

钒对作物种子发芽及幼苗生长的影响

杨金燕, 杨 锴

(四川大学建筑与环境学院环境科学与工程系, 成都 610065)

摘要:通过水培条件下种子发芽试验方法研究了 V^{5+} 的生物毒性。 V^{5+} 对萝卜、玉米、油菜、水稻、豆角、南瓜、向日葵 7 种作物的种子萌发及幼苗早期生长影响的研究结果表明, V^{5+} 抑制油菜、豆角、萝卜种子萌发, 但玉米、水稻、南瓜、向日葵的发芽率与对照无显著差异。在作物幼苗生长阶段, 无论是在长度还是在重量方面, V^{5+} 对所有供试作物生长均表现为抑制作用。油菜、萝卜、向日葵的幼苗根系对 V^{5+} 胁迫敏感, 所有 V^{5+} 处理浓度 ($0.05 \sim 1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下, 其耐性指数均小于 0.5, 其次为水稻, 再次为玉米和南瓜, 豆角对 V^{5+} 存在一定的耐受力。供试作物根长受 V^{5+} 抑制的程度高于苗高, V^{5+} 对供试作物幼苗生长的抑制作用大于对发芽率的抑制。对比不同作物对 V^{5+} 胁迫的响应, 油菜最敏感, 其次是水稻, 低浓度 V^{5+} 即可对其幼苗生长产生显著抑制。

关键词: 重金属; 种子; 发芽; 幼苗生长

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)05-0895-07 doi:10.11654/jaes.2013.05.003

The Effect of V^{5+} on Seed Germination and Seedling Growth

YANG Jin-yan, YANG Kai

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Hydroponic culture experiments were conducted to investigate the effects of V^{5+} toxicities on plant seeds germination and seedling growth. The results showed that V^{5+} ($0 \sim 1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) had not remarkable influence on seeds germination of *Zea mays*, *Oryza sativa* L., *Cucurbita moschata* Duch., and *Helianthus annuus* Linn., but inhibited the germination of *Brassica napus* L., *Vigna unguiculata* (Linn.) Walp, and *Raphanus sativus* L.. At seedling growth stage, V^{5+} exhibited significant inhibition effect on all the tested crops on both length and weight. Root of *Brassica napus* L., *Raphanus sativus* L. and *Helianthus annuus* Linn. was sensitive to V^{5+} stress with tolerance index less than 0.5, followed by *Oryza sativa* L., *Zea mays*, and *Cucurbita moschata* Duch., but *Vigna unguiculata* (Linn.) Walp had certain tolerance. The root length of the tested crops was more inhibited than stem length, and seedling growth was more inhibited than germination by V^{5+} . The stem length was 58.4%~112.6% of the control by $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ V^{5+} added, while the corresponding value for root length was 19.1%~84.7%. The EC_{50} value of various seedling biomass under V^{5+} stress was $0.07 \sim 0.92 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, but the EC_{50} value was $0.39 \sim 1.94 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ for germination. Comparing the response of different crops on V^{5+} stress, *Brassica napus* L. was the most sensitive, followed by *Oryza sativa* L..

Keywords: heavy metal; seed; germination; seedling growth

我国钒钛磁铁矿资源丰富, 储量位于南非和俄罗斯之后, 居世界第三位, 主要分布在四川攀枝花-西昌地区^[1], 其中原矿中 V_2O_5 的品位为 0.274%, V_2O_5 储量为 1578 万 t, 约占全国储量的 55%, 名列第一, 占世界储量的 11%, 名列第四^[2]。

作为世界上主要的钒资源基地, 经过近半个世纪

的开发, 攀枝花地区的矿业已形成较大规模, 但同时矿业活动产生了大量固体废弃物如钢渣、尾矿和煤矸石等, 环境问题突出^[3]。仅就钒污染来看, 该区大量固体废弃物中含有的钒经过风化、淋滤后进入土壤, 土壤中钒的平均含量是我国土壤背景值的 2~3 倍。攀枝花矿区大部分地带的表层土壤受到了钒的污染, 其中表层土壤钒的人为污染以轻微污染和中度污染为主, 同时, 生长在钒污染土壤的植物叶片中钒的含量远较正常区高, 对人体健康和生态安全造成严重的威胁^[4-6]。

高等植物是生态系统的基本组成部分。一个平衡的、未受外来污染的生态系统生长健康、优良的植物;

收稿日期: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(41101484); 科技部国际合作项目(2011 DFA101222)

作者简介: 杨金燕(1977—), 女, 黑龙江人, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤重金属污染。E-mail: yanyang@scu.edu.cn

而一个不平衡的、受到外来污染的生态系统会对高等植物的生长带来不利影响。利用高等植物的生长状况监测环境污染,是土壤污染诊断的重要方法之一。种子发芽和根伸长抑制法最初出现在 OECD(欧洲经济合作和发展组织)实验指南中,美国国家环境保护局将其作为土壤毒性诊断的方法而广泛应用。

