

模拟大气镉沉降量对空心菜种子发芽的影响

杜锦梦, 易秀, 崔键, 王巍, 常雅军, 刘晓静, 姚东瑞

引用本文:

杜锦梦, 易秀, 崔键, 等. 模拟大气镉沉降量对空心菜种子发芽的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 287–299.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0793>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高氯酸盐与铅复合污染对8种空心菜幼苗生长的影响

张茹, 陈桂葵, 黎华寿, 贺鸿志, 张泽民

农业环境科学学报. 2015(3): 415–423 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.002>

微塑料和镉及其复合对水稻种子萌发的影响

王泽正, 杨亮, 李婕, 付东东, 胡维薇, 范正权, 彭丽成

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 44–53 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0560>

不同品种空心菜对重污染土壤砷的吸收累积及其亚细胞分布

崔星怡, 秦俊豪, 李智鸣, 黎华寿

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 24–31 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1009>

酸、Cd胁迫对宽叶雀稗种子萌发、幼苗生长及亚细胞结构的影响

赵雅曼, 陈顺钰, 张韵, 姜云, 侯晓龙, 蔡丽平

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 60–69 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1025>

冷等离子体种子处理对铜胁迫下小麦种子萌发与幼苗生长的影响

邓敏, 赵玲, 滕应, 刘方, 徐勇峰, 任文杰, 孟珂, 马文亭

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2669–2677 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0651>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杜锦梦, 易秀, 崔健, 等. 模拟大气镉沉降量对空心菜种子发芽的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 287–299.

DU Jin-meng, YI Xiu, CUI Jian, et al. Effects of simulated atmospheric Cd deposition flux on seed germination of water spinach[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 287–299.



开放科学 OSID

模拟大气镉沉降量对空心菜种子发芽的影响

杜锦梦^{1,2,3,4}, 易秀^{1,4}, 崔健^{2,3*}, 王巍^{2,3}, 常雅军^{2,3}, 刘晓静^{2,3}, 姚东瑞^{2,3}

(1. 长安大学水利与环境学院, 西安 710054; 2. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 南京 210014; 3. 江苏省水生植物资源与水环境修复工程研究中心, 南京 210014; 4. 长安大学旱区水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 大气镉沉降严重威胁蔬菜安全生产, 揭示其对种子发芽的影响能够为相关防控政策的制定提供依据。本研究以南京市市场6个主流空心菜品种(白骨大叶、白骨柳叶、柳叶、双机竹叶、特选泰国和正宗三叉)为研究对象, 设置3个大气镉沉降梯度(3.0、9.0、18.0 mg·m⁻²)进行了7 d种子发芽实验。结果表明: 大气镉沉降量使白骨大叶和双机竹叶的发芽峰值日提早1 d, 分别显著降低白骨大叶的发芽势和白骨大叶、白骨柳叶、特选泰国空心菜种子的根长及后两者的根长活力指数, 而显著提高柳叶的发芽势、发芽指数、根长和鲜质量两种活力指数及双机竹叶的活力指数。相关性分析发现, 大气镉沉降量与白骨柳叶种子的根长活力指数显著负相关, 与柳叶种子的根长活力指数呈显著正相关, 与白骨大叶和双机竹叶种子的烂根率呈显著负相关。白骨柳叶和柳叶种子的发芽受大气镉沉降量的影响较大, 主要是种子根发育受到大气镉沉降量的影响, 且适量的大气镉沉降可以缓解白骨大叶和双机竹叶种子的烂根状况; 特选泰国和正宗三叉品种的发芽情况受大气镉沉降量的影响不明显。

关键词: 大气镉沉降量; 空心菜; 种子发芽; 发芽动力学

中图分类号: S636.9; X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2021)02-0287-13 **doi:** 10.11654/jaes.2020-0793

Effects of simulated atmospheric Cd deposition flux on seed germination of water spinach

DU Jin-meng^{1,2,3,4}, YI Xiu^{1,4}, CUI Jian^{2,3*}, WANG Wei^{2,3}, CHANG Ya-jun^{2,3}, LIU Xiao-jing^{2,3}, YAO Dong-rui^{2,3*}

(1. School of Water Conservancy and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing Botanical Garden, Meng Sun Yat Sun, Nanjing 210046, China; 3. Jiangsu Engineering Research Center of Aquatic Plant Resources and Water Environment Remediation, Nanjing 210046, China; 4. Key Laboratory of Hydrology and Ecological Effects of Ministry of Education of Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Atmospheric Cd deposition seriously threatens the safety of vegetable production and the effect on seed germination could be benefit to formulate relevant prevention and control policies. In this study, six mainstream water spinach varieties in Nanjing market [white bone big leaf (WBB), white bone willow leaf (WBW), willow leaf, shuangji bamboo leaf (SJB), special Thailand, and authentic trident] were evaluated, and three gradients of Cd deposition flux (3.0, 9.0 mg·m⁻², and 18.0 mg·m⁻²) were set up for a 7-day seed germination experiment. It was found that these three Cd deposition fluxes reached the peak germination for WBB and SJB one day earlier than CK, which significantly reduced the germination potential of WBB; the root length of WBB, WBW, and special Thailand; and the root length vitality index of WBW and special Thailand. It significantly increased the germination potential, germination index, root growth vitality index, and fresh weight vitality index of willow leaf, as well as the vitality index of SJB. Correlation analysis found that atmospheric Cd

收稿日期: 2020-07-12 录用日期: 2020-09-27

作者简介: 杜锦梦(1995—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 从事重金属环境界面行为研究。E-mail: 1258831784@qq.com

*通信作者: 崔健 E-mail: jcui@cnbg.net

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41977333); 江苏省中国科学院植物研究所博士人才科研启动基金项目(KSPKLB201902)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41977333); The Foundation for Doctor Talents in Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy Sciences(KSPKLB201902)

deposition fluxes were significantly negatively and positively correlated with the root growth vitality index of both WBW and willow leaf, respectively, and were significantly negatively correlated with the root rot rate of both WBB and SJB. The germination of both WBW and willow leaf was greatly affected by atmospheric Cd deposition flux. A suitable amount of Cd deposition flux could alleviate the root rot condition of the seeds of SJB; the germination status of special Thailand and authentic trident varieties were not significantly affected by atmospheric Cd deposition flux.

Keywords: atmospheric Cd deposition flux; water spinach; seed germination; germination kinetics

我国是农业大国,农田是我国最重要的资源,近年来农田重金属污染及相关食品安全问题受到广泛关注^[1-3]。据报道,我国农田土壤重金属污染每年造成的损失达200多亿元^[4],部分区域稻米和蔬菜镉严重超标^[5-8],这与我国土壤镉点位超标率居土壤无机污染之首有关。农田镉污染的来源很多,越来越多的研究发现,大气镉沉降已成为农田镉累积的重要来源^[9-10]。据统计,每年我国镉沉降输入 $0.24\sim 19.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,占农田镉输入的34%~90%^[11-16]。此外,镉具有强毒性和高迁移性,对人体的危害较大^[5,9,17-18]。因此,探索大气镉沉降及其农田生态环境效应、食品安全风险和机理,对大气与土壤环境交叉学科的理解和农田镉污染防控都具有重要意义。

种子的芽对外界环境的变化极其敏感,其发芽情况会直接影响植物后期的生长状况^[19]。种子发芽的源动力来自其吸胀作用,在水分进入种子内部的同时,镉也会随之进入,参与其生理代谢过程^[20-21]。研究发现,高浓度镉会降低生菜、桑树、小麦种子的发芽率、发芽指数和活力指数^[19,22-23],而低浓度镉则作用相反^[19,24]。即使相同镉浓度,不同的蔬菜品种甚至同一蔬菜的不同基因型对镉的累积或响应也不尽相同^[6-7,25-27]。这为镉污染土壤的低镉蔬菜品种筛选或超富集植物的发展提供一个新途径。因此,开展大气镉沉降对种子发芽的相关研究,有利于进一步认识大气镉沉降的生态效应,同时,为大气镉沉降找到一种植物预警方式。

空心菜(*Ipomoea aquatica* Forsk.),学名蕹菜,是一年生的旋花科植物,可水陆两生,因其营养丰富、适应性强、采收期长、口感好而备受人们的喜爱,而该蔬菜对重金属具有较高的累积能力^[28-30],其食用的安全性一直备受关注^[21,31-33]。此外,空心菜的品种众多,不同品种对镉的响应是不同的^[23-24,34]。然而有关大气镉沉降对不同品种空心菜尤其是对种子发芽影响的认知仍存在一定的局限性。因此,本研究根据近年来大气镉沉降量范围,设置低、中、高3个镉沉降量梯度,选择不同空心菜品种进行种子发芽实验,根据种子的

