高寒地区刺儿菜对重金属镉污染土壤修复效果研究＊

罗少辉】，王秀英2吴浩'盛海彦吋

(•青海大学农牧学院，青海 西宁810016；.青海省气象灾害防御技术中心，青海 西宁810001；  
3•青海省科学技术信息研究所，青海西宁810001)

摘要 为探究刺儿菜在不同施肥水平下对土壤重金属的修复作用与效果，对研究区进行了不同尿素水平的施肥试验，并 定量 分析了其试验结果。结果表明：施用231.5〜925.9 kg/hm2尿素，刺儿菜地上部分生物量和镉积累量均显著提高，镉提取率与对照组 相比升高了 15.44%〜35.12%，施用694.4 kg/hm2尿素时效果最佳。刺儿菜对镉的转移系数和富集系数均大于1具备超富集植物 的基本特征，可作为该污染区土壤修复的乡土植物。

关键词 高寒地区 刺儿菜 土壤 施肥 镉

D0l：10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.01.009

**Study on remediation effect of heavy metal cadmium contaminated soil by *Cephalanoplos* in alpine region** *LUO Shao- hui'，,WANG Xiuying2 ,WU Hao3 ,SHENG Haiyan1 .(.College of Agriculture and Animal Husbandry , Qinghai University , Xining Qinghai* 810016; 2. *Qinghai Meteorological Disastrr Prevention Technology Center*, *Xining Qinghai* 810001 *；.Qinghai Institute of Science and Technology Infomation , Xining Qinghai* 810001)

**Abstract**: In order to explore the heavy metal remediation effects of *Cephalanoplos* under different fertilizer

levels, different fertilization experiments were conducted and the results were analyzed. The results showed that cad­mium content and biomass in *Cephalanoplos* aerial part has significantly increased when 231.5-925.9 kg/hm2 urea were used. Compared with the control group, the extraction rate of cadmum increased by 15.44%-35.12% , and the beste**f**ectwasobtanedwhen694.4kg/hm2 ureawasused.Transfercoe**f**centandenrchmentcoe**f**centof*Cephal*- *anoplos* oncadmum wasgreaterthan1.*Cephalanoplos* couldbeusedasnatveplant nsolremedatonofthepo**l**u- tonareasnce thadthebasccharacterstcsofhyperaccumulators.

**Keywords**: alpine region； *Cephalanoplos ；* soil； fertilization； cadmium

第一作者:罗少辉，男，1986 年生，硕士，工程师，研究方向为土壤生态。＃通讯作者。

\*青海省科学技术研究项目(No.2009-J-803)。

土壤污染是世界公认的最为严重的环境问题之 一。我国土壤汞、镉污染最为严重，铅、砷、铬、铜的 污染也比较严重［**1**］。目前，我国10%的耕地存在不 同程度的重金属污染，全国每年因为重金属污染造 成的经济损失多达200 亿元［**2**］。因此，重金属污染 土壤的修复显得尤为重要，传统的物理和化学修复 法由于成本较高、易导致二次污染等缺点，无法进行 大规模的实施应用［**3**］；微生物修复技术可能会给土 壤和地下水带来生物污染，而且对含有机污染物的 盐碱土壤修复效果差［**4**］，因此植物修复可能成为重 金属污染土壤修复的重要手段。

植物修复可将有毒的有机污染物移除或转变成 为无毒或毒性较小的物质，实现污染土壤的原位修 复［**5**］。与传统方法相比，植物修复方法具有成本低、 自然美观、可进行大面积原位操作、无二次污染等特 点［**6**］。但是，植物生长不仅受到气候条件、地形地 貌、土壤性质等的影响［**7-9**］,而且大部分超富集植物 存在生长速率慢、生物量小等缺陷，因此通过强化措 施提高超富集植物的修复效率，并筛选出适应于污 染环境的本土物种是植物修复技术应用的重要发展 方向［**10**］。研究表明，合理施肥有利于提高超富集植 物的重金属去除效率［**11**］，并且明显提高植物修复效 率［**12-15**］。施肥不当可能导致土壤酸化或碱化等危 害［**16**］，与普通作物的施肥不同，在植物修复过程中 施肥除需要考虑养分之外，同时还需了解肥料中各 种元素与重金属的相互关系及其对植物吸收重金属 的影响。