目前针对钒对作物种子发芽影响的研究鲜见报道,钒对作物种子发芽及幼苗生长的影响不明,钒是否为高等植物必需微量元素尚存在争议,而攀枝花地区不仅是钒钛磁铁矿矿区,同时也是重要的农业区,研究钒对作物种子发芽及幼苗生长的影响具有科学意义和现实意义。本文利用种子发芽试验,探讨钒对作物发芽及幼苗生长的影响,以期丰富钒污染与作物响应理论提供数据支持,为矿区农业生产和土壤毒性诊断提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试作物种子

所有供试种子购于四川省农科院。油菜(*Brassica napus* L.)种子由云南省农业科学院选育;豆角[*Vigna unguiculata*(Linn.)Walp]种子由重庆金兴种菌经营部生产;萝卜(*Raphanus sativus* L.)种子由河北大禹种业有限公司生产;玉米(*Zea mays*)种子由山东省青州市富源蔬菜研究所选育;水稻(*Oryza sativa* L.)种子由四川省农业科学院选育;南瓜(*Cucurbita moschata* Duch.)种子由重庆市华都种子有限责任公司生产;向日葵(*Helianthus annuus* Linn.)种子由山西省太谷县绿宝种业有限公司生产。所有种子的纯度在90%~95%之间,净度在96%~98%之间,含水量为7%~9%。

1.2 试验方法

分别配置浓度为0、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0 mmol·L⁻¹的V⁵⁺溶液(以NH₄VO₃溶液的形式加入),以去离子水为对照,共6个处理,每处理3次重复。试验时挑选大小一致、颗粒饱满的作物种子,将种子用0.1%的次氯酸钠溶液消毒10 min,先用自来水冲洗数次,再用去离子水冲洗若干遍,用滤纸将水吸干。种子按每皿10粒置于直径为120 mm的培养皿中。每皿中视种子大小加入10~15 mL相应处理浓度的溶液浸润2/3种子。将培养皿随机摆放于室温(25~30℃)、自然光照条件下进行培养,定期补充所蒸发的NH₄VO₃溶液。每日早晚每皿分两次各加入1~2 mL相应处理浓度的溶液补充所蒸发的NH₄VO₃溶液,每4 d完全更换一次培养液。于处理后第14 d收获幼苗,记录种子

发芽及幼苗的生长情况。以胚根能被看见为萌发标准,本文按胚根与种子等长,胚芽长度达到种子一半时,认为种子已经发芽,以连续3 d不发芽时作为发芽结束,计算发芽率;并于收获时测量株高、根长,称量幼苗鲜重及根鲜重。其中茎叶、根鲜重用称重法测定。株重和根重的测定,采用吸水纸吸干液体,去掉胚乳,将根与茎切离,用万分之一分析天平称鲜重,计算平均值。株高测量是从植株底部开始,一直到叶尖。根长测量是对每株幼苗的最长根长进行测量,计算平均值。

发芽率计算方法:发芽率(%)=(萌发种子数量/试验所用种子数量)×100%

1.3 数据分析方法

实验数据采用Excel和SPSS 17.0统计软件分析各处理的差异性及变量间的相关性。采用SPSS软件在95%的可靠性下进行单因素方差分析、LSD多重比较和相关回归统计分析。

2 结果与讨论

2.1 V⁵⁺对种子发芽率的影响

供试7种作物种子经过不同浓度V⁵⁺处理后的发芽情况差异较大,随着V⁵⁺浓度的不断增加,7种作物种子的发芽率表现出不同的趋势。

V⁵⁺的加入对油菜种子发芽产生显著抑制。即使是试验处理的最低浓度(V⁵⁺ 0.05 mmol·L⁻¹),对种子的萌发也表现为明显的抑制作用,且随着V⁵⁺处理浓度的升高其胁迫率快速增强,毒害作用加大。油菜种子在V⁵⁺浓度为0.2 mmol·L⁻¹时,发芽率为对照(不添加V⁵⁺)发芽率的73.7%;V⁵⁺浓度达到0.5 mmol·L⁻¹时,油菜种子发芽率下降更为显著,为对照发芽率的36.8%;V⁵⁺浓度达到1.0 mmol·L⁻¹时,油菜种子不发芽。

当V⁵⁺的处理浓度在0~0.2 mmol·L⁻¹范围时,豆角种子的发芽率在各浓度处理间无显著差异,V⁵⁺浓度大于0.2 mmol·L⁻¹时,豆角种子的发芽率为对照的73.9%~60.9%。

萝卜种子经过不同浓度的V⁵⁺处理后,其发芽率受到不同程度的抑制作用。V⁵⁺浓度≤0.5 mmol·L⁻¹时,发芽率与对照的发芽率无显著差异;当V⁵⁺浓度达到1.0 mmol·L⁻¹时,发芽率下降为对照的73.1%。

V⁵⁺浓度在0~1.0 mmol·L⁻¹范围内,V⁵⁺处理的玉米、水稻、南瓜和向日葵种子与对照相比,发芽率无显著差异。

总的来说,尽管有研究表明低浓度的钒(0.005 mmol·L⁻¹)可以促进西红柿的生长^[7],但在本试验浓度

条件下($\geq 0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), V^{5+} 处理未对供试作物种子的发芽率起到显著的促进作用。当 V^{5+} 浓度 $\leq 0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对除油菜外的其他作物种子的发芽率没有显著影响;随着 V^{5+} 处理浓度的进一步增加($0.5 \sim 1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),萝卜、油菜、豆角的发芽率显著低于对照,说明高浓度 V^{5+} 对某些作物种子发芽有抑制作用。对比不同作物的发芽情况,油菜种子对 V^{5+} 胁迫最敏感, V^{5+} 处理浓度为 $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时毒害作用已发生,其次是豆角、萝卜,而玉米、水稻、向日葵和南瓜种子,在 V^{5+} 处理浓度达到 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时其发芽率仍未受到显著抑制。

