

余顺慧,方荣美,唐洁,等. 铬污染对延胡索生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):236-239.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.064

铬污染对延胡索生长和生理特性的影响

余顺慧,方荣美,唐洁,谭俊,陆亚萍,罗杨,孙嘉

(重庆三峡学院/三峡库区水环境演变与污染防治重点实验室,重庆 404100)

摘要:为了阐明 Cr^{6+} 污染对延胡索的毒害机理,探索重金属对延胡索生长发育的影响。采用土培试验,研究不同浓度的 Cr^{6+} (0、50、75、100、150、200、250、300 mg/kg) 对延胡索生长、抗氧化酶活性和 Cr^{6+} 积累等的影响。结果表明,延胡索在 Cr^{6+} 污染下生长受抑制,生物量下降; Cr^{6+} 污染能明显影响延胡索抗氧化酶活性,即超氧化物歧化酶(SOD)活性随 Cr^{6+} 浓度的升高而逐渐降低,过氧化物酶(POD)的活性随 Cr^{6+} 浓度的升高而逐渐增加,过氧化氢酶(CAT)活性均随 Cr^{6+} 浓度的升高而先增后减; Cr^{6+} 污染能明显影响延胡索叶绿素含量、可溶性糖含量、丙二醛(MDA)含量等。叶绿素含量与可溶性糖的含量随着 Cr^{6+} 浓度的升高而先增后减,而 MDA 含量逐渐增加。随着 Cr^{6+} 污染浓度的升高,延胡索对 Cr^{6+} 的积累在地下块茎逐渐增多,在 Cr^{6+} 浓度为 150 mg/kg 时 Cr^{6+} 含量增加速度最大,生产上应该注意土壤中的 Cr^{6+} 含量。延胡索栽培中应尽量选择 Cr^{6+} 污染较少的土地进行。

关键词:铬污染;延胡索;生长;生理特性;栽培模式

中图分类号: S567.21⁺9.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)10-0236-04

延胡索别称元胡、玄胡索、玄胡,为罂粟科紫堇属一年生草本植物,以其地下块茎入药,为常用中药,具有行气、活血、止痛的作用。铬广泛存在于环境中,在自然状态下,铬离子有 Cr^{+3} 和 Cr^{6+} 2 种形态,其中 Cr^{6+} 则是一种毒性较大的致畸、致

突变离子^[1]。 Cr^{6+} 容易被植物吸收,能在植物体残留对植物产生毒害^[2-5]。而农作物受到铬毒害后,不但严重影响农产品的产量和质量,更为严重的是通过食物链影响人畜健康^[6]。随着现代工业的发展,铬在化工行业中的广泛应用,导致环境中的铬总量显著增加,致使土壤、水体和生物遭到不同程度的污染。目前对延胡索的研究主要集中在测定生物碱含量方面,但是有关重金属对延胡索的产量和品质的影响鲜有报道。笔者所在实验室用重金属铜、铅等胁迫狗牙根以研究其耐性机理,并取得了一定的成绩^[7-10]。本试验以延胡索

收稿日期:2015-08-12

基金项目:重庆市应用开发计划(编号:cstc2014yykfA110024)。

作者简介:余顺慧(1964—),女,重庆万州人,教授,主要从事植物生态学研究。Tel:(023)58105874;E-mail:ysh_dch@163.com。

变化趋势,耗水高峰在新梢生长期和果实膨大期。在新梢生长期进行适当的调亏灌溉(水分控制上限 60% FC)有利于葡萄植株的生长。果实膨大期充足的灌溉(水分控制上限为 85% FC)有利于果实灌浆。灌水量为 755 mm(处理Ⅳ)时,葡萄产量最高(5 366.7 kg/hm²),WUE 最大[7.11 kg/(hm²·mm)],因此滴灌葡萄适宜的灌溉制度参数:灌溉定额为 755 mm,灌水周期为 2 d,整个生育期期灌水 60 次。

