著差异;赤霉素浓度高于 200 mg/L 时,对种子的萌发均有不同抑制作用。整体看来,赤霉素对种子萌发的作用表现为低浓度促进、高浓度轻微抑制。

2.2 PEG 模拟干旱胁迫对沙冬青种子萌发的影响

PEG 模拟干旱胁迫除了可降低沙冬青种子的萌发率,还可延缓种子的初始萌发时间,降低种子的萌发速率。从图 1 可以看出,25% PEG 溶液处理的沙冬青种子在 2 d 后才开始萌发,35% PEG 溶液处理的沙冬青种子在第 6 天开始萌发,且其后几天的萌发速率非常低,极大降低了沙冬青种子的初始萌发时间,因此浓度为 25% 及以上的 PEG 溶液对沙冬青种子的萌发基本上起到了完全抑制的作用。由图 1 萌发的趋势可以看出,沙冬青种子从第 3 天以后的萌发速率开始上升,到第 9 天基本平稳。相关性分析表明,沙冬青种子的萌发率与 PEG 浓度呈显著负相关关系 ($r = -0.9799$)。随着萌发时间的增加,沙冬青种子的萌发速率逐渐减小,且低浓度 PEG 比高浓度 PEG 的高峰期开始得早。由图 1 还可看出,从种子萌发第 4 天开始,5% ~ 10% PEG 处理的种子萌发率随 PEG 浓度的增加有较大变化,说明 5% ~ 10% 是沙冬青种子在 PEG 模拟干旱胁迫下的萌发敏感区间。

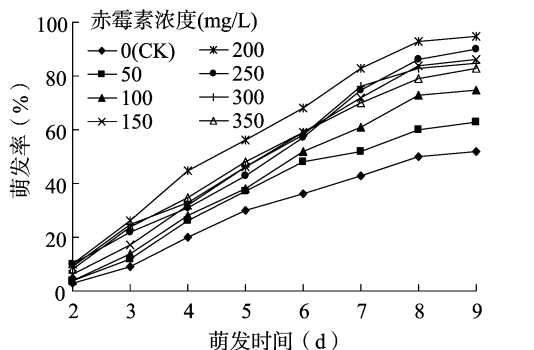
2.3 赤霉素对沙冬青种子萌发的影响

由图 2 可见,在各浓度赤霉素处理下,沙冬青种子的萌发率最高为 95.40%,最低为 63.21%,最终萌发率从大到小依次为 200 mg/L > 250 mg/L > 150 mg/L > 300 mg/L > 350 mg/L > 100 mg/L > 50 mg/L > CK,除了 50 mg/L 赤霉素处理之外,其他赤霉素处理的沙冬青种子最终萌发率均明显高于蒸馏水处理的种子,且与对照组间差异显著。与对照相比,50mg/L 赤霉素处理的沙冬青种子萌发率增幅仅为 1.9%,而其他各赤霉素处理的种子萌发率增幅均在 21.4% ~ 53.7% 之间;300、350 mg/L 赤霉素处理间的萌发率差异并不显著,可见赤霉素可以显著刺激沙冬青种子萌发,增加沙冬青种子的萌发率,但高浓度处理间差异不显著。结果表明,沙冬青种子的萌发对赤霉素十分敏感,综合评价可认为 200 mg/L 赤霉素是沙冬青种子萌发的最适浓度,高于 200 mg/L 赤霉素处理则表现为轻微的抑制效应。从图 2 还可以看出,赤霉素浓度与沙冬青种子的萌发率呈单峰曲线。

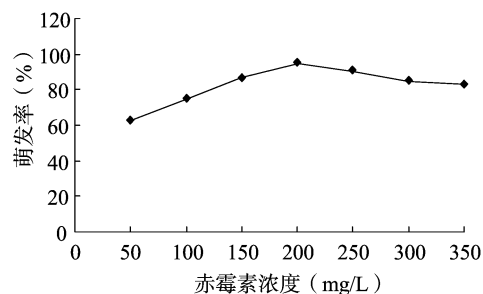
2.4 PEG 胁迫复水后沙冬青种子恢复萌发率、相对萌发率

虽然 PEG 对沙冬青种子萌发具有较高的抑制作用,但复水后各浓度 PEG 处理的种子仍具有较高的恢复萌发率。从种子恢复萌发率来看,将未萌发的种子转至蒸馏水中后 24 h 内就开始萌发,种子萌发恢复率在第 3 天达到高峰时期,第 3 天以后逐渐减小。