由表 1 可以看出,在试验所设置的浓度范围内($0 \sim 1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), V^{5+} 对于玉米、南瓜、向日葵这类体积较大的种子的发芽率影响不显著。这是由于种子发芽过程主要是由胚内进行养分的供应,外界对其影响被掩盖,这与王军涛^[8]、杨和连^[9]、Jamal^[10]等的研究结果一致。也有研究认为是由于种皮的保护作用^[11],或是萌发过程只是简单的细胞生长,而不是细胞分裂造成,所以不会受到重金属很严重的抑制^[12]。但也有研究表明,重金属对单子叶植物(糯玉米)的发芽率影响比对双子叶植物(绿豆)发芽率的影响显著^[13]。

2.2 V^{5+} 对幼苗生长的影响

2.2.1 V^{5+} 对作物苗高的影响

由表 2 可看出,随着 V^{5+} 溶液处理浓度的增加,萝

卜、油菜、水稻的苗高呈明显的下降趋势,实验最低 V^{5+} 处理浓度($0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下,萝卜、油菜、水稻和南瓜的苗高与对照相比已表现出显著的下降趋势。随着 V^{5+} 浓度进一步增加到 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,南瓜苗高下降为对照苗高的 77.6%。 V^{5+} 处理浓度为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,萝卜、油菜和水稻的苗高下降更为明显,其苗高仅为对照的 25.3%、9.87%和 34.2%。萝卜、油菜、水稻和南瓜苗高与 V^{5+} 溶液浓度呈显著负相关($R^2=0.92、0.96、0.83、0.85$),表明 V^{5+} 处理显著抑制其幼苗的生长。

表 2 不同浓度 V^{5+} 处理对作物苗高的影响

Table 2 Effect of V^{5+} on seeding stem length

浓度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	萝卜	玉米	油菜	水稻	豆角	南瓜	向日葵
平均值/cm							
0	5.85a	13.61a	5.21a	6.62a	4.97a	5.00a	4.31a
0.05	3.84b	13.81a	3.04b	4.66b	5.60a	4.63b	2.85a
0.1	3.52b	9.75a	2.42b	3.38c	4.42a	3.88c	2.85a
0.2	2.81c	6.25b	1.18c	3.69c	2.33b	3.15c	2.74b
0.5	1.48d	5.75b	0.51d	2.27d	2.14b	3.06c	2.03b
1.0	0.96e	4.64b		2.35d		3.00c	2.56b
标准差/cm							
0	1.09	6.99	2.20	1.58	1.87	2.50	2.39
0.05	1.02	4.80	0.62	1.44	2.56	2.24	1.92
0.1	1.01	5.54	0.65	0.57	1.58	1.41	1.18
0.2	0.48	2.44	0.50	1.17	1.32	1.03	1.79
0.5	0.43	1.57	0.26	0.26	1.35	1.19	0.88
1.0	0.25	1.82		0.55		0.63	1.01

表 1 不同浓度 V^{5+} 处理条件下种子的发芽率较对照百分比

Table 1 Ratio of germination percentage under V^{5+} treatment to that of control

浓度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	萝卜	玉米	油菜	水稻	豆角	南瓜	向日葵
平均值/%							
0	100.0a	100.0a	100.0a	100.0a	100.0a	100.0a	100.0a
0.05	100.0a	88.9a	63.2b	85.7a	104.3a	100.0a	111.1a
0.1	100.0a	88.9a	94.7a	100.0a	91.3a	125.0a	111.1a
0.2	92.3a	100.0a	73.7b	76.2a	73.9ab	85.0a	100.0a
0.5	92.3a	88.9a	36.8c	71.4a	60.9b	90.0a	100.0a
1.0	73.1b	77.8a	0	81.0a	71.7ab	100.0a	100.0a
标准差/%							
0	11.5	20.0	5.8	10.0	5.8	23.1	14.1
0.05	5.8	11.5	10.0	26.5	10.0	11.5	0.0
0.1	5.8	23.1	10.0	0.0	20.0	15.3	0.0
0.2	0.0	0.0	11.5	5.8	23.1	15.3	14.1
0.5	0.0	20.0	5.8	10.0	15.3	26.5	14.1
1.0	11.5	23.1		11.5	21.2	15.3	14.1

注:表中具有相同小写字母表示无显著差异,不同字母表示具有显著差异($P=0.05$)。以下同。

V^{5+} 溶液处理条件下,玉米、豆角、向日葵幼苗生长表现出十分相似的趋势。 V^{5+} 处理浓度为 $0 \sim 0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,玉米、豆角、向日葵的苗高分别为 $9.75 \sim 13.81 \text{ cm}$ 、 $4.42 \sim 5.60 \text{ cm}$ 和 $2.85 \sim 4.31 \text{ cm}$,不同浓度处理间无显著差异,表明这 3 种作物的幼苗对低浓度 V 具有一定的忍耐性。随着 V^{5+} 处理浓度增加,玉米、豆角、向日葵的苗高相应下降。经方差分析可知,至 V^{5+} 浓度为 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,苗高较对照显著降低,但随着处理浓度进一步增高,苗高无显著差异。