葡萄耗水量受气象、土壤、水分、农业技术等多种因素影响,不同地域即使同一作物灌溉制度也不尽相同,为了制定大棚葡萄合理的灌溉制度,还须增加不同肥料水平来进行葡萄水分上、下限控制滴灌的试验研究。葡萄以鲜食为主,其果实的品质至关重要,因此在注重高产的同时,进一步研究品质和不同水分控制上限的关系,优选出高产、高效、优质的葡萄灌溉制度。

参考文献:

- [1]雷平.我国南方葡萄设施栽培营养障碍诊断及优质施肥技术研究[D].杭州:浙江大学,2010:32-35.
- [2]杨宝臣.红提葡萄日光温室栽培管理与病虫害防治技术[J].中国西部科技,2011,10(13):50,68.
- [3]严大义,赵常青,蔡之博,等.北方日光温室葡萄栽培技术探讨

- [J].中外葡萄与葡萄酒,2011(5):38-41.
- [4]程祖强,杨志华.伊犁河谷葡萄日光温室栽培技术[J].中国果菜,2009(4):20.
- [5]张新宁,伍光林,姜文胜,等.宁夏沙地葡萄栽培配套技术应用研究[J].林业科学研究,2004,17(增刊1):39-46.
- [6]杨慧慧,王振华,何新林,等.极端干旱区葡萄滴灌耗水规律试验研究[J].节水灌溉,2011(2):24-28,32.
- [7]邱德玉,罗永华.不同灌溉制度对设施葡萄水分利用效率及产量的影响[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):232-235,240.
- [8]何建斌,王振华,何新林,等.极端干旱区不同灌水量对滴灌葡萄生长及产量的影响[J].农学学报,2013,3(2):65-69.
- [9]王振华,权利双,何建斌.极端干旱区水肥耦合对滴灌葡萄耗水及产量的影响[J].节水灌溉,2014(6):13-15,18.
- [10]刘洪光,何新林,王雅琴,等.调亏灌溉对滴灌葡萄耗水规律及产量的影响研究[J].灌溉排水学报,2010,29(6):109-111.
- [11]王永杰,张江辉,王全九,等.极端干旱区滴灌葡萄适时控制灌溉试验研究[J].灌溉排水学报,2013,32(3):101-104.
- [12]中华人民共和国水利部.SL 13—2004 灌溉试验规范[S].
- [13]王会肖,刘昌明.作物水分利用效率内涵及研究进展[J].水科学进展,2000,11(1):99-104.
- [14]孙洪仁,刘国荣,张英俊,等.紫花苜蓿的需水量、耗水量、需水强度、耗水强度和水分利用效率研究[J].草业科学,2005,22(12):24-30.

为研究对象,设置不同浓度 Cr^{6+} 处理,测定不同处理延胡索生长发育状况及抗氧化酶活性等,为了提高延胡索的产量,优化其质量,提高经济效益,为栽培模式提供实践指导和理论依据,通过对延胡索进行不同铬浓度的处理,探讨重金属对其生长的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料采于重庆三峡学院百安坝校区实验基地。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 本试验在重庆三峡学院百安坝校区实验基地内完成。试验材料为 2014 年 10 月由浙江省东阳市农业局提供的延胡索块茎,从中挑选出大小基本一致的地下块茎 105 块,移栽至深 25 cm、内径 30 cm 的花盆中,每盆装土壤 8 kg,进行常规管理,让其自然生长。

采用 7 个处理,1 个对照,3 组平行,每盆装小粉土,按含铬 0、50、75、100、150、200、250、300 mg/kg 分别加入 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 混和均匀,重复 3 次,种植延胡索 5 块于每盆中。对照(CK)不含铬,定期检查生长情况。持续处理 4 个月时间,试验过程中除了重金属浓度不同以外,保持其余环境条件完全一致。

供试土壤肥力基础为:有机质含量 89%,全氮含量 0.23%,水解氮含量 12.58 mg/kg,速效钾含量 50.34 mg/kg,速效磷含量 11.34 mg/kg,含铅 13.4 mg/kg。