发芽势、发芽率、发芽指数及活力指数筛选出对镉耐受性最强和最弱的品种,并根据7 d的发芽情况进行发芽动力学分析^[35-36],以为空心菜的安全生产及后期实验提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试剂 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$,用于配制模拟大气镉沉降通量溶液,来自源叶生物有限公司。

空心菜种子购自南京市金盛达种子有限公司,共6个品种,分别为白骨大叶、白骨柳叶、柳叶、双机竹叶、特选泰国和正宗三叉。各品种的特性见表1。

1.2 实验设计

根据前期的研究结果,每年我国大气镉沉降的通量为 $0.24\sim 19.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[14,37]。在此基础上,设置本研究模拟大气镉沉降通量为0、3.0、9.0、18.0 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的4份种子发芽的培养液,标记为D0、D3、D9、D18,每个处理3次重复。在超净工作台,将处理后的种子,每30粒放入一个铺有两层脱脂棉且灭菌后的培养皿(直径9 cm)中,再加入以上4份镉培养液,移至已灭菌后的光照培养箱中恒温($25\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$)培养。此后,每隔24 h在超净工作台以去离子水补给培养皿中溶液蒸发和

表1 不同品种空心菜的特点

Table 1 Characteristics of different varieties of water spinach

品种 Varieties	品种特性 Variety characteristics
白骨大叶	耐热、耐寒,播种35 d起即可采收,株形半开半立,抽苔较晚,叶片宽大稍椭圆,绿色,茎白绿色,产量高,品质嫩
白骨柳叶	生长特快,播种至收获20~25 d;耐热、耐湿、抗病;叶片柳叶状,青绿色,茎白绿色,质脆,产量高
柳叶	茎蔓生,近圆形,空心;叶片卵尖形,绿色,主茎淡绿色,播种至收获25 d,产量高
双机竹叶	叶片绿色呈竹叶状,秆淡绿色,播种至收获22~35 d,优质高产,食味佳,口感脆嫩
特选泰国	根系发达,播种至20~30 d即可采收,植株较直立,秆为淡青色,叶片绿色、稍宽呈尖形竹叶状,食用脆嫩
正宗三叉	叶片大,梗粗,为淡青色,根系发达,叶较宽长形稍椭圆,叶色绿,播种至收获20~35 d,产量高

种子发芽所需水分,并记录发芽种子(胚根超过种子自身长度的一半)的个数、根长和形态,处理霉烂种子(95%酒精消毒后放回原处继续观察,将严重霉烂的种子挑出,以避免感染其他种子,并将其统计为未发芽种子)。

1.3 试验方法

1.3.1 种子预处理

从每个品种空心菜中,选择颗粒饱满、大小一致种子,用密封袋分装好。试验开始前,用0.2% CuSO₄溶液分别在小烧杯中消毒15 min,为防交叉感染,每个品种在对应的小烧杯中单独消毒。然后,将其在超净工作台上用无菌水反复冲洗数次,再用吸水纸将水吸干,放到密封袋中,待用。

1.3.2 大气镉沉降量配制

由于大气镉沉降量比较小,为保证称量的准确性,故将本实验模拟大气镉沉降量所用的镉试剂一次称量后,溶于水溶液进行配制。以D3为例配制培养液:沉降通量为D3的共有18个培养皿,以18个培养皿的面积计算出18个培养皿需要的CdCl₂·2.5H₂O的质量,加入36 mL去离子水,混匀后,每个培养皿加2 mL培养液。

1.3.3 测定指标及方法

(1)发芽势是评判测试种子的发芽速度和整齐度的重要指标,是在种子发芽过程中,日发芽种子数达到最高峰时发芽的种子数占供试种子数的百分率,其计算公式为:

发芽势=日发芽数峰值时发芽种子粒数/供试种子粒数×100%

(2)发芽率是评判种子质量好坏的重要指标,它是指发芽实验结束时测试种子的发芽数占测试种子总数的百分比,能近似地反映出苗率。空心菜种子发芽时间一般为7 d^[29,38-39],故发芽率的计算公式为:

发芽率=试验完成时(7 d)全部发芽种子粒数/供试种子粒数×100%

(3)根由种子的胚根发育而来,根长和鲜质量可以反映种子对外界环境的响应能力。其测定方法为:种子置床后第9 d,用直尺测定每株幼苗根的平均长度(mm);用电子天平(精度0.001 g)测定幼苗的鲜质量,每个处理随机选取10株幼苗测定,以其总质量除以种子数,得到每个处理的平均鲜质量。

(4)发芽指数和活力指数是体现种子对环境抗逆能力差异的重要指标,前者是发芽率指标的细化和深化,后者是种子发芽速率和生长量的综合反映,二者

放大了种子活力的特征,使好坏种子的差异加大。本文使用根长和鲜质量两个指标进行活力指数的计算,分别记为根长活力指数和鲜质量活力指数。具体计算公式为:

发芽指数(GI)= $\sum (G_t/D_t)$ (G_t为t时间内的发芽数,D_t为相应的发芽天数)

活力指数=种苗生长量(平均根长或平均鲜质量)×发芽指数

(5)发芽动力学曲线,可以直观地表现出种子发芽过程中发芽速度的快慢和发芽时间,以及大气镉沉降量对其发芽速度的影响。通过发芽时长与对应日发芽数量绘制而出的变化曲线。

(6)相关性分析,可以衡量两个变量因素的相关密切程度。本文中用于衡量各个发芽指标与大气镉沉降量之间的相关性。

1.4 数据处理

采用SPSS 26.0软件对数据进行单因素方差分析、LSD多重比较和相关性统计分析,Origin 2018软件对数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 模拟大气镉沉降量对空心菜种子发芽势及发芽率的影响

图1为模拟大气镉沉降量处理下6个品种空心菜种子的日发芽数。由图可知,无镉沉降处理下,供试空心菜种子的日发芽数峰值出现在第2~4 d,其中品种柳叶的最早,为第2 d;白骨大叶和双机竹叶的最迟,为第4 d。大气镉沉降处理下,供试空心菜种子的日发芽峰值类似,仅白骨大叶和双机竹叶两个品种在D3和D18处理的日发芽峰值提早1 d。可见,柳叶空心菜种子具有发芽快速的优势,而白骨大叶和双机竹叶空心菜种子的发芽峰值受大气镉沉降量的影响较大。

基于空心菜种子7 d的发芽情况,分别估算了不同大气镉沉降量下6个品种的发发芽势和发芽率(图2A、图2B)。从图2A可见,白骨柳叶品种的发发芽势为78.89%~84.44%,显著高于其他品种($P<0.05$),且随大气镉沉降量的增加,其发芽势虽有波动,但差异不显著($P>0.05$),说明白骨柳叶种子的发芽速度较快,整齐度较高。特选泰国品种的发发芽势次之,且受镉沉降量的影响较小。柳叶和正宗三叉的发发芽势相当,但受大气镉沉降量升高的影响,柳叶的发发芽势递增,且D9和D18处理的发芽势显著高于D0处理;正宗三叉