总的来说,当 V^{5+} 处理浓度为 $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,萝卜、油菜、水稻、南瓜的芽伸长生长即已受到显著抑制;玉米、豆角、向日葵幼苗对低浓度 V^{5+} ($\leq 0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)具有一定的耐性,至 V^{5+} 处理浓度为 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其苗高显著低于对照。

2.2.2 V^{5+} 处理对作物单株苗鲜重的影响

萝卜、玉米、油菜、水稻、豆角、南瓜的单株苗鲜重均与 V^{5+} 处理浓度呈显著二次负相关(表 3),随 V^{5+} 处

表 3 不同浓度 V^{5+} 处理对苗鲜重的影响
Table 3 Effect of V^{5+} on fresh seeding stem weight

浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	萝卜	玉米	油菜	水稻	豆角	南瓜	萝卜	玉米	油菜	水稻	豆角	南瓜
	平均值/g						标准差/g					
0	0.058 9a	0.541 4a	0.039 1a	0.056 2a	0.440 1a	0.443 3a	0.007	0.135	0.009	0.007	0.040	0.046
0.05	0.056 7a	0.509 6a	0.033 6ab	0.040 9b	0.464 2a	0.387 0ab	0.002	0.086	0.005	0.006	0.062	0.102
0.1	0.065 9a	0.414 1a	0.027 2b	0.027 8c	0.511 8a	0.397 4ab	0.010	0.178	0.001	0.005	0.245	0.151
0.2	0.059 1a	0.365 0ab	0.016 2c	0.026 0c	0.366 6a	0.286 7b	0.008	0.068	0.005	0.003	0.113	0.028
0.5	0.043 7b	0.216 5b	0.009 3c	0.013 2d	0.265 7b	0.283 8b	0.008	0.051	0.005	0.001	0.047	0.037
1.0	0.026 2c	0.146 6b		0.014 8d		0.286 1b	0.006	0.067		0.005		0.010

单株苗鲜重(y)与 V^{5+} 处理浓度(x)相关分析

萝卜	$y=-0.013\ 6x^2-0.022\ 5x+0.061\ 6$	$R^2=0.921\ 3$
玉米	$y=0.542\ 1x^2-0.927x+0.533\ 7$	$R^2=0.986\ 4$
油菜	$y=0.179\ 4x^2-0.151x+0.039\ 9$	$R^2=0.996\ 5$
水稻	$y=0.091\ 6x^2-0.124\ 1x+0.048\ 2$	$R^2=0.876\ 7$
豆角	$y=-0.435\ 9x^2-0.200\ 2x+0.470\ 1$	$R^2=0.798\ 7$
南瓜	$y=0.422\ 8x^2-0.544\ 6x+0.425\ 7$	$R^2=0.837\ 3$

注:向日葵芽生物量小,无法准确称量,未进行统计。

理浓度增加,幼苗鲜重受到不同程度的抑制。水稻、油菜在 V^{5+} 处理浓度为 0.05、0.1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其单株苗鲜重即较对照显著降低,随 V^{5+} 处理浓度进一步增加,水稻单株苗鲜重继续降低。南瓜在 V^{5+} 处理浓度为 0.2 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,单株苗鲜重较对照显著降低,但随 V^{5+} 处理浓度增加,单株苗鲜重无显著差异。萝卜、玉米、豆角的单株苗鲜重在低浓度 V^{5+} 处理条件下无显著差异,至 V^{5+} 处理浓度为 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,较对照显著降低(图 1)。

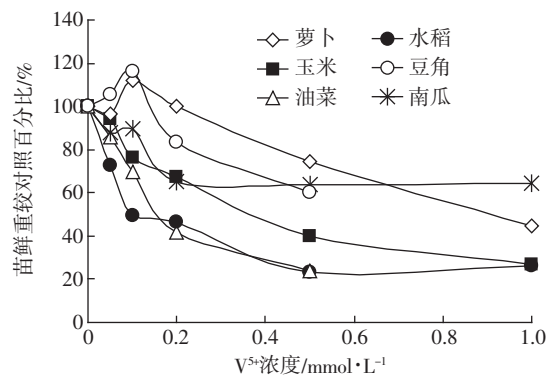


图 1 V^{5+} 胁迫下作物苗鲜重较对照苗鲜重百分比
Figure 1 Ratio of fresh stem weight under V^{5+} treatment to that of control

2.2.3 V^{5+} 处理对作物幼苗根长的影响

V^{5+} 对供试几种作物的根伸长生长有显著的抑制作用(表 4)。实验最低处理浓度(0.05 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)的 V^{5+} 显著抑制除豆角外所有供试作物的根长,其中萝卜根