1.2.2 测定指标 120 d 后延胡索出现伤害症状,选取各植株上部第 3 或 4 张叶用于测定叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢(CAT)活性、丙二醛(MDA)活性和可溶性糖含量。

生物量的测定:在延胡索出现伤害症状后,收获,取其地下部分洗净称鲜质量,烘箱中 80 °C 烘干至恒质量称干质量。

叶绿素含量采用丙酮-乙醇分光光度法^[11]测定,3 个平行,计算平均值。

叶绿素的提取:鲜质量叶片剪成细丝状后准确称取 0.2 g 放入加有 25 mL 混合提取液(丙酮、乙醇体积比为 1:1)的洁净试管中,封口后将试管置于暗处直至叶片颜色完全变白。

使用江苏南京建成生物工程研究所购买的 SOD、POD 试剂盒测定 SOD、POD 活性。CAT 活性测定采用分光光度法^[11];丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[12];可溶性糖含量测定采用蒽酮法^[13];微波消解样品测定其重金属铬含量。

收获后,延胡索地下部分分别用自来水、去离子水冲洗 3 次,80 °C 烘干,粉碎后,精确称取延胡索各 0.200 0 g,加入酸液(浓 HNO_3 、浓 H_2SO_4 体积比为 4:1),同时做空白组;用 MARS240 微波消解系统消解以上溶液后,冷却。过滤(滤液在 25 mL 容量瓶中定容),保存在塑料瓶中,样品中 Cr^{6+} 含量(mg/kg 干质量)用 AA-6300 原子吸收分光光度计测定。

1.2.3 统计分析 数据处理和分析采用 Sigmaplot 10.0 软件;采用单因素方差分析方法(one-way ANOVA)进行平均值间的比较。

2 结果与分析

2.1 铬污染对延胡索生物量的影响

如表 1 所示,随着 Cr^{6+} 处理浓度升高,延胡索块茎的生物量呈现出递减趋势。不同 Cr^{6+} 处理条件下生物量差异不显著($P>0.05$)。这表明延胡索对 Cr^{6+} 有一定的耐性。研究表明,生物量在 Cr^{6+} 处理浓度为 200 mg/kg 时减少幅度突然增加,鲜质量由 150 mg/kg 的 28.40% 增加到 200 mg/kg 的 54.47%,干质量由 150 mg/kg 的 30.20% 增加到 200 mg/kg 的 65.77%(均和对照相比),说明 Cr^{6+} 污染浓度 200 mg/kg 对延胡索生长和产量有明显的影。在生产上要注意土壤中 Cr^{6+} 含量。

表 1 不同浓度铬处理对延胡索地下块茎生物量的影响

Cr^{6+} 浓度 (mg/kg)	鲜质量 (g)	干质量 (g)
0	11.62 ± 0.05h	4.47 ± 0.00h
50	10.56 ± 0.12g	4.07 ± 0.34g
75	9.67 ± 0.24f	3.78 ± 0.65f
100	8.44 ± 0.23e	3.52 ± 0.00e
150	8.32 ± 0.17d	3.12 ± 0.04d
200	5.29 ± 0.32c	1.53 ± 0.26c
250	4.08 ± 0.03b	1.06 ± 0.81b
300	3.92 ± 0.19a	1.01 ± 0.52a

注:测定值以“平均值 ± 标准误差”表示,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 Cr^{6+} 污染对延胡索叶绿素含量的影响

植物进行光合作用必需的色素为叶绿素,一定程度上其含量高低反映了光合作用水平,叶绿素含量低,光合作用弱。由图 1 可见:延胡索经 Cr^{6+} 处理后,与对照相比,在 Cr^{6+} 浓度 ≤ 100 mg/kg 时,叶绿素(a+b)含量随 Cr^{6+} 浓度的逐渐降低而减少;随着 Cr^{6+} 处理浓度的升高,各处理之间的差异越明显,叶绿素含量在 Cr^{6+} 浓度 > 150mg/kg 时明显下降,说明对延胡索叶片的伤害作用随着 Cr^{6+} 浓度升高而增大。