的发芽势随大气镉沉降量升高而波动,D3处理显著高于D9处理。双机竹叶和白骨大叶的发芽势受大气镉沉降量的影响相似,都随镉沉降量增加而波动下

降,D3和D18处理的发芽势显著低于D0处理。可见,大气镉沉降量对空心菜种子发芽势的影响与种子本身特性关系较大。

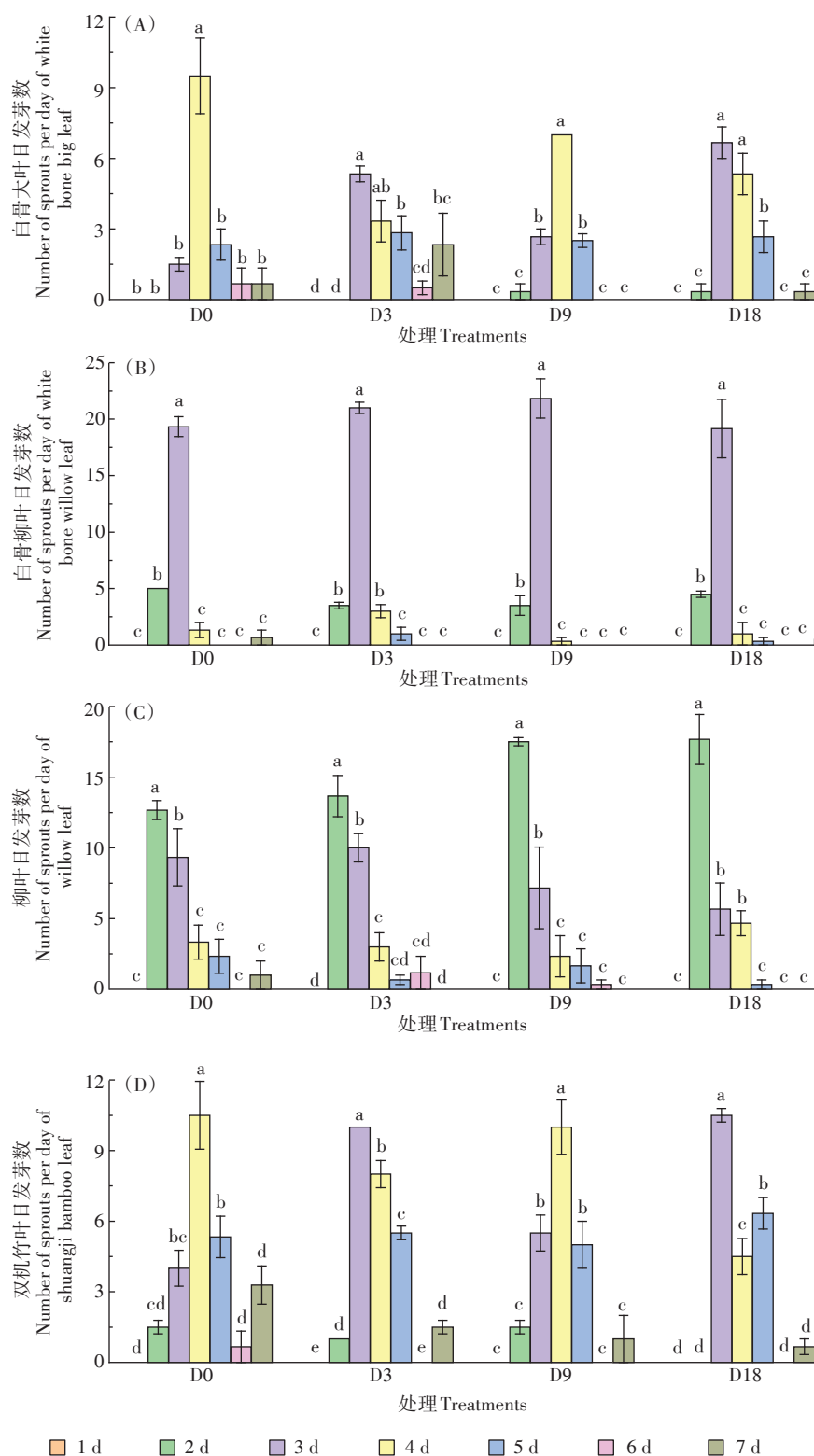
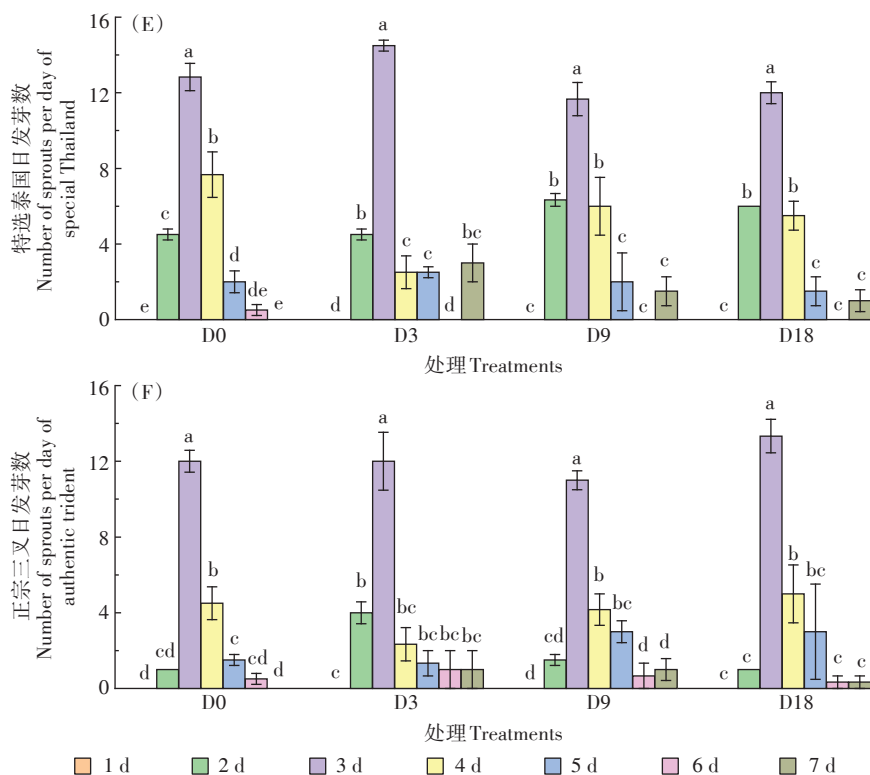


图1 大气镉沉降量对空心菜种子日发芽数的影响

Figure 1 Effects of atmospheric Cd deposition fluxes on the daily germination number of water spinach seeds



不同字母代表相同处理下不同品种间差异显著
Different letters indicate significant differences among varieties in the same treatment

续图1 大气镉沉降量对空心菜种子日发芽数的影响

Continued figure 1 Effects of atmospheric Cd deposition fluxes on the daily germination number of water spinach seeds

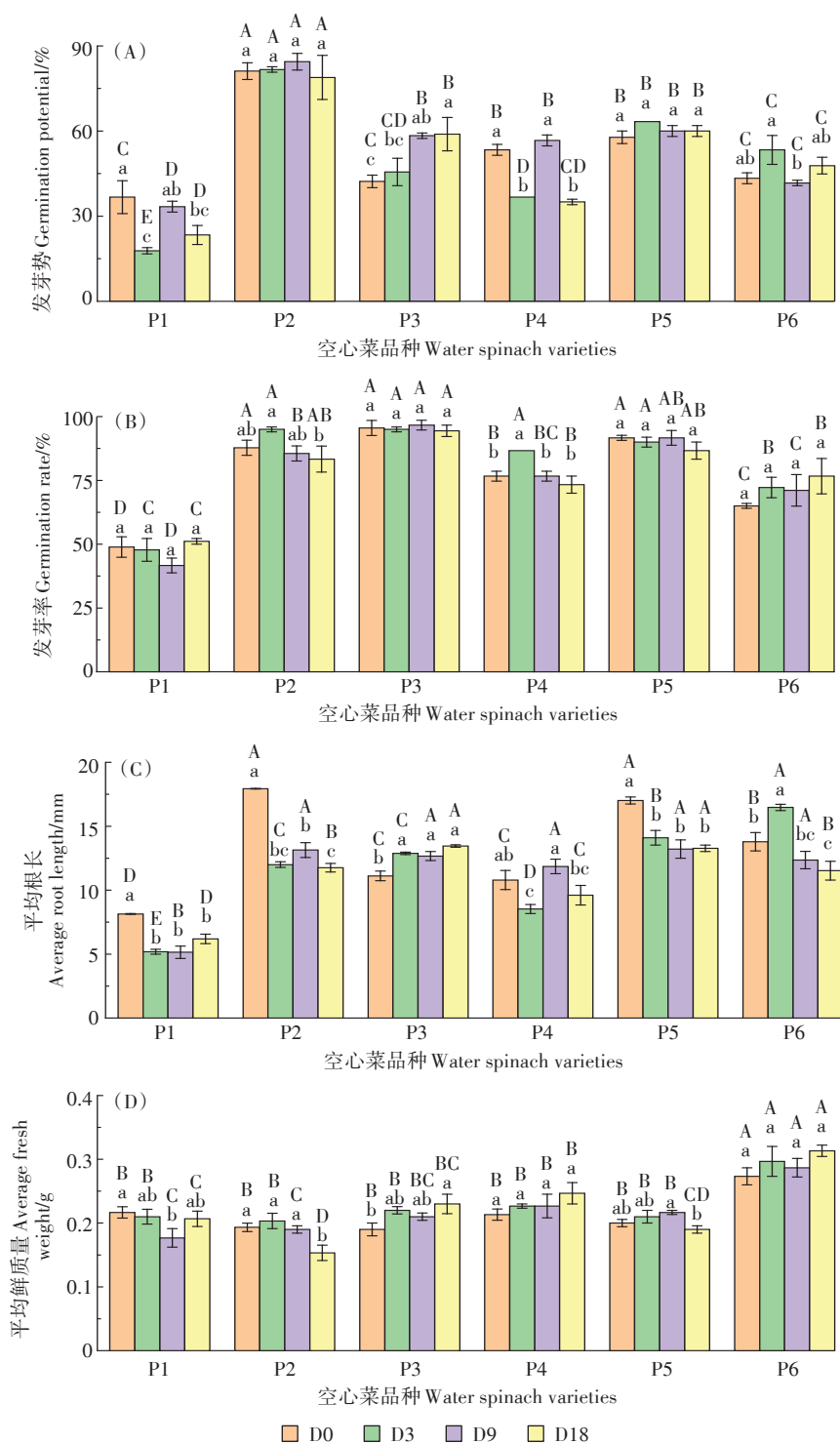
从图2B可见,品种柳叶、特选泰国和白骨柳叶的种子发芽率最高(87.78%~95.56%),且三者无明显差异($P>0.05$),而白骨大叶的最低,仅为48.89%,显著低于其他5个处理,说明前者种子质量较好,后者则较差。随着大气镉沉降量的增加,白骨柳叶和双机竹叶的种子发芽率呈先增后降的趋势,且D3处理的发芽率显著高于D18处理的;而其他4种的发芽率虽有波动,但无明显差异。可见,白骨柳叶和双机竹叶的种子发芽率对大气镉沉降量相对敏感。