表 4 不同浓度 V^{5+} 处理对作物根长的影响
Table 4 Effect of V^{5+} on seeding root length

浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	萝卜	玉米	油菜	水稻	豆角	南瓜	向日葵
平均值/cm							
0	11.3a	21.1a	3.5a	8.5a	11.3a	5.0a	4.0a
0.05	2.2b	13.0b	1.0b	4.5b	9.6a	3.2b	1.3b
0.1	1.7b	12.1b	0.7b	2.1c	7.2ab	2.8b	1.2b
0.2	0.7c	6.6c	0.2c	1.4c	5.6b	1.3c	0.9b
0.5	0.3c	2.7cd	0.2c	0.5d	4.4b	0.6c	0.5b
1.0	0.2c	0.9d			3.5b	0.3c	0.4b
2.0					2.7b		
标准差/cm							
0	4.79	6.62	1.91	2.27	6.30	4.20	3.18
0.05	0.82	5.24	0.14	3.14	5.90	2.03	1.07
0.1	0.90	7.10	0.39	0.71	3.13	1.80	0.41
0.2	0.34	4.65	0.14	1.52	2.01	2.13	0.77
0.5	0.18	2.07	0.15	0.18	1.73	0.30	0.37
1.0	0.12	1.03			1.32	0.15	0.28

长受抑制的程度最大,仅为对照根长的 19.1%;随 V^{5+} 处理浓度进一步增加到 0.2 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,除向日葵外,所有作物的根长进一步显著降低; V^{5+} 处理浓度 ≥ 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,萝卜、油菜、豆角、南瓜、向日葵的根长未显著降低,玉米、水稻的根长进一步显著降低。

刘秀梅等^[4]报道,植物的根系耐性指数(加重金属处理的根长与对照根长的比值)能较好地反映植物对重金属的耐性,耐性指数越大,表示植物对重金属的耐性越大。当耐性指数大于 0.5 时,表明这种植物

对此重金属有较强的耐受性,生长较好;当耐性指数小于 0.5 时,则说明重金属对这种植物的毒害作用显著,这种植物基本上难以或不能生长在这种浓度的重金属环境中。本试验中,油菜、萝卜、向日葵的幼苗根系对 V^{5+} 胁迫十分敏感,所有 V^{5+} 处理浓度条件下,其耐性指数均小于 0.5;其次为水稻, V^{5+} 浓度为 $0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水稻根系的耐性指数为 0.5;再次为玉米和南瓜, V^{5+} 浓度 $\leq 0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其根系的耐性指数为 0.6; V^{5+} 浓度 $\leq 0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,豆角根系的耐性指数在 0.5~1.0 之间,显示豆角对 V^{5+} 存在一定的耐受力。

供试作物根长受 V^{5+} 抑制的程度远远高于苗高。 V^{5+} 处理浓度为 $0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,供试作物苗高为对照的 58.4%~112.6%,而根长为对照的 19.1%~84.7%; V^{5+} 处理浓度为 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,供试作物苗高为对照的 9.9%~61.1%,而根长为对照的 12.9%~38.9%(图 2)。这可能是由于重金属在植物茎中的积累主要取决于重金属在根中的积累以后向植物茎的转移^[15],使得作物的根生长先受到重金属的抑制;同时,大量重金属在根组织中积累影响了根分生组织的有丝分裂^[16],当根受到抑制时,种子为茎生长继续提供营养,植物茎能够更快产生对重金属的解毒机制^[17-18]。

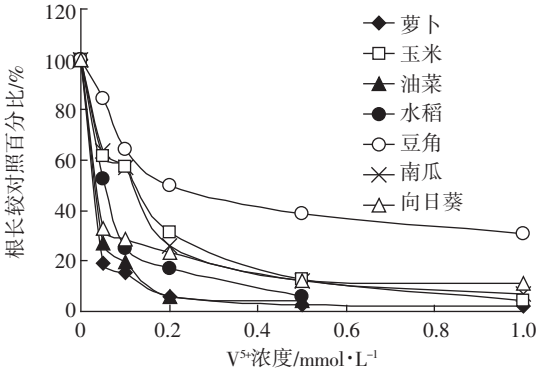


图 2 V^{5+} 胁迫下作物幼苗根长较对照根长百分比
Figure 2 Ratio of root length under V^{5+} treatment to that of control

2.2.4 V^{5+} 处理对作物单株根鲜重的影响

由表 5 和图 3 可见,水稻幼苗单株根鲜重对 V^{5+} 胁迫最敏感, V^{5+} 浓度为 $0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其根鲜重较对照显著减小,为对照根鲜重的 74.2%。玉米幼苗根鲜重在 V^{5+} 浓度为 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,较对照根鲜重显著减小,为对照根鲜重的 81.4%。萝卜和南瓜幼苗根鲜重在 V^{5+} 浓度为 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,较对照根鲜重显著减小,分别为对照的 31.8%和 23.5%。豆角幼苗在