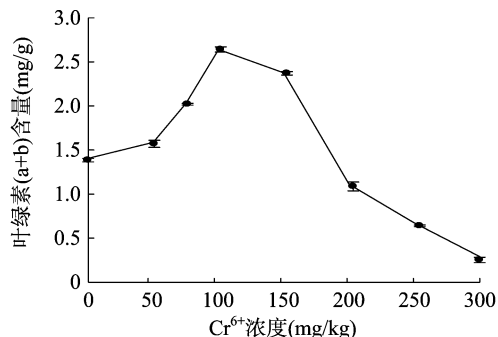
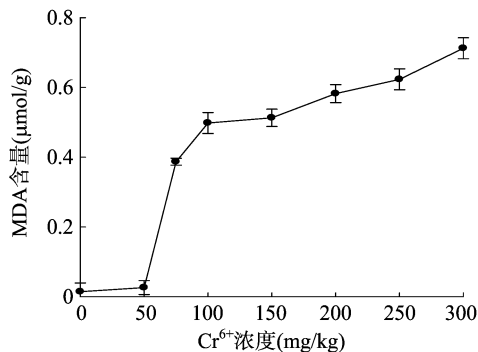


图 1 Cr^{6+} 胁迫对延胡索植株叶绿素(a+b)含量的影响

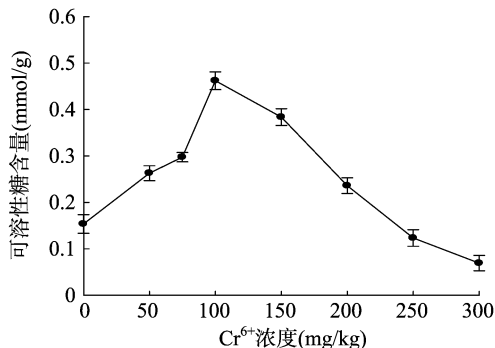
2.3 Cr^{6+} 污染对延胡索 MDA 含量的影响

MDA 是生物体内自由基作用于脂质发生过氧化反应所产生的氧化终产物,它会引起蛋白质、核酸等生物大分子的交联聚合,且具有细胞毒性,是植物膜系统受伤害的重要指标,其含量可反映膜脂过氧化的程度^[14]。从图 2 可以看出,随着 Cr^{6+} 浓度的不断升高,MDA 含量总体呈上升趋势,在 300 mg/kg 时最大,与对照相比,增加了 97.97%,表明了重金属胁迫大大提高了延胡索的膜脂过氧化水平,MDA 含量在植物体内迅速聚集,表示植物膜系统受伤害越来越严重,植物的抗逆性减弱。

图2 Cr⁶⁺污染对延胡索植株MDA含量的影响

2.4 Cr⁶⁺污染对延胡索可溶性糖含量的影响

可溶性糖具有调节渗透胁迫的作用,积累脯氨酸需要碳水化合物,脯氨酸的合成需要氧化还原能力,由碳水化合物通过氧化磷酸化作用提供,是植物代谢的基础物质。由图3可以看出,延胡索叶片细胞内可溶性糖含量随着Cr⁶⁺浓度的升高总体呈先升后下降趋势。延胡索叶片细胞内可溶性糖含量在Cr⁶⁺浓度为100 mg/kg时最大,比对照增加64.76%;随着Cr⁶⁺浓度的进一步升高,延胡索叶片细胞内可溶性糖含量逐渐降低,到300 mg/kg时最小,比对照减少了55.19%。这说明在Cr⁶⁺胁迫浓度较低时,Cr⁶⁺对其合成有一定的促进作用,高浓度Cr⁶⁺处理时,可溶性糖合成被抑制,对植物的生长发育有重大影响。