沙冬青种子萌发 9 d 后,将未萌发的种子转至蒸馏水中。从图 3 可以看出,复水后沙冬青种子的相对萌发率均在 42.9% 以上,在 10% PEG 溶液中的相对萌发率达到了 87.9%,表明 PEG 溶液并没有使沙冬青种子永久丧失萌发能



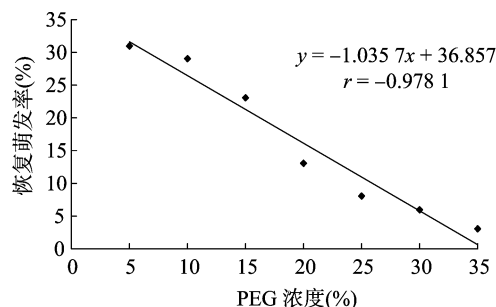
a. 不同浓度赤霉素在不同萌发时间对沙冬青萌发率的影响



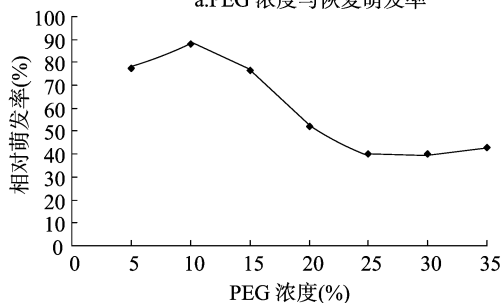
b. 赤霉素浓度与沙冬青种子平均萌发率的关系

图2 赤霉素对沙冬青种子萌发的影响

力,只是暂时抑制了种子萌发,种子仍然保持较高的萌发潜力,当解除干旱胁迫时,种子就能迅速萌发,且萌发时间大大缩短。沙冬青种子在干旱胁迫下的萌发潜力与 PEG 的处理浓度有关,较低浓度(10%)的 PEG 对沙冬青种子的最终萌发有一定的刺激作用,最终萌发率为 29%,相对萌发率可达 87.9%;高浓度(35%)PEG 处理的种子解除胁迫后的最终萌发率(3%)也较低。由图 3 还可以看出,在蒸馏水中恢复萌发后,各浓度 PEG 处理种子的恢复萌发率与 PEG 浓度呈显著负相关关系($r = -0.9781$),并且随着 PEG 浓度的增加,种子的最终萌发率逐渐降低。