表 5 不同浓度 V^{5+} 处理对作物根鲜重的影响

Table 5 Effect of V^{5+} on fresh seeding root weight

浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	萝卜	玉米	水稻	豆角	南瓜
平均值/g					
0	0.002 2a	0.251 8a	0.027 9a	0.319 8a	0.115 3a
0.05	0.001 8a	0.222 6a	0.020 7b	0.279 6a	0.077 6a
0.1	0.001 2a	0.205 0b	0.007 1c	0.303 9a	0.081 3a
0.2	0.000 7b	0.179 9b	0.003 3d	0.276 6a	0.027 1b
0.5	0.000 5b	0.107 6c		0.188 1b	0.023 6b
1.0	0.000 2b	0.007 7d			0.016 9b
标准差/g					
0	0.000 5	0.052 4	0.002 5	0.025 6	0.028 6
0.05	0.000 1	0.052 4	0.002 6	0.056 6	0.028 1
0.1	0.000 0	0.082 8	0.001 0	0.098 8	0.052 5
0.2	0.000 1	0.063 9	0.000 6	0.072 7	0.025 4
0.5	0.000 1	0.261 4		0.015 1	0.002 1
1.0	0.000 1	0.013 4			0.007 8

注:油菜、向日葵幼苗根系生物量小,无法准确称量,未进行统计。

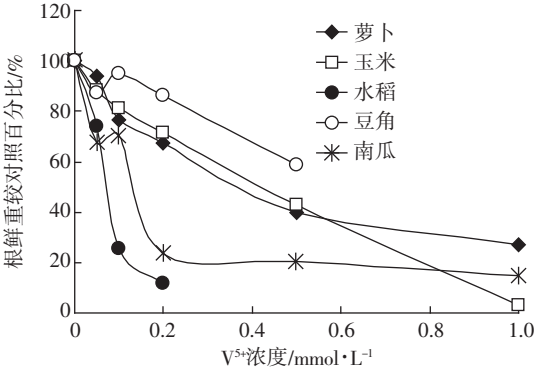


图 3 V^{5+} 胁迫下作物根鲜重较对照根鲜重百分比
Figure 3 Ratio of fresh root weight under V^{5+} treatment to that of control

V^{5+} 浓度 $<0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其根鲜重未受 V^{5+} 胁迫的显著影响, V^{5+} 浓度增加到 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,根鲜重显著下降为对照的 58.8%。

2.2.5 各作物发芽率及幼苗生物量较对照减少一半时 V^{5+} 的临界值

尽管钒是否为有益元素尚存在争议,但是高浓度的钒($0.2\sim 0.4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)会对植物产生伤害已得到广泛认可^[19]。在试验处理浓度范围内,计算出 V^{5+} 浓度与苗高、根长及鲜重的抑制率回归分析结果。由表 6 中各作物发芽率及幼苗生物量较对照减少 50%时所需的 V^{5+} 临界值(EC_{50})可知,油菜对 V^{5+} 最为敏感,当 V^{5+} 浓度为 $0.39\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,发芽率降低为对照的一半, V^{5+} 浓度为 $0.10、0.17\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,苗高和苗鲜重下降

表 6 各作物发芽率及幼苗生物量较对照减少 50%时的 V^{5+} 浓度($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 6 EC_{50} value of various seedling under V^{5+} stress($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)

项目	萝卜	玉米	油菜	水稻	豆角	南瓜	向日葵
发芽率	1.94	NR	0.39	1.31	1.89	NR	2.38
苗高	0.21	0.30	0.10	0.38	0.28	NR	0.35
苗鲜重	0.92	0.36	0.17	0.19	0.56	NR	—
根长	NR	0.15	0.05	0.09	NR	0.15	NR
根鲜重	0.18	0.41	—	0.07	0.58	0.17	—

注:NR 表示与 V^{5+} 浓度无显著相关性;“—”表示生物量小,未统计。

为对照的一半。 V^{5+} 对所有供试作物幼苗生长的抑制作用远大于对发芽率的抑制。 V^{5+} 浓度在 $0.07\sim 0.92\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,已使供试 7 种作物的幼苗生物量较对照减少 50%,而 $0.39\sim 1.94\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 V^{5+} 使供试 7 种作物的发芽率较对照减少 50%。

2.3 V^{5+} 对种子及幼苗形态的影响

以玉米为例,在实验的水培条件下,没有 V^{5+} 处理的玉米幼苗根基部为浅红色,至根尖逐渐变为白色,须根多。 $0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ V^{5+} 处理的玉米根基部的颜色发生明显变化,呈现为蓝紫色,至根尖逐渐变为白色,须根较对照明显变短且个数减少。 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ V^{5+} 处理的玉米根基部呈黑紫色,须根进一步变短。 $\geq 0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ V^{5+} 处理的玉米根和茎叶较低浓度处理进一

步变短甚至不发育,高浓度时在种子萌发后 4~5 d 停止生长,甚至死亡(表 7)。玉米幼苗颜色发紫,主要原因可能是幼苗缺少磷元素引起的一种生理性病症,体内糖代谢受阻,叶片中积累的糖分较多,并因此形成大量的花青素苷,使植株带紫色。推测 V 胁迫可能影响玉米对磷的吸收或者影响了体内磷的代谢。

3 结论

V^{5+} 对供试 7 种作物的发芽和幼苗生长均产生不同程度的影响,主要表现在:

(1)在试验浓度条件下($0\sim 1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), V^{5+} 处理未对玉米、水稻、向日葵和南瓜种子发芽产生显著抑制,而油菜、豆角、萝卜的发芽率随 V^{5+} 浓度升高显著降低。对比不同作物的发芽情况,油菜种子对 V^{5+} 胁迫最敏感, V^{5+} 处理浓度为 $0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时毒害作用已发生,其次是豆角、萝卜。