图3 Cr⁶⁺污染对延胡索植株可溶性糖含量的影响

2.5 Cr⁶⁺污染对延胡索抗氧化酶系统的影响

2.5.1 Cr⁶⁺污染对延胡索SOD活性的影响

植物体内存在抗氧化酶系统,由SOD、POD、CAT三者组成,若要有效清除植物细胞内的自由基和过氧化物,则需要它们三者的相互协调作用。清除细胞内的活性氧自由基由SOD酶完成。在逆境条件下,如重金属胁迫时,SOD酶能及时有效地清除植物细胞内产生的大量活性氧自由基,保护植物不被重金属胁迫。从图4中可以看出,SOD酶活性随着Cr⁶⁺浓度的升高呈下降的趋势,在Cr⁶⁺浓度为300 mg/kg时SOD活性最低,与对照相比,降低了93.10%。可能是在铬胁迫下植株SOD活性受到抑制,铬对延胡索叶片SOD活性毒害作用较大所致。

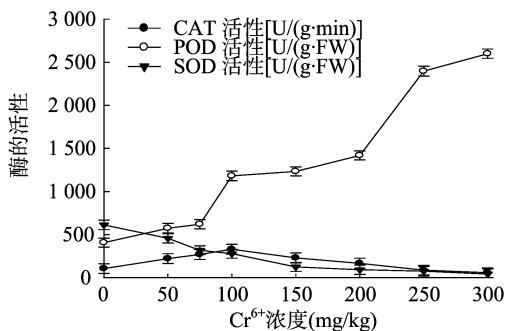
2.5.2 Cr⁶⁺污染对延胡索POD活性的影响

在植物叶片中,POD酶和SOD酶同等重要,其功能是将SOD酶的歧化产物双氧水分解成水。经研究发现,严重的逆境也可能增强POD的活性,因为逆境诱使植物产生更多的过氧化物。植物组织受到损害和破坏的程度越高,其POD活性越高。由图4可知,延胡索叶片的POD活性随着Cr⁶⁺浓度升高逐渐上升,

在300 mg/kg时最大,与对照相比,增加了84.38%,这说明在重金属Cr⁶⁺胁迫作用下,随Cr⁶⁺浓度升高,植物叶片内的过氧化氢迅速积累,导致植株叶片内POD活性大幅度增加。

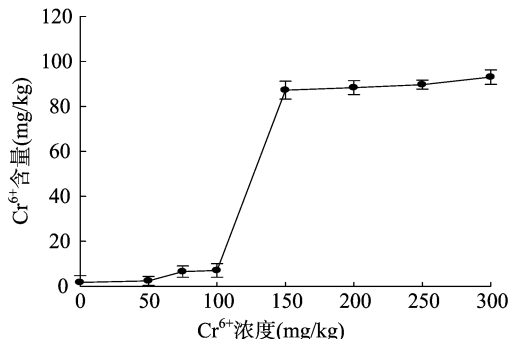
2.5.3 Cr⁶⁺污染对延胡索CAT活性的影响

CAT与SOD共同作用将H₂O₂分解为O₂和H₂O,催化能力很强。由图4可知,Cr⁶⁺浓度在小于100 mg/kg时延胡索叶片的CAT活性逐渐上升,在100 mg/kg时酶的活性最高,比对照增加了68.09%,之后CAT活性下降,在Cr⁶⁺浓度为300 mg/kg时最低,减小了45.71%(与对照相比)。究其原因,低浓度Cr⁶⁺促进植株催化过氧化氢的生成量出现增加,CAT活性出现升高,CAT活性在Cr⁶⁺浓度>100 mg/kg后开始逐渐下降。在Cr⁶⁺浓度为300 mg/kg时酶的活性最低,此时Cr⁶⁺胁迫对植株表现出抑制作用,植物CAT活性降低。

图4 Cr⁶⁺污染对延胡索植株CAT、SOD、POD活性的影响

2.6 Cr⁶⁺污染对延胡索重金属含量的影响

由图5可知,随着Cr⁶⁺浓度的升高,延胡索地下部分Cr⁶⁺积累量增加,各处理间差异明显,并且浓度越大,延胡索地下块茎Cr⁶⁺增长的幅度也越大,积累的量越大。在Cr⁶⁺浓度为150 mg/kg时,Cr⁶⁺含量增加速度最大,达到87.23 mg/kg,比Cr⁶⁺浓度为100 mg/kg时增加了91.95%;Cr⁶⁺浓度为300 mg/kg时,Cr⁶⁺积累量为93.04 mg/kg,比Cr⁶⁺浓度为250 mg/kg增加了3.62%。