a. PEG 浓度与恢复萌发率

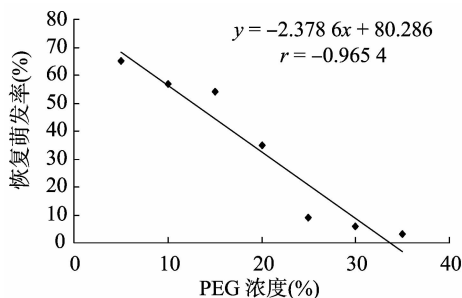


b. PEG 浓度与相对萌发率

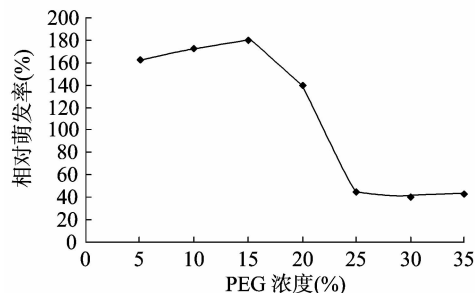
图3 复水后沙冬青种子的恢复萌发率和相对萌发率

2.5 复 200 mg/L 赤霉素后沙冬青种子的恢复萌发率和相对萌发率

沙冬青种子对于干旱胁迫具有较强的适应性,在同等条件下,沙冬青种子萌发 9 d 后,将未萌发的种子转至 200 mg/L 赤霉素中,种子的萌发率均有不同程度的提高。从复 200 mg/L 赤霉素后的恢复萌发速率来看,与复蒸馏水处理相比,处理 12 h 的沙冬青种子开始萌发,在第 2 天其恢复萌发速率达到最大值,从而极大缩短了种子萌发时间。从图 4 可以看出,从 200 mg/L 赤霉素中恢复萌发后,各浓度 PEG 处理种子的恢复萌发率与 PEG 浓度呈显著负相关关系($r = -0.9654$),并且随着 PEG 浓度的增加,种子的萌发率逐渐降低。PEG 浓度在 5%~20% 时,恢复萌发率在 35%~65%,相对萌发率在 140%~180%,远远高于复蒸馏水后的种子萌发率;PEG 浓度达到 25% 以上时,恢复萌发率在 3%~9% 间波动,其相对萌发率与复蒸馏水后的一致。模拟干旱胁迫后未萌发的沙冬青种子复 200 mg/L 赤霉素处理后均能萌发,且 25% 浓度以下 PEG 处理沙冬青种子的相对萌发率均达到 140% 以上,而 25% PEG 浓度以上处理的沙冬青种子相对恢复萌发率与复蒸馏水后一致,且二者的相对萌发率均较低,说明高于 25% PEG 浓度处理会使沙冬青种子部分失去活性,200 mg/L 赤霉素不能刺激这部分种子萌发,但是 25% PEG 以下浓度处理的沙冬青种子仍然保存活力。



a. PEG 浓度与恢复萌发率



b. PEG 浓度与相对萌发率

图4 复 200 mg/L 赤霉素后沙冬青种子的恢复萌发率和相对萌发率

2.6 PEG 模拟干旱胁迫和赤霉素对沙冬青幼苗生物量的影响

从图 5 可以看出,赤霉素处理后的沙冬青幼苗鲜质量与赤霉素浓度呈单峰曲线,复 200 mg/L 赤霉素处理的沙冬青幼苗鲜质量最大,同沙冬青种子萌发率与赤霉素浓度变化规律一致,高出对照的 9.8%~32.4%。随着 PEG 浓度的增加,沙冬青幼苗鲜质量持续下降,且均低于对照,但下降的幅度不同;PEG 浓度大于 25% 以后,幼苗鲜质量略上升后急剧下降,

说明 PEG 对沙冬青幼苗鲜质量的影响程度不同;与对照相比,沙冬青幼苗鲜质量下降的幅度为 3.7% ~ 25.7%。赤霉素、PEG 处理后幼苗鲜质量的变化趋势均与二者处理后的沙冬青种子萌发率的变化规律一致,说明幼苗鲜质量的变化是沙冬青植株与干旱胁迫相抗衡的直接结果,也是植株被赤霉素刺激后的重要指标体现。