2.2 模拟大气镉沉降量对空心菜种子根长和鲜质量的影响

第9 d,大气镉沉降量模拟下6个品种空心菜种子的平均根长如图2C所示。D0处理下,白骨柳叶和特选泰国的根长最长,分别为17.93 cm和17.01 cm,显著高于其他4个品种;白骨大叶的最短,为8.14 cm,显著低于其他5个品种的($P<0.05$)。随着大气镉沉降量的增加,除柳叶外,其他5个空心菜品种的根长均受到不同的抑制,尤以白骨大叶、白骨柳叶和特选泰国的最为明显,都与D0处理间差异显著(图2C, $P<$

0.05)。值得一提的是,大气镉沉降量刺激了柳叶空心菜根的生长;在D18处理时,柳叶和特选泰国的根长显著高于白骨大叶的。可见,6个品种空心菜种子发芽的根长对大气镉沉降量都比较敏感。

由图2D可知,D0处理下,正宗三叉种子发芽鲜质量为0.27 g,显著高于其他5个品种,且这5个品种鲜质量间无显著差异($P>0.05$)。随着镉沉降量的增加,白骨大叶和白骨柳叶的鲜质量受到一定的抑制,特选泰国则先增加后降低,柳叶、双机竹叶和正宗三叉受到不同程度的刺激而增重。方差分析发现,同一品种下,白骨大叶D9处理的鲜质量显著低于D0处理,白骨柳叶D18处理显著低于其他3个处理,柳叶D18处理显著高于D0处理,特选泰国D18处理显著低于D9处理,双机竹叶和正宗三叉各处理间无显著差异;不同品种下,D0和D3处理各品种的鲜质量无明显差异,而D9处理下白骨大叶和白骨柳叶的鲜质量显著低于其他4个品种,D18处理下白骨柳叶的鲜质量最低且显著低于其他品种(特选泰国品种除外)。可见,大气镉沉降量对双机竹叶和正宗三叉种子发芽的



图中不同小写字母代表同一品种不同大气镉沉降量处理下各种子发芽指标间的差异显著水平($P < 0.05$),不同大写字母表示同一大气镉沉降量处理下不同品种发芽指标间的差异显著水平($P < 0.05$);P1、P2、P3、P4、P5和P6分别代表白骨大叶、白骨柳叶、柳叶、双机竹叶、特选泰国和正宗三叉空心菜品种。下同

Different lowercase letters in the figure represent the significant levels of differences in germination indicators of the same varieties under different atmospheric Cd deposition fluxes ($P < 0.05$). Different capital letters with a different color indicate the significant level of difference in germination indicators of different varieties under the same atmospheric Cd deposition flux treatment ($P < 0.05$); P1, P2, P3, P4, P5 and P6 represent the white bone big leaf, the white bone willow leaf, the willow leaf, the shuangji bamboo leaf, the special Thailand and the authentic trident water spinach varieties. The same below

图2 模拟大气镉沉降量对6个品种空心菜发芽势、发芽率、平均根长和平均鲜质量的影响

Figure 2 Effects of atmospheric Cd deposition flux on the germination potential, germination rate, average root length and average fresh weight of six varieties of water spinach

鲜质量影响较小,而对白骨柳叶和柳叶则相对较大。

2.3 模拟大气镉沉降量对空心菜种子发芽指数和活力指数的影响

模拟大气镉沉降量对6个品种空心菜种子的发芽指数和活力指数的影响见图3。从图3A可知,柳叶空心菜的发芽指数最大(10.89~12.11),白骨大叶空心菜的发芽指数最小(3.31~4.30),可见柳叶空心菜种子发芽能力较强而白骨大叶的较弱。随着镉沉降量的增加,白骨柳叶和正宗三叉种子的发芽指数变化差异不显著($P>0.05$);柳叶、双机竹叶和白骨柳叶的发芽指数呈现先增后降的趋势,且双机竹叶D3处理和柳叶D9处理均显著高于D0处理($P<0.05$),而白

骨大叶的变化趋势却与此相反;正宗三叉种子的发芽指数呈现增-降-增的趋势,而特选泰国种子的则与此相反。可见,白骨大叶、柳叶和双机竹叶种子的发芽指数受镉沉降量的影响较大,对环境的抗逆能力较弱。

由图3B可知,6个品种空心菜种子发芽的根长活力指数的大小顺序大致为柳叶>特选泰国>白骨柳叶>正宗三叉>双机竹叶>白骨大叶,可见柳叶空心菜种子的生长速度较快,白骨大叶则相反。D0处理下,白骨柳叶种子的根长活力指数最大(168.10),而白骨大叶的最小(28.89),且各品种间差异显著($P<0.05$)。随着镉沉降量的增加,白骨柳叶和特选泰国的根长