图5 Cr⁶⁺污染下延胡索地下块茎中的Cr⁶⁺含量的影响

3 讨论与结论

3.1 Cr⁶⁺污染对延胡索生长的影响

Cr⁶⁺污染影响延胡索的生长。本研究发现,Cr⁶⁺污染降低延胡索的生物量和产量。随着Cr⁶⁺处理浓度的升高,延胡索块茎的生物量呈现出递减趋势,Cr⁶⁺污染浓度200 mg/kg对延胡索生长和产量有明显的影。鲜质量和干质量减少幅度突然增加,鲜质量由Cr⁶⁺污染浓度150 mg/kg时的

28.40% 增加到 200 mg/kg 时的 54.47%, 干质量由 150 mg/kg 的 30.20% 增加到 200 mg/kg 的 65.77% (均和对照相比)。

3.2 Cr⁶⁺ 污染对延胡索生理特性的影响

延胡索叶绿素含量能被 Cr⁶⁺ 污染明显影响。绿色植物进行光合作用的主要色素对植物的生长发育有着重要作用, 其含量在一定程度上能反映植物同化物质的能力。许多试验结果表明, 绿色植物的光合作用在重金属胁迫下都表现为抑制作用, 且抑制效果与胁迫的程度成正相关, 另外光合抑制也与植物种类和发育时期以及重金属的种类有关^[15]。本研究发现, Cr⁶⁺ 浓度小于 100 mg/kg 时, 叶绿素(a+b)含量随 Cr⁶⁺ 浓度逐渐降低而减少。下降原因可能是 Cr⁶⁺ 进入延胡索叶细胞内, 使叶绿体酶活性失调, 加速叶绿素分解, 同时由于 Cr⁶⁺ 局部积累较多, 与叶绿体中蛋白质上-SH 结合等使叶绿素蛋白中心离子组成发生变化而失和。如果重金属 Cr⁶⁺ 浓度够高, 植物不能进行光合作用得到足够的养分, 会出现生长缓慢, 甚至会停止生长, 其生物量降低。MDA 是一种高活性的膜脂过氧化产物, 其含量的多少能反映组织细胞膜损伤程度, 衰老和逆境引起组织中 MDA 含量的增加量与细胞膜损伤程度呈正相关, 而叶绿素含量与 MDA 含量呈显著负相关^[16]。本研究也获得了同样的结论, 并且叶绿素含量与 MDA 含量也呈现明显的负相关。由于 MDA 为高活性的膜脂过氧化物, 通过交联脂类、核酸、糖类及蛋白质可影响质膜和叶绿体片层膜的结构和功能, 影响膜的流动性及其与酶的结合力, 从而影响位于片层上的叶绿素含量^[17]。重金属 Cr⁶⁺ 对可溶性糖含量有影响, 可溶性糖含量随着重金属 Cr⁶⁺ 浓度的升高而先升后降, 可溶性糖是小分子物质, 具有调节渗透胁迫的作用, 可溶性糖含量的减少表明渗透调节胁迫系统紊乱, 氧化还原增强。