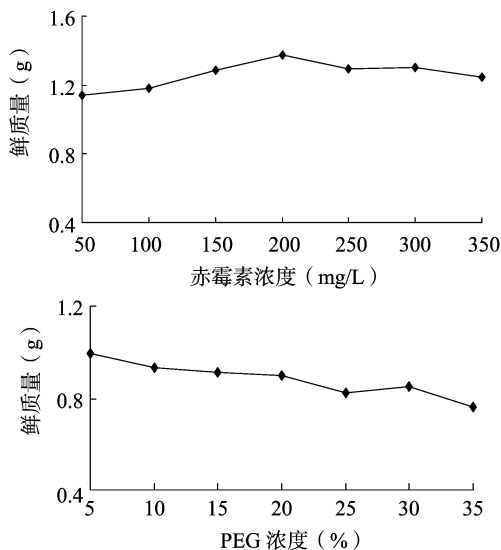


图5 PEG 和赤霉素对沙冬青幼苗鲜质量的影响

3 结论与讨论

PEG 是高分子渗透剂,其最大特点是本身不能穿越细胞壁进入细胞质,不会引起质壁分离而使植物组织和细胞处于类似于干旱的水分胁迫之中^[14]。本试验通过 PEG 模拟干旱胁迫,研究其对矮沙冬青种子萌发的影响,结果表明:随着 PEG 模拟干旱胁迫程度的加重,沙冬青种子的萌发率和幼苗鲜质量显著下降,说明随着胁迫程度的加重,沙冬青种子的萌发受到不同程度的抑制,当胁迫超过种子的耐受限度(25%)时,种子将难以萌发并致死,这与前人的研究结果^[15-17]相似。

在 PEG 模拟干旱胁迫初期,沙冬青种子内的活性氧清除系统被激活^[17],其产生的促进作用超过了损伤作用,表现为干旱胁迫初期对种子萌发具有低浓度下的刺激效应,因此 5% PEG 处理沙冬青种子的萌发率明显高于对照组,且一定浓度(5%)的 PEG 可以提高沙冬青种子的萌发率,超过这个阈值,沙冬青种子的萌发率逐渐下降,与焦树英等的研究结果^[18]一致;10% PEG 胁迫下,种子萌发率与对照组差异并不显著,5% ~ 10% PEG 胁迫属于沙冬青种子耐旱范围之内,在此浓度下,能够启动种子体内一系列保护机制,减少种子吸胀过程中膜系统的损伤,从而提高种子萌发率;随着 PEG 浓度的增加并超过沙冬青的耐旱范围,其种子萌发受阻,种子内的活性氧损伤作用表现更为强烈,种子萌发受到抑制,当 PEG 浓度达到 25% 以上时,沙冬青种子萌发率极低,从一定程度上反映了沙冬青种子萌发在干旱胁迫下能够达到的阈值。

赤霉素是植物激素中对种子萌发效果最好、研究最多的一类激素,可以打破种子休眠、刺激种子萌发。本试验中用赤霉素处理后沙冬青种子萌发率较对照组明显提高,可使种子的萌发率增加 40% 以上,且与赤霉素浓度呈单峰曲线,并且

极大地缩短萌发时间。试验结果表明,200 mg/L 浓度的赤霉素是沙冬青种子萌发的最适浓度,与邱鹏飞等的研究结果^[19]一致;不同浓度的赤霉素均不同程度提高了沙冬青种子的萌发率,当赤霉素浓度达到 200 mg/L 时,其促进作用最大,但浓度过大则会轻微抑制种子的萌发,表现为低浓度促进和高浓度轻微抑制作用。

PEG 模拟干旱胁迫对种子萌发均有明显的抑制作用,复水后部分被抑制的种子可重新萌发,复适宜浓度的赤霉素能够缓解和刺激干旱胁迫对种子萌发的伤害,表明 PEG 模拟干旱胁迫可导致种子产生浅度休眠^[20],许多盐生植物的种子在较高浓度盐溶液中不萌发,复水后有高的萌发恢复率^[21-22],但是关于旱生植物种子解除干旱胁迫后恢复萌发率的研究较少,本研究证实了 PEG 模拟干旱胁迫下的沙冬青种子仍具有较高的萌发潜力,与陈文等的研究结果^[23]一致,其萌发潜力随着 PEG 浓度的增加而降低;未萌发的沙冬青种子复蒸馏水和复 200 mg/L 赤霉素后的恢复萌发率与浓度之间呈显著负相关关系,相关系数分别为 -0.978 1、-0.965 4;PEG 浓度介于 5% ~ 25% 之间,复 200 mg/L 的赤霉素比复蒸馏水后的沙冬青种子恢复萌发率高,说明 200 mg/L 赤霉素较蒸馏水更能够激发干旱胁迫下沙冬青种子的萌发潜力,当 PEG 浓度达到 25% 以上时,二者的恢复萌发率较低且基本一致,说明高浓度的 PEG 使沙冬青种子失去活性而导致未能萌发。