(2) V^{5+} 对供试 7 种作物的根伸长生长、根鲜重、苗高、苗鲜重均产生显著的抑制作用。实验最低处理浓度($0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)的 V^{5+} 显著抑制除豆角外所有供试作物的根长,其中萝卜根长受抑制的程度最大,仅为对照根长的 19.1%。玉米、豆角、向日葵幼苗对低浓度 V^{5+} ($\leq 0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)具有一定的耐性,至 V^{5+} 处理浓度为 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其苗高显著低于对照。

表 7 V^{5+} 对种子及幼苗形态的影响
Table 7 Effect of V^{5+} on seeds and seedling morphology

V^{5+} 浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	萝卜	玉米	油菜	水稻	豆角	南瓜	向日葵
0	根淡红色;子叶嫩绿	叶细长、嫩绿;根基部红色,向根尖渐变为浅红色,至根尖为白色;须根多	叶小;茎长;根细长	叶细长、嫩绿;根细长、须根多	种皮浅黄褐色;叶鲜绿;侧根多	叶片嫩绿;子叶饱满;根白色;植株生长健壮	根细长、白色;子叶墨绿、饱满
0.05	根略发黑,侧根增多;子叶有少量黑色斑点	叶较对照明显变短,叶尖端有卷曲、发黄;根蓝紫色,向根尖渐变为白色;须根少、且明显变短	叶小;茎较短;根细而短	根细长,须根明显变短;叶短	种皮褐色;叶、根较对照无明显外观变化	叶片较对照略小;子叶饱满;根白色	根明显变黑,侧根短;子叶墨绿、饱满
0.1	根表面有明显黑色斑块,根尖变黑;子叶表面明显黑斑	叶较前一处理进一步变短,叶前端卷曲、发黄;根黑紫色,向根尖渐变为白色;须根短、少	叶小,尖部发黑;茎较短;根细而短	根短小,几乎无须根;叶短	种皮墨绿色;叶较对照无明显外观变化;根尖发黑,侧根明显减少	叶片、子叶较上一处理无显著差异;根有黑紫色斑块	根短小,侧根短;子叶不饱满,边缘萎蔫
0.2	根表面有大量黑色斑块,无侧根;幼芽无法直立生长;子叶表面大量黑斑	部分叶卷曲;发芽后一周左右停止生长	叶小,发黑;茎短;根几乎不生长;部分幼苗培养后期死亡	根进一步缩短,较上一处理无其他外观差异	种皮黑色;叶小、失水;根变短,部分为褐色;侧根非常短;子叶失水萎蔫,表面有褐色斑点	叶片小;子叶失水,部分腐烂;根几乎不生长	根黑色,短小,无侧根;子叶有褐色坏死斑块
0.5	根在出芽后几乎停止生长;子叶密布黑斑;部分幼苗死亡	叶子不展开,仅 1 片;根在发芽后不久即停止生长;部分幼苗在培养后期死亡	叶子不展开;根几乎不生长;大部分幼苗培养后期死亡	根系基本不发育;部分幼苗死亡	种皮黑色;叶小、失水;根变短,部分为褐色;子叶失水萎蔫,表面大面积黑斑	叶片小,幼苗不能直立生长;子叶失水,部分腐烂;根大面积青紫色,几乎不生长	根几乎不发育;子叶有褐色坏死斑块
1	根在出芽后几乎停止生长;子叶几乎不展开,密布黑斑;大部分幼苗死亡	叶子不展开,仅 1 片;根进一步缩短;大部分幼苗在培养后期死亡		根系基本不发育;大部分幼苗死亡	种皮黑色;叶子几乎不生长;根短小、褐色、无侧根;子叶表面大面积黑斑;部分幼苗死亡	无叶片;子叶失水,大部分腐烂坏死;根几乎不生长,腐烂死亡	根几乎不发育;子叶腐烂坏死

(3)供试作物根长受 V^{5+} 抑制的程度高于苗高。 V^{5+} 处理浓度为 $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 供试作物苗高为对照的 58.4%~112.6%, 而根长为对照的 19.1%~84.7%; V^{5+} 处理浓度为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 供试作物苗高为对照的 9.9%~61.1%, 而根长为对照的 12.9%~38.9%。

(4)发芽率不能完全表征 V^{5+} 对作物生长发育的毒性程度, 幼苗各项生长指标(苗鲜重、苗高、根重、根长等)比发芽率对 V^{5+} 胁迫更为敏感, 能更好地表征 V^{5+} 对作物生长发育的毒性程度。 V^{5+} 浓度在 $0.07 \sim 0.92 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 即可使供试作物的幼苗生物量较对照减少 50%, 而 $0.39 \sim 1.94 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 V^{5+} 使供试作物的发芽率较对照减少 50%。

(5)对比不同作物的发芽及幼苗生长情况, 油菜对 V^{5+} 胁迫最敏感, 其次是水稻。 V^{5+} 处理浓度为 $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时毒害作用已发生, V^{5+} 浓度为 $0.39 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 油菜发芽率降低为对照的一半, V^{5+} 浓度为 0.10 、 $0.17 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 苗高和苗鲜重下降为对照的一半。因此在 V 背景值较高的土地上应考虑根据土壤类型选择种植抵抗力较好的豆角、南瓜等作物。