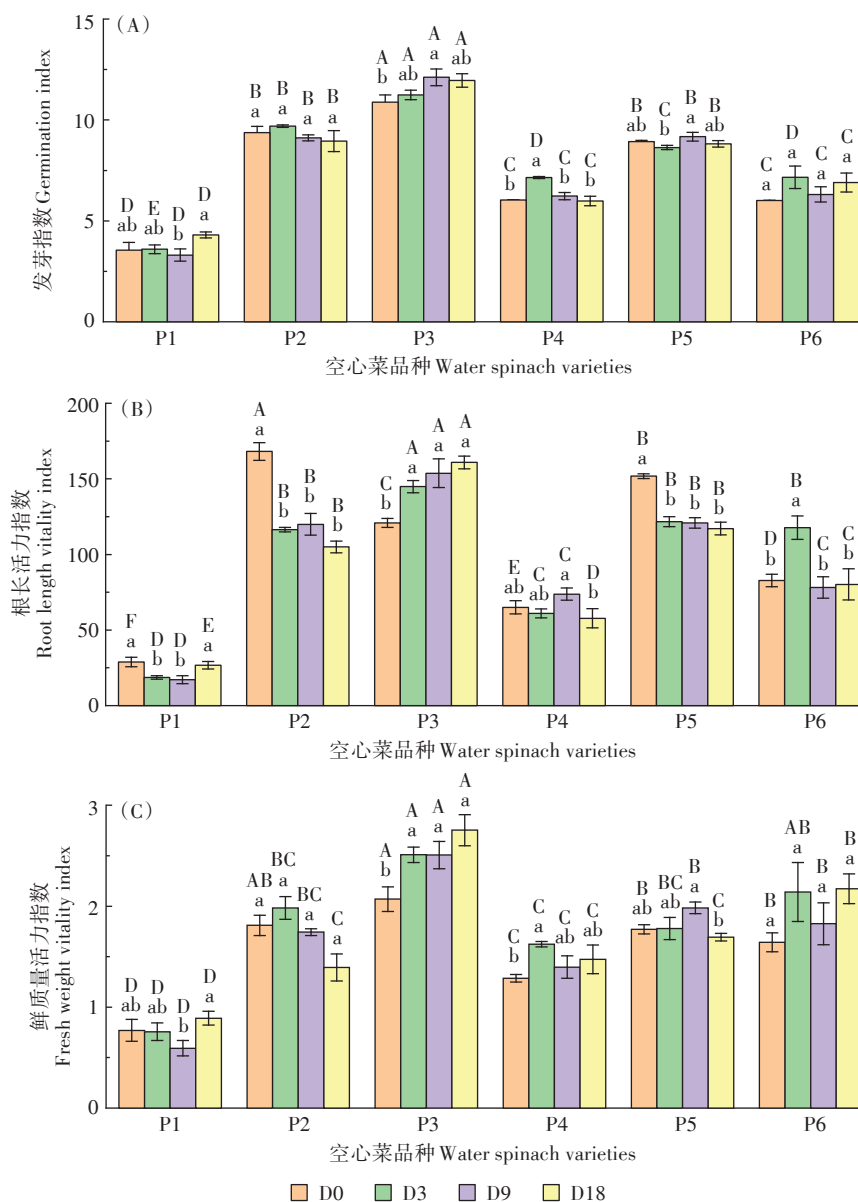


图3 模拟大气镉沉降量对空心菜发芽指数和活力指数的影响

Figure 3 Germination index and vitality index of different varieties of water spinach under atmospheric Cd deposition flux treatment

活力指数显著下降,双机竹叶的波动下降,而柳叶的则显著上升,白骨大叶的先显著下降后显著上升,正宗三叉的在D3时达到最大且与其他3个处理差异显著。可见,白骨柳叶、特选泰国和柳叶的根长活力指数受镉沉降量的影响较大,白骨柳叶和正宗三叉受低镉沉降量的影响较大,而双机竹叶受影响则相对较小。

从图3C可知,柳叶的种子发芽鲜质量活力指数最高(2.07~2.75),白骨大叶的最低(0.59~0.89)。随着镉沉降量的增加,白骨柳叶、特选泰国和正宗三叉种子鲜质量活力指数的变化差异不显著,柳叶显著增加,双机竹叶在D3时最大,且与D0处理间差异显著($P < 0.05$)。可见,大气镉沉降量对柳叶和双机竹叶种子发芽的鲜质量活力指数影响较大,且低水平镉沉降量对双机竹叶的影响显著,而对其他品种的影响不显著,说明柳叶和双机竹叶种子对大气镉沉降量变化的抗逆能力较弱。

2.4 不同品种空心菜种子的发芽动力学研究

模拟大气镉沉降量处理下不同品种空心菜种子的发芽动力学趋势大致符合“S”曲线,第1~3 d处于指数期,第3~4 d处于线性期,第4~7 d处于稳定期,见图4。D0处理下,白骨大叶和双机竹叶比其他品种晚1 d进入线性期,说这两个品种的种子发芽较晚;白骨柳叶、特选泰国和正宗三叉比其余品种早1 d进入稳定期,说明这3个品种的种子发芽时间较短。镉沉降量处理下,白骨大叶在第2~3 d的发芽动力学曲线的斜率大于D0处理,此现象也发生在柳叶、双机竹叶及D18处理正宗三叉的第2~4 d,说明镉沉降量促进了这4种空心菜的发芽速度;D3处理延迟白骨大叶和白骨柳叶的发芽时间至第5 d(图4A、图4B),延迟双机竹叶和泰国的至第7 d(图4D、图4E);D18处理提早柳叶和双机竹叶的发芽时间至第5 d(图4C、图4D);D9基本与D0相似,说明低水平镉沉降量(D3)可延迟白骨大叶、白骨柳叶、双机竹叶和泰国空心菜种子的发芽时间,高水平镉沉降量(D18)可提早2 d柳叶和双机竹叶的发芽时间。

2.5 模拟大气镉沉降量与空心菜种子发芽指标的关联性分析

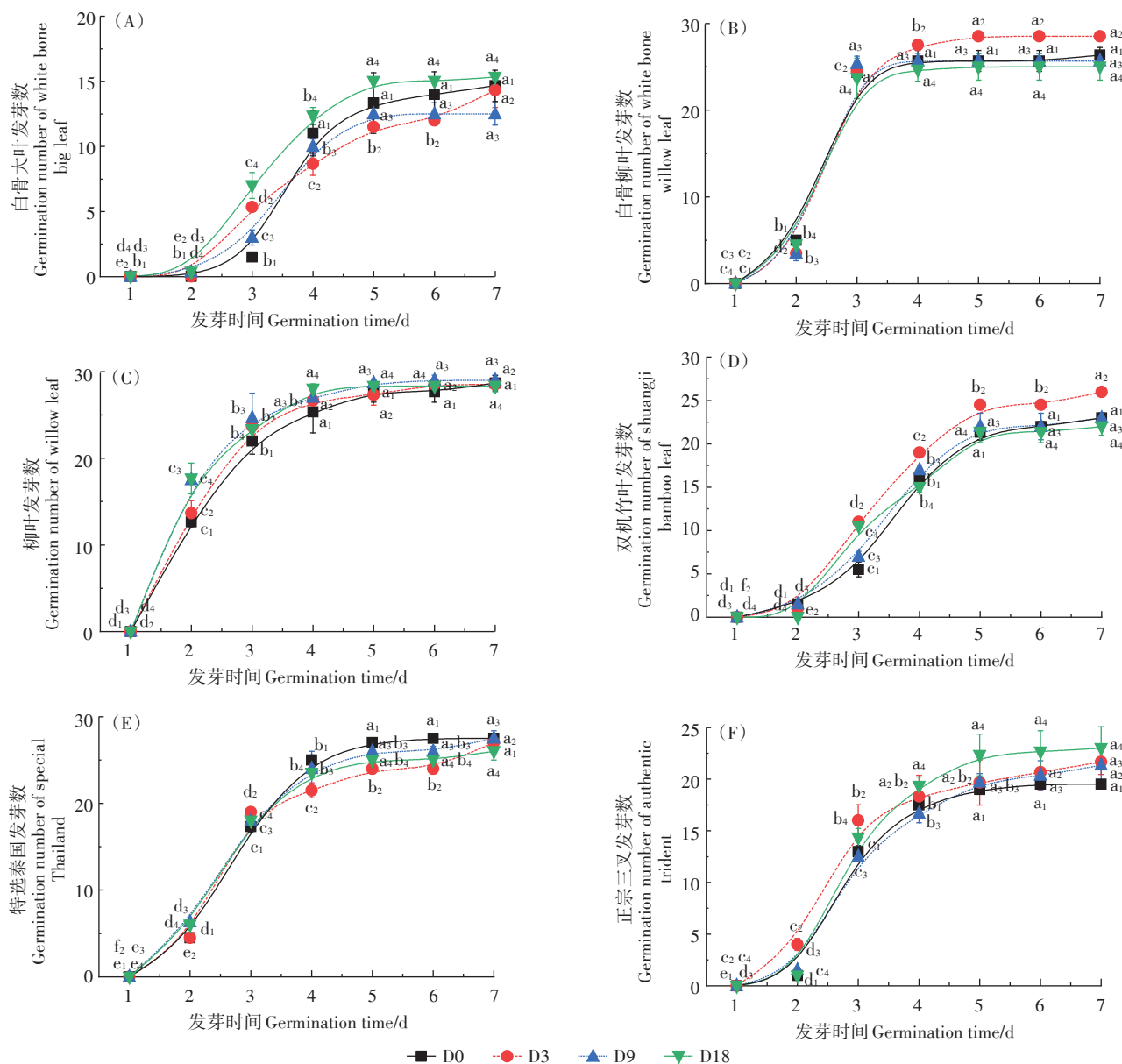
模拟大气镉沉降量与空心菜种子发芽指标的关联性,结果见表2。由表2可知,大气镉沉降量与空心菜种子发芽指标的相关性受品种的影响较大。镉沉降量分别与白骨柳叶种子发芽的平均鲜质量、根长活力指数和鲜质量活力指标间呈显著负相关,与正宗三