综上所述,赤霉素对不同浓度 PEG 胁迫下沙冬青种子的恢复萌发具有不同程度刺激作用。近年来,许多研究发现赤霉素能够缓解盐胁迫对作物种子萌发的影响^[11,24],但并未见到赤霉素刺激干旱胁迫对沙冬青种子萌发的影响。本研究表明,一定浓度的赤霉素较蒸馏水更能够缓解和刺激干旱胁迫下沙冬青种子萌发,但其具体生理机制还有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 王庆锁,李 勇,张灵芝. 珍稀濒危植物沙冬青研究概况[J]. 生物多样性,1995,3(3):153-156.
- [2] 李昌龙,尉秋实,李爱德. 孑遗植物沙冬青的研究进展与展望[J]. 中国野生植物资源,2004,23(5):21-23.
- [3] 刘美芹,卢存福,尹伟伦. 珍稀濒危植物沙冬青生物学特性及抗逆性研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(3):384-388.
- [4] 孙 霞,高信芬. 聚乙二醇(PEG)模拟干旱胁迫对干旱河谷 5 种木蓝种子萌发的影响[J]. 应用与环境生物学报,2010,16(3):317-322.
- [5] 李培英,孙宗玖. 阿不来提. PEG 模拟干旱胁迫下 29 份偃麦草种质种子萌发期抗旱性评价[J]. 中国草地学报,2010,32(1):32-39.
- [6] 马廷臣,余蓉蓉,陈荣军,等. PEG-6000 模拟干旱对水稻苗期根系形态和部分生理指标影响的研究[J]. 中国农学通报,2010,26(8):149-156.
- [7] 田梦雨,李丹丹,戴廷波,等. 水分胁迫下不同基因型小麦苗期的形态生理差异[J]. 应用生态学报,2010,21(1):41-47.
- [8] 邵俊红,梁宗锁,赵荣艳,等. 水分胁迫对不同小麦品种幼苗生理特性的影响[J]. 中国农学通报,2008,24(10):141-145.
- [9] 丁 琼. 共生菌在濒危植物沙冬青引种栽培中的应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2004.

李张伟,陈楚莲,施佳妍. 纳米羟基磷灰石对铅污染土壤中铅化学形态分布的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(5):275-277.

纳米羟基磷灰石对铅污染土壤中铅化学形态分布的影响

李张伟, 陈楚莲, 施佳妍

(韩山师范学院化学系, 广东潮州 521041)

摘要:通过人工模拟重度铅污染土壤,并向土壤中加入不同浓度的纳米羟基磷灰石(nano hydroxyapatite, nHAP),考察 nHAP 对土壤中铅的钝化修复作用。结果显示,nHAP 能提高铅污染土壤中的 pH 值,并且随着投加 nHAP 的浓度的增高,土壤中的 pH 值也随着增高;nHAP 能有效地将土壤中生物有效性高的铅化学形态转化为难以被生物吸收利用的形态,从而降低土壤中铅的生物活性,达到有效钝化土壤铅的作用。

关键词:纳米羟基磷灰石;铅污染土壤;化学形态分布

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)05-0275-03

目前,土壤重金属污染是一个世界性的难题,也是我国目前面临的一个难题。据报道,截至 2006 年年底,中国约有 0.1 亿 hm^2 农田土地受到重金属的污染,全国每年因重金属污染的粮食达 1 200 万 t,直接经济损失超过 200 亿元人民币^[1]。因此,预防和修复土壤重金属污染的工作刻不容缓。目前,土壤重金属污染的修复方法主要有物理修复法、化学修复法和生物修复法等。其中化学修复法具有成本低、修复效果好等优点,得到广泛的应用。化学修复法是指通过向重金属污染土壤中加入磷灰石、硅酸盐矿物、石灰等化学修复剂,从而降低土壤中重金属的生物有效形态含量,减少土壤中重金属的生物活性,达到钝化土壤重金属的作用。羟基磷灰石是一个广泛用于钝化土壤重金属的矿物,它具有钝化效率高、成本低等优点。纳米羟基磷灰石(nHAP)是纳米颗粒级别的