植物抗氧化酶系统由 SOD、POD 和 CAT 共同构成, 活性氧的生成和代谢受其活性直接影响^[18]。高活性抗氧化酶有利于提高植物对各种生物及非生物胁迫的耐受性^[19]。本研究表明, 低浓度 Cr⁶⁺ 处理, 对延胡索的 POD 活性和 CAT 活性均有增加作用, 而高浓度 Cr⁶⁺ 处理则表现抑制作用, 导致 CAT 活性降低, 而 POD 酶活性一直增加。可能低浓度的 Cr⁶⁺ 对 CAT 活性有一定的刺激作用, 这说明 CAT 对低浓度 Cr⁶⁺ 有耐受作用, 能在一定范围内催化有毒物质的分解, 但是超过一定的范围, 依然会破坏 CAT 的活性。POD 酶活性一直上升, 说明在重金属 Cr⁶⁺ 胁迫作用下, 随 Cr⁶⁺ 浓度的升高, 植物叶片内的过氧化氢迅速积累, 导致植株叶片内 POD 活性大幅度增加。但 SOD 活性随着 Cr⁶⁺ 浓度的升高逐渐降低, 低于对照处理。这说明 Cr⁶⁺ 对植株叶片 SOD 活性毒害作用较大, 植株 SOD 活性受到抑制明显。这一结果暗示保护酶系统在高浓度 Cr⁶⁺ 胁迫下对活性氧的清除能力大大削弱, 自由基在细胞内的积累已不能阻止, 使膜发生膜脂过氧化, 其过氧化产物 MDA 产生并积累, 膜透性增加, 导致膜功能受损, 从而引起细胞的衰老和死亡, 对植物产生抑制效应甚至毒害作用。

本研究结果表明, 延胡索的生长对 Cr⁶⁺ 污染有明显的影

应, 应尽量选择 Cr⁶⁺ 污染较少的土地进行。

参考文献:

- [1] Gu G W, Zhang H W. Trace elements and malignant tumor[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1993: 199-205.
- [2] Sharma D C, Sharma C P, Tripathi R D. Phytotoxic lesions of chromium in maize[J]. Chemosphere, 2003, 51(1): 63-68.
- [3] Choudhury S, Panda S K. Toxic effects, oxidative stress and ultrastructural changes in moss *Taxithelium nepalense* (Schwaegr.) Broth. under chromium and lead phytotoxicity[J]. Water Air and Soil Pollution, 2005, 167(1/2/3/4): 73-90.
- [4] Pandey V, Dixit V, Shyam R. Antioxidative responses in relation to growth of mustard (*Brassica juncea* cv. Pusa Jaikisan) plants exposed to hexavalent chromium[J]. Chemosphere, 2005, 61(1): 40-47.
- [5] Sinha S, Gupta A K, Bhatt K. Uptake and translocation of metals in fenugreek grown on soil amended with tannery sludge: involvement of antioxidants[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 67(2): 267-277.
- [6] 郑爱珍. 重金属 Cr⁶⁺ 污染对辣椒幼苗生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1343-1346.
- [7] 李廷真, 付川, 余顺慧, 等. Cu²⁺ 胁迫下三峡库区消落带的狗牙根生长状况及其铜富积效应[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(7): 184-186.
- [8] 余顺慧, 来守军, 王绍恒, 等. 铜胁迫对三峡库区消落带适生植物狗牙根生理特性和铜积累的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 38(11): 58-63.
- [9] 余顺慧, 黄怡民, 潘杰, 等. 铜胁迫对 2 种三峡库区消落带适生植物生长及铜积累的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(3): 1196-1201.
- [10] 潘杰, 来守军, 黄怡民, 等. 铅胁迫对 2 种三峡库区消落带适生植物生长及铅积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(6): 332-335.
- [11] 郝建军. 植物生理学试验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2004.
- [12] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(3): 207-210.
- [13] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [14] 李志刚, 梅利民, 万雪芹, 等. 低浓度重金属 Cr⁶⁺ 对紫狼尾草生理生化特性的影响[J]. 广西农业科学, 2009, 40(5): 478-482.
- [15] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
- [16] 严明理, 冯涛, 向言词, 等. 铈尾沙对油菜幼苗生长和生理特征的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4215-4222.
- [17] 徐振柱, 于振文, 重庆裕, 等. 水分胁迫对冬小麦旗叶细胞质膜及叶肉细胞超微结构的影响[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 370-375.
- [18] 韩金龙, 李慧, 蔺经, 等. 核黄素对盐胁迫下杜梨叶片抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(4): 893-898.
- [19] Vannini C, Iriti M, Bracale M A, et al. The ectopic expression of the rice *Osmyb4* gene in *Arabidopsis* increases tolerance to abiotic, environmental and biotic stresses[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2006, 69(1/2/3): 26-42.