叉的平均根长呈显著负相关,而与柳叶的发芽势、发芽指数、平均根长和根长活力指数呈显著正相关($P < 0.05$),与其他品种的种子发芽指标间无显著相关($P > 0.05$)。可见,大气镉沉降量主要是通过影响根的生长而作用于种子的发芽,分别抑制和促进了白骨柳叶和柳叶种子的发芽,而对其他4个品种的影响较小。

3 讨论

种子的萌发是植物生命的起点,种子发芽的情况直接决定植物后期生长的状况,而研究胁迫条件下种子发芽,可在一定程度上为植物环境的适应性提供理论依据^[38,40]。本研究通过模拟大气镉沉降量进行6种空心菜种子发芽实验发现:柳叶的发芽情况最好,日发芽数、发芽率、发芽指数及两种活力指数均最高,说明其不仅发芽快、均匀,而且种子的活力也较好,但其受大气镉沉降量的影响较大;其次是泰国和白骨柳叶空心菜,除了白骨柳叶的发芽势显著高于其余5个品种外,二者的各项指标均相差较小,这与朱丽霞^[38]和李富荣等^[39]的研究结果相似;白骨大叶的发芽情况最差,其各项指标均最低,这可能是因为白骨大叶种子活力较弱;双机竹叶空心菜虽然对镉沉降量比较敏感,但其发芽情况较差;正宗三叉空心菜种子则对镉沉降量敏感性最弱,这可能与不同品种空心菜的特性有关。

随着大气镉沉降量的增加,白骨大叶的发芽势、白骨柳叶的发芽势、发芽指数和鲜质量活力指数、柳叶的发芽率、双机竹叶的鲜质量、特选泰国的发芽势和发芽率及正宗三叉的发芽率、鲜质量、发芽指数和鲜质量活力指数没有显著差异,这可能是因为上述空心菜种子在发芽前期主要依靠自养,外界重金属离子大部分被阻止在种皮层,不能进入种子内部,从而对其影响较小^[41]。柳叶的发芽势及两种活力指数均呈现逐渐增加的趋势,且其平均根长和鲜质量及发芽指数均高于D0处理,这可能是因为镉的浓度较低,低镉对柳叶空心菜起到了促进作用。特选泰国的平均根长及根长活力指数呈现出逐渐减少的趋势,说明重金属镉会抑制根的生长,这与先前的研究相似^[42-46],可能是因为镉离子抑制种子内储藏的淀粉和蛋白质分解,从而影响种子发芽所需的物质和能量,致使种子发芽受阻^[47]。但特选泰国的平均鲜质量和鲜质量活力指数却出现先增加后减少的趋势,这与李富荣等^[39]的研究结果不同,可能是因为种子吸水发芽时,胚根最先突破种皮,使其重金属的积累量较大,受胁迫时



图中小写字母不同的下标代表不同的浓度,1代表D0,2代表D3,3代表D9,4代表D18;带有相同下标的小写字母表示该浓度下发芽数之间的差异显著($P<0.05$)

Different subscripts of lowercase letters in the figure represent different concentrations, 1 for D0, 2 for D3, 3 for D9, and 4 for D18; different lowercase letters with the same subscript indicate that the differences among the number of germination at this concentration are significant at $P<0.05$

图4 模拟大气镉沉降量对空心菜种子发芽的动力学曲线

Figure 4 Kinetic curve of simulated atmospheric Cd deposition flux on the germination of water spinach seeds

间较长,所以对根长的抑制作用较为明显,而鲜质量受到的影响较小,表现为先促进后抑制的作用;本研究设置的镉沉降量与李富荣等^[39]的不同,所以研究结果有所不同。白骨柳叶的发芽率、平均鲜质量、发芽指数及鲜质量活力指数呈现出先增加后减少的趋势,这与朱丽霞等^[38]和祝社民^[48]的研究相似,可能是因为低浓度的镉会促进空心菜的发芽,而高浓度的镉抑制空心菜的发芽;其根长和根长活力指数显著低于D0

处理,与泰国空心菜相似,可能是因为这两个品种的根长均受到沉降镉的抑制作用,而根长活力指数与根长相关,所以也降低。双机竹叶在D3和D18处理下的发芽势及3个镉沉降量下的根长均显著低于D0,但D3处理下的发芽率、发芽指数和鲜质量活力指数却显著高于对照,这说明与其他指标相比,根长对外界环境的改变比较敏感,且“低促高抑”在此也有体现,这与特选泰国空心菜的结果相似。

表2 大气镉沉降量与不同品种空心菜种子发芽指标的相关性

Table 2 Correlations of atmospheric Cd deposition flux and various parameters of water spinach seed germination

项目 Items	白骨大叶 White bone big leaf	白骨柳叶 White bone willow leaf	柳叶 Willow leaf	双机竹叶 Shuangji bamboo leaf	特选泰国 Special Thailand	正宗三叉 Authentic trident
发芽势	-0.270	-0.115	0.724*	-0.422	0.118	-0.064
发芽率	0.124	-0.423	-0.054	-0.298	-0.117	0.421
发芽指数	0.529	-0.399	0.612*	-0.228	0.257	0.194
平均根长	-0.277	-0.642	0.771**	-0.108	-0.630	-0.670*
平均鲜质量	-0.095	-0.852**	0.203	0.533	-0.418	0.534
根长活力指数	0.031	-0.822*	0.794**	-0.312	-0.538	-0.412
鲜质量活力指数	0.483	-0.786*	0.597	0.054	-0.113	0.357
烂根率	-0.863**	0.291	0.414	-0.710*	0.115	0.684

注:**表示相关性极显著 $P<0.01$; *表示相关性显著 $P<0.05$ 。

Note: ** means the correlation is extremely significant $P<0.01$; * means the correlation is significant $P<0.05$.

种子发芽是种子从吸胀作用开始的一系列有序的生理过程和形态发生过程^[42],这是一个动态的变化过程,因此,进行发芽动态分析是非常有意义的。从6个品种的发芽动力学曲线来看,空心菜在第2~4 d时是发芽快速期,且大部分品种是在D9和D18处理时发芽速度较快,这可能是因为镉会促进植物体内淀粉酶、过氧化氢酶等酶活性的表达,促进可溶性蛋白质的合成,可溶性蛋白质可增加细胞内含物渗透势,还能与重金属形成复合物,降低重金属的毒害效应,进而促进种子的发芽^[25,49-50]。低剂量的镉沉降会延迟空心菜种子的发芽时间,高剂量的镉沉降可提早2 d柳叶和双机竹叶的发芽时间,这可能是因为低镉沉降量会促进种子体内各种功能酶的合成,使其发芽时间延长,高镉沉降量则正相反^[50]。镉对空心菜的毒害机理主要是破坏线粒体和叶绿体,导致呼吸、光合作用减弱,叶片发黄,生物量下降^[51]。为研究镉沉降量对空心菜的毒害作用,本研究统计了6 d的烂根率,结果如表3所示。由表可知,镉沉降量对白骨柳叶和特选泰国空心菜的影响较大,而对柳叶和正宗三叉的烂根率没有显著影响($P>0.05$),这可能是因为前者对镉沉降量的变化较敏感,重金属镉进入植物根系后,会抑制根系透根电位和根系 H^+ 分泌及质子泵,根系的质子泵为细胞膜上的ATP酶所催化,是阴阳离子透过质膜的次级运转的动力来源,因而镉通过影响根系对阴阳离子的吸收平衡来影响根系代谢,从而导致烂根^[52]。相关性分析发现,镉沉降量与白骨大叶和双机竹叶种子的烂根率呈负显著相关($P<0.05$,表2),可能是因为二者对环境的抗逆能力较强。综上所述,说明镉沉降量对白骨柳叶和泰国种子发芽的影响时间较长,影响作用较强。这可能是因为重金属对植物的毒

表3 不同空心菜种子的烂根率

Table 3 Root rotten rate of different water spinach seeds

品种 Varieties	D0	D3	D9	D18
白骨大叶	0.55±0.02a	0.49±0.02b	0.43±0.00bc	0.42±0.02c
白骨柳叶	0.73±0.00c	0.87±0.00a	0.83±0.00b	0.82±0.02b
柳叶	0.87±0.04a	0.80±0.07a	0.77±0.12a	0.99±0.02a
双机竹叶	0.74±0.04a	0.57±0.06bc	0.70±0.00ab	0.43±0.02c
特选泰国	0.55±0.02b	0.45±0.02c	0.63±0.00a	0.57±0.00b
正宗三叉	0.75±0.02a	0.79±0.02a	0.80±0.03a	0.82±0.02a

注:表中数据为平均值±标准误;同一行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: The data in the table is the mean ± standard error; different lowercase letters in the same row indicate significant difference at $P<0.05$.