本实验所得结论是在水培实验基础上得到的, 还需在各种类型土壤上进一步验证。

参考文献:

- [1] 龙运波, 张裕书. 低品位钒钛磁铁矿选铁尾矿综合回收钛试验研究[J]. 矿业快报, 2007, 459: 22-24.
LONG Yun-bo, ZHANG Yu-shu. Experimental research on comprehensively recovering titanium from iron tailings of low grade vanadium titanomagnetite[J]. Express Information, 2007, 459: 22-24.
- [2] 任学佑. 稀有金属钒的应用现状及市场前景[J]. 稀有金属, 2003, 27(6): 809-812.
REN Xue-you. Application status and market prospects of rare metal vanadium[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 809-812.
- [3] 杨金燕, 唐亚, 李廷强, 等. 我国钒资源现状及土壤中钒的生物效应[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1511-1517.
YANG Jin-yan, TANG Ya, LI Ting-qiang, et al. Soil biogeochemistry and resources situation of vanadium in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(6): 1511-1517.
- [4] 滕彦国, 矫旭东, 左锐, 等. 攀枝花矿区表层土壤中钒的环境地球化学研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 278-283.
TENG Yan-guo, JIAO Xu-dong, ZUO Rui, et al. Environmental geochemistry of vanadium in topsoil in Panzhihua mining area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(2): 278-283.
- [5] 滕彦国, 张庆强, 肖杰, 等. 攀枝花公园土壤中钒的地球化学形态及潜在生态风险[J]. 矿物岩石, 2008, 28(2): 102-106.
TENG Yan-guo, ZHANG Qing-qiang, XIAO Jie, et al. Geochemical speciation and potential ecological risk of vanadium in the soil in the Panzhihua Park[J]. J Mineral Petrol, 2008, 28(2): 102-106.
- [6] Teng Y G, Tuo X G, Ni S J, et al. Environmental geochemistry of heavy metal contamination in soil and stream sediment in Panzhihua mining and Smelting area, Southwestern China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2003, 22: 253-262.
- [7] Basiouny F M. Distribution of vanadium and its influence on chlorophyll formation and iron metabolism in tomato plants[J]. J Plant Nutr, 1984, 7: 1059-1073.
- [8] 王军涛, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 水培条件下重金属 Cr(VI) 对作物种子萌发影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 222-225.
WANG Jun-tao, LIU Hong-lu, WU Wen-yong, et al. Experimental study on effects of hexavalent chromium on crop seed germination under solution culture[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 222-225.
- [9] 杨和连, 车灵艳, 卢二乔. 重金属铬对西葫芦种子发芽及出苗的影响[J]. 种子, 2004, 23(6): 60-62.
YANG He-lian, CHE Ling-yan, LU Er-qiao. Effects of Cr on pumpkin seed germination[J]. Seed, 2004, 23(6): 60-62.
- [10] Jamal Sh N, Iqbal M Z, Athar M. Effect of aluminum and chromium on the growth and germination of mesquite(*Prosopis juliflora* Swartz.) DC. [J]. International Journal of Environment Science and Technology, 2006, 3(2): 173-176.
- [11] Streeter A, Kulkarni C T, Stirk A. Toxicity of metal elements on germination and seedling growth of widely used medicinal plants belonging to hyacinthaceae[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2007, 79: 371-376.
- [12] Salvatore M D, Carafa A M, Carratu G, et al. Assessment of heavy metals phytotoxicity using seed germination and root elongation tests: A comparison of two growth substrates[J]. Chemosphere, 2008, 73: 1461-1464.
- [13] 郑爱珍. Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对糯玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(8): 1828-1831.
ZHENG Ai-zhen. Effects of copper and zinc stress on glutinous maize seed germination and seedling growth[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(8): 1828-1831.
- [14] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6种植物对 Pb 的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 533-537.
LIU Xiu-mei, NIE Jun-hua, WANG Qing-ren. Research on lead uptake and tolerance in six plants[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(5): 533-537.
- [15] Aycicek M, Kaplan O, Yaman M. Effect of cadmium on germination, seedling growth and metal contents of sunflower(*Helianthus annuus* L.) [J]. Asian Journal of Chemistry, 2008, 20(4): 2663-2672.
- [16] Sham F R, Ahmad N, Masood R K, et al. The influence of cadmium and chromium on the biomass production of shisham(*Dalbergia sissoor* Roxb.) seedlings[J]. Pak J Bot, 2008, 40(4): 1341-1348.
- [17] Wang X F, Zhou Q X. Ecotoxicological effects of cadmium on three ornamental plants[J]. Chemosphere, 2005, 60: 16-21.
- [18] 马贵. 镍胁迫对玉米萌发和早期生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18029-18030, 18034.
MA Gui. Effect of nickel stress on germination and seedling growth of maize[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(32): 18029-18030, 18034.
- [19] Arnon D. I. and Wessel G. Vanadium as an essential element for green plants[J]. Nature, 1953, 172: 1039-1040.