羟基磷灰石,它具有比普通粒径的羟基磷灰石更大的比表面积和更活泼的表面物理化学性质,因此具有更优异的吸附和固定重金属的能力。但到目前为止,关于 nHAP 应用于钝化修复土壤重金属的研究还比较少且不够深入。本试验通过人工模拟铅重度污染土壤,通过投加不同浓度的 nHAP,探讨 nHAP 钝化修复土壤铅污染能力和特点,为土壤铅污染的修复提供有益的理论支持和试验。

1 材料与方法

1.1 样品的准备

供试土壤来自菜地,土壤 pH 值 6.85,有机质含量 3.85%,总铅含量 84.2 mg/kg,有效铅含量 1.24 mg/kg。将土壤风干,过 10 mm 筛,将过筛后的土壤统一施 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$,设 3 个铅处理组, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 浓度分别是 0、500、1 000 mg/kg 土壤。每个铅处理组分别施 nHAP(购自南京埃普瑞公司,颗粒直径 < 60 nm)0.5、10、20、30 g/kg 土壤,每个处理进行 4 次重复。每盆装土 2 kg,试验时间为 2 个月,试验结束后采集土

收稿日期:2013-09-01

基金项目:国家级星火计划(编号:2012GA780051)。

作者简介:李张伟(1980—),男,广东潮州人,硕士,讲师,研究方向为农业环境科学。E-mail:99094001@163.com。

[10]王 华. 沙冬青与根瘤菌和丛枝菌根真菌(AMF)共生关系影响因素的研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[11]张永芳,卫秋慧,王润梅,等. 外源赤霉素对盐胁迫下谷子种子萌发的影响[J]. 作物杂志,2012(6):139-140.

[12]温福平,张 檀,张朝晖,等. 赤霉素对盐胁迫抑制水稻种子萌发的缓解作用的蛋白质组分析[J]. 作物学报,2009,35(3):483-489.

[13]薛志忠,吴新海. 赤霉素对盐胁迫下番茄种子萌发特性的影响[J]. 北方园艺,2011(15):59-61.

[14]Attree S M, Fowke L C. Embryogeny of gymnosperms; advances in synthetic seed technology of conifers[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 1993, 35(1):1-35.

[15]麦苗苗,石大兴,王米力,等. PEG 处理对连香树种子萌发与芽苗生长的影响[J]. 林业科学,2009,45(10):94-99.

[16]段慧荣,李 毅,马彦军. PEG 胁迫对沙冬青种子萌发过程的影响[J]. 水土保持研究,2011,18(3):221-225.

[17]于 军,焦培培. 聚乙二醇(PEG6000)模拟干旱胁迫抑制矮沙冬青种子的萌发[J]. 基因组学与应用生物学,2010,29(2):355-360.

[18]焦树英,李永强,沙依拉·沙尔合提,等. 干旱胁迫对 3 种狼尾

草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西北植物学报,2009,29(2):308-313.

[19]邱鹏飞,何炎红,田有亮. 赤霉素浸种对沙冬青种子萌发的影响[J]. 现代农业科技,2010(3):221-222,225.

[20]张海波,刘 彭,刘立鸿,等. 新疆短命植物小拟南芥(*Arabidopsis pumila*)种子萌发特性及其生态适应性[J]. 生态学报,2007,27(10):4310-4316.

[21]杨成华,李贵远,邓伦秀,等. 贵州百里杜鹃保护区的杜鹃属植物种类及其观赏特性研究[J]. 西部林业科学,2006,35(4):14-18,39.

[22]王孜昌,陈 训,黄家勇,等. 贵州百里杜鹃景区最主要杜鹃花种的开花习性与花期规律研究[J]. 贵州林业科技,2010,38(2):20-23,57.

[23]陈 文,马瑞君,王桔红. 盐和 PEG 模拟干旱胁迫对沙米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(4):113-119.

[24]尹昌喜,汪献芳,金 莉,等. 赤霉素对盐胁迫下水稻种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(14):6389-6390,6447.