害效应随植物本身特性的不同而变化,且随胁迫时间的延长,受到毒害作用的程度也有所不同^[53]。

本研究的时间较短,没有涉及到种子发芽后幼苗的生长与生理。因此,在后期的研究中,有必要在本研究的基础上,再针对这些空心菜品种进行更深入的研究,以探讨大气镉沉降在空心菜体内的转移和累积机制,从而挑选出既满足环境友好,又产量高、品质好的空心菜品种。

4 结论与展望

通过大气镉沉降的3个通量梯度的恒温恒湿模拟,发现南京市场6个品种主流空心菜种子的发芽响应有一定的差异。

(1)大气镉沉降量通过影响种子根发育而影响其种子发芽情况,尤以白骨柳叶和柳叶受影响明显。大气镉沉降量与白骨柳叶种子的平均鲜质量、根长活力指数和鲜质量活力指数呈显著负相关,与柳叶的发芽

势、发芽指数、平均根长和根长活力指数呈显著正相关,而与其他4个品种的发芽指标无明显相关性(正宗三叉的平均根长除外)。

(2)大气镉沉降量与白骨大叶和双机竹叶种子发芽的烂根率呈显著负相关,说明大气镉沉降量的增加可缓解这两个品种的烂根率。

(3)发芽动力学分析表明低剂量的镉沉降量会延迟除柳叶和正宗三叉种子外其余品种的发芽时间,而高剂量的则提早柳叶和双机竹叶2 d的发芽时间。

参考文献:

- [1] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 153-159. XU Jian-ming, MENG Jun, LIU Xing-mei, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 153-159.
- [2] 刘晓青, 曹卫红, 周卫红, 等. 农田土壤重金属污染的生物修复技术研究现状、问题及展望[J]. 天津农业科学, 2018, 24(2): 80-85. LIU Xiao-qing, CAO Wei-hong, ZHOU Wei-hong, et al. Research status, problems and prospects of bioremediation technology for heavy metal pollution in farmland soil[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2018, 24(2): 80-85.
- [3] Goro T. Damage and heavy metal pollution in China's farmland: Reality and solutions[J]. *Journal of Contemporary East Asia Studies*, 2016, 5(1): 11-25.
- [4] 晓云. 我国土壤重金属污染[J]. 金属世界, 2000(2): 10. XIAO Yun. Soil heavy metal pollution in China[J]. *Metal World*, 2000(2): 10.
- [5] Ali H, Khan E, Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation[J]. *Journal of Chemistry*, 2019(4): 1-14.
- [6] 王佳, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆城区市售蔬菜重金属污染评价与健康风险评估[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 942-949. WANG Jia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, et al. Evaluation and health risk assessment of heavy metals pollution in vegetables sold in markets in Chongqing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(5): 942-949.
- [7] 高扬, 李琦, 许东升. 煤矿区果菜类蔬菜重金属富集特征及污染风险评估[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 64-70. GAO Yang, LI Qi, XU Dong-sheng. Enrichment characteristics and pollution risk assessment of heavy metals in fruit vegetable around coal mine[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2018, 38(5): 64-70.
- [8] Wang J J, Yi X, Cui J, et al. Nonlinear effects of increasing nitrogen deposition on rice growth and heavy metal uptake in a red soil ecosystem of southeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 1060-1067.
- [9] Cui J, Wang W Q, Peng Y, et al. Effects of simulated Cd deposition on soil Cd availability, microbial response, and crop Cd uptake in the passivation-remediation process of Cd-contaminated purple soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 683: 782-792.
- [10] Zhou J, Du B Y, Liu H L, et al. The bioavailability and contribution of the newly deposited heavy metals (copper and lead) from atmosphere to rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384.
- [11] Allajbeu S, Qarri F, Marku E, et al. Contamination scale of atmospheric deposition for assessing air quality in Albania evaluated from most toxic heavy metal and moss biomonitoring[J]. *Springer Netherlands*, 2017, 10(5): 587-599.
- [12] Liu Y B, Cui J, Peng Y, et al. Atmospheric deposition of hazardous elements and its accumulation in both soil and grain of winter wheat in a lead-zinc smelter contaminated area, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707.
- [13] Peng H, Chen Y L, Weng L P, et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 776-786.
- [14] Gao M, Cui J, Zhang L, et al. Metal wet deposition in the Three Gorges Reservoir (TGR) region of Southwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(32): 32053-32065.
- [15] Chen L, Zhou S, Wu S, et al. Combining emission inventory and isotope ratio analyses for quantitative source apportionment of heavy metals in agricultural soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 204: 140-147.
- [16] Zhang L, Gao M, Cui J, et al. Wet deposition of trace metals at a typical urban site in Southwestern China: Fluxes, sources and contributions to aquatic environments[J]. *Sustainability*, 2017, 10(2): 69.
- [17] Huang Y Y, He C T, Shen C, et al. Toxicity of cadmium and its health risks from leafy vegetable consumption[J]. *Food & Function*, 2017, 8: 1373-1401.
- [18] Satarug S, Vesey D A, Gobe G C, et al. Current health risk assessment practice for dietary cadmium: Data from different countries[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2017, 106: 430-445.
- [19] 田丹, 任艳芳, 王艳玲, 等. 镉胁迫对生菜种子萌发及幼苗抗氧化酶系统的影响[J]. 北方园艺, 2018(2): 15-21. TIAN Dan, REN Yan-fang, WANG Yan-ling, et al. Effects of cadmium stress on lettuce seed germination and seedling antioxidant enzyme system[J]. *Northern Horticulture*, 2018(2): 15-21.
- [20] Bagheri R, Ahmad J, Bashir H, et al. Changes in rubisco, cysteine-rich proteins and antioxidant system of spinach (*Spinacia oleracea* L.) due to sulphur deficiency, cadmium stress and their combination[J]. *Protoplasma*, 2017, 254: 1031-1043.
- [21] Rydzynski D, Piotrowicz-cieslak A I, Grajek H, et al. Chlorophyll degradation by tetracycline and cadmium in spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16: 6301-6314.
- [22] 陈露, 王晓红, 张芳, 等. 镉胁迫对10个桑树品种种子萌发的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(2): 257-263. CHEN Lu, WANG Xiao-hong, ZHANG Fang, et al. Effects of cadmium stress on seed germination of 10 mulberry varieties[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(2): 257-263.
- [23] 孟桂元, 唐婷, 周静, 等. 不同玉米品种种子萌发期耐镉性分析[J]. 分子植物育种, 2016, 14(11): 3166-3171. MENG Gui-yuan, TANG Ting, ZHOU Jing, et al. Analysis on cadmium tolerance of different maize varieties during germination[J]. *Molecular Plant Breeding*

- ing, 2016, 14(11):3166-3171.
- [24] 杨柳青, 王宇飞, 肖华, 等. 镉对荞麦种子萌发的影响[J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2015, 30(4): 314-316. YANG Liu-qing, WANG Yu-fei, XIAO Hua, et al. Effect of cadmium on the germination of buckwheat seeds[J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities: Natural Science Edition*, 2015, 30(4): 314-316.
- [25] 李德明, 朱祝军, 钱琼秋. 白菜镉积累基因型差异研究[J]. 园艺学报, 2004, 31(1): 97-98. LI De-ming, ZHU Zhu-jun, QIAN Qiong-qiu. Genotypic differences of cadmium accumulation in Chinese cabbage[J]. *Acta Horticulture*, 2004, 31(1): 97-98.
- [26] Fang H W, Li W S, Tu S X, et al. Differences in cadmium absorption by 71 leaf vegetable varieties from different families and genera and their health risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184: 109593.
- [27] 孟媛, 张亮, 王林权, 等. 复合污染土壤上几种叶类蔬菜对Cd和As的富集效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(6): 972-981. MENG Yuan, ZHANG Liang, WANG Lin-quan, et al. Cd and As accumulation of several leafy vegetables in soils contaminated by combined heavy metal[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(6): 972-981.
- [28] Chen Y, Schleicher N, Chen Y, et al. The influence of governmental mitigation measures on contamination characteristics of PM_{2.5} in Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 647-658.
- [29] 任艳军, 任学军, 马为民, 等. 14种叶菜类蔬菜对土壤中重金属吸收累积差异的分析与评价[J]. 河北科技师范学院学报, 2019, 33(3): 23-34. REN Yan-jun, REN Xue-jun, MA Wei-min, et al. Analysis and evaluation of 14 leafy vegetables' absorption and accumulation differences of heavy metals in soil[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science and Technology*, 2019, 33(3): 23-34.
- [30] 郭晓静, 胡承孝, 赵小虎, 等. 不同种植模式下蔬菜吸收积累镉的差异[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(8): 1387-1393. GUO Xiao-jing, HU Cheng-xiao, ZHAO Xiao-hu, et al. Differences in absorption and accumulation of cadmium in vegetables under different planting patterns[J]. *Zhejiang Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 27(8): 1387-1393.
- [31] Toan L Q, Dang X S, Nguyenviet H, et al. Assessment on lead and cadmium pollution in tilapia and water spinach cultivated in Nhue River related to human health risk in Hanam[J]. *Journal of Practical Medicine*, 2014, 5(933/934): 130-134.
- [32] Huang Y Y, Mu Y X, He C T, et al. Cadmium and lead accumulations and agronomic quality of a newly bred pollution-safe cultivar (PSC) of water spinach[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, 25(11): 11152-11162.
- [33] Boysan-canal S, Bozkurt M A, Kipcak S. The effects of organic amendments on cadmium uptake of spinach (*Spinacia oleracea* L.) and plant growth under cadmium toxicity[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2015, 27(5): 3174-3179.
- [34] 吕保玉, 白海强. 两种基因型蕹菜镉积累与其根际微生物的关系研究[J]. 土壤与作物, 2014, 3(1): 28-31. LÜ Bao-yu, BAI Hai-qiang. Cadmium accumulation of two genotypes *Ipomoea aquatica* Forssk and their rhizospheric microorganisms[J]. *Soil and Crop*, 2014, 3(1): 28-31.
- [35] 陈旭, 杨润强, 顾振新. UV-B 辐照下大豆发芽富集异黄酮品种筛选及发芽动力学[J]. 食品科学, 2016, 37(13): 107-113. CHEN Xu, YANG Run-qiang, GU Zhen-xin. Screening and germination kinetics of soybean isoflavones enriched under UV-B irradiation[J]. *Food Science*, 2016, 37(13): 107-113.
- [36] 郑理. 糙米发芽工艺与发芽动力学研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005: 10-20. ZHEN Li. Brown rice germination process and germination kinetics[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005: 10-20.
- [37] Liu H L, Zhou J, Li M, et al. Study of the bioavailability of heavy metals from atmospheric deposition on the soil-pakchoi (*Brassica chinensis* L.) system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362: 9-16.
- [38] 朱丽霞, 陈清森, 吴永贵, 等. 镉对不同品种空心菜种子萌发的初步研究[J]. 闽南师范大学学报(自然版), 2010, 23(1): 101-104. ZHU Li-xia, CHEN Qing-sen, WU Yong-gui, et al. Preliminary study on seed germination of different varieties of water spinach with cadmium[J]. *Journal of South Fujian Normal University (Natural Edition)*, 2010, 23(1): 101-104.
- [39] 李富荣, 朱娜, 杨锐, 等. 铅、镉单一及复合污染对11个空心菜品种种子萌发和幼苗生长效应的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(11): 1951-1958. LI Fu-rong, ZHU Na, YANG Rui, et al. Effects of single and combined pollution of lead and cadmium on seed germination and seedling growth of 11 water spinach varieties[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(11): 1951-1958.
- [40] 朱娜, 李富荣, 李敏, 等. 铅镉复合污染对不同品种蕹菜生长和重金属累积特性的影响[J]. 热带农业科学, 2016, 36(6): 66-70. ZHU Na, LI Fu-rong, LI Min, et al. Effects of lead and cadmium compound pollution on growth and heavy metal accumulation characteristics of different varieties of water spinach[J]. *Tropical Agricultural Science*, 2016, 36(6): 66-70.
- [41] Małgorzata W, Jolanta O. The effect of lead on seed imbibition and germination in different plant species[J]. *Plant Science*, 1998, 137(2): 155-171.
- [42] Yang D Q, Liu S X, Xia S P, et al. Effects of cadmium stress on the growth of rice seedlings[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2019, 20(3): 11-16.
- [43] 朱培蕾, 赵贵云, 马卉, 等. 基质镉污染对蕹菜幼苗生长的影响[C]//中国园艺学会2018年学术年会论文摘要集. 北京: 中国园艺学会, 2018: 2609. ZHU Pei-lei, ZHAO Gui-yun, MA Hui, et al. Effect of substrate cadmium pollution on the growth of water spinach seedlings[C]//Abstract Collection of Papers of 2018 Annual Conference of Chinese Horticultural Society. Beijing: Chinese Horticultural Society, 2018: 2609.
- [44] 秦世玉, 郭文英, 程锦, 等. 不同浓度镉胁迫对冬小麦根系生长的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(4): 519-524. QIN Shi-yu, GUO Wen-ying, CHENG Jin, et al. Effects of different concentrations of cadmium stress on root growth of winter wheat[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 53(4): 519-524.
- [45] 任朋娟, 孟昭福, 马云飞, 等. BS-12与Cd²⁺复合污染对空心菜种子萌发及生长的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(4): 129-133.

- REN Peng-juan, MENG Zhao-fu, MA Yun-fei, et al. Effects of combined pollution of BS-12 and Cd²⁺ on seed germination and growth of water spinach[J]. *Journal of Northwest Agriculture*, 2011, 20(4):129-133.
- [46] 吴琦. 空心菜(*Ipomoea aquatica* Forsk.) 对铅和镉的富集特征及生理生态响应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009:9-22. WU Qi. Concentration characteristics and physiological and ecological response of water spinach(*Ipomoea aquatica* Forsk.) to lead and cadmium[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009:9-22.
- [47] 刘柿良, 石新生, 潘远智, 等. 镉胁迫对长春花生长、生物量及养分积累与分配的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(3):154-161. LIU Shi-liang, SHI Xin-sheng, PAN Yuan-zhi, et al. Effects of cadmium stress on the growth, biomass and nutrient accumulation and distribution of *Catharanthus roseus*[J]. *Acta Prata Sinica*, 2013, 22(3):154-161.
- [48] 祝社民. 镉胁迫对小麦种子萌发特性的影响[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(12):51-52, 64. ZHU She-min. Effect of cadmium stress on germination characteristics of wheat seeds[J]. *Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 65(12):51-52, 64.
- [49] 葛才林, 杨小勇, 孙锦荷, 等. 重金属胁迫对水稻萌发种子淀粉酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002(3):47-52. GE Cai-lin, YANG Xiao-yong, SUN Jin-he, et al. Effects of metal stress on amylase activity of rice germinating seeds[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2002(3):47-52.
- [50] 裴康康. 镉和锌胁迫对荷花种子萌发和生理生化的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2010:35-50. PEI Kang-kang. The effects of cadmium and zinc stress on the germination and physiology and biochemistry of lotus seeds[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010:35-50.
- [51] 岑画梦, 彭玲莉, 杨雪, 等. Cd²⁺对狗牙根、假俭草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(5):100-107. CEN Hua-meng, PENG Ling-li, YANG Xue, et al. The effect of Cd²⁺ on the seed germination and seedling growth of bermudagrass and cypress[J]. *Acta Prata Sinica*, 2015, 24(5):100-107.
- [52] 刘伟强, 钟小玉, 薛文涛. 重金属污染对根系的影响[J]. 科技视界, 2014(5):282-283. LIU Wei-qiang, ZHONG Xiao-yu, XUE Wen-tao. The effect of heavy metal pollution on root system[J]. *Technology Vision*, 2014(5):282-283.
- [53] 赵锦慧, 李震, 王俊生, 等. 重金属离子对油菜种子萌发特性的影响[J]. 周口师范学院学报, 2017, 34(5):80-84. ZHAO Jin-hui, LI Zhen, WANG Jun-sheng, et al. Effects of heavy metal ions on the germination characteristics of rapeseeds[J]. *Journal of Zhoukou Normal University*, 2017, 34(5):80-84.