目前，我国筛选的超富集镉植物有印度芥菜 *(Brassica jimcea****)、***宝山堇菜 *CViola baoshanensis)****、*** 遏蓝菜*(Thlaspi arvense* )等，但由于本研究区海拔 高、温度低、气候干燥，这些植物不能正常生长，因此 在当地乡土植物中筛选富集性强的植物极为重要。

刺儿菜（*Cephalanoplos）*作为高寒干旱区较为常见 的一种重金属富集植物，在正常生长时，能很好地吸 收土壤中的重金属；而当刺儿菜正常生长受抑时，则 会影响刺儿菜对重金属的提取能力。因此，刺儿菜 生长所需的养分条件就显得尤为重要。刺儿菜是草 本植物，在农田里作为杂草，具有较强的抗逆境能力 和争光、争水、争肥能力强的特点，有利于在逆境中 生长，特别当水肥条件得到改善后，生长迅速，生物 量增大，能够弥补现有超富集植物的不足［**17\**本研 究对高寒干旱区的本土重金属富集植物刺儿菜进行 了施肥研究，旨在探讨刺儿菜在不同施肥水平下的 重金属修复效果， 获取最佳施肥水平， 为土壤贫瘠的 高寒地区重金属污染的修复提供技术支撑。

1材料与方法

1. 研究区概况

研究区位于 36° 30' *02"* N 〜36° 35’ 39" N, 101°30'42"E〜101°32'25"E,海拔 2 576〜2 846 m, 近30年年平均气温4.3〜11.0 °C，昼夜温差大，属于 半干旱内陆高原气候。 多年平均降水量364〜582 mm,年积雪日数33.8 d,多年平均日照时数2 570 h。该区是青海重要的有色金属冶炼区，研究区土壤 为栗钙土，土壤耕层全氮1.9 g/kg,速效氮110 mg/kg，速效磷19 mg/kg，有机质13.0 g/kg,全镉 330 mg/kg。

1.2试验材料 肥料：尿素（氮质量分数为46％）。

供试植物：本土的刺儿菜种子，千粒重为（1 042± 0.034） g,发芽率为78%。

1. 田间试验方法

田间试验设计：采用单因素随机区组设计,共设5 组试验,3次重复,15 个小区,每小区面积为216 m**2** （4.5 m X4.8 m）。5组试验分别为：T1处理不施肥 （对照组），T2处理施0.5 kg尿素（即231.5 kg/hmz）, T3处理施1.0 kg尿素（即463.0 kg/hm**2**） ,T4处理施 1.5 kg 尿素（即 694.4 kg/hm**2**） ,T5 处理施 2.0 kg 尿素 （即925.9 kg/hm**2**）。肥料在播种前翻耕时作为基肥 一次性施入。

选择籽粒饱满的刺儿菜种子,01%（质量分数） HgC12消毒10 min,自来水中浸泡6〜8 h后，于20 C恒温培养箱内催芽。条播，定植密度为60 株**/m2**。待花期结束后进行收获，每小区随机取10 株,带回实验室测定。 土壤样品采集在植物样品采 集后进行，采用5 点法进行采样，组成混合样，土样 经过风干、玛瑙研钵研磨后，过025 mm 的尼龙筛， 保存待测。

1. 样品测定方法

土壤pH：酸度计法（土水质量比1.0 : 2.5）。

土壤有效态镉：采用二乙三胺五乙酸（DTPA） 提取。

植株样品消解：采用MARS 6型高通量密闭微 波消解仪消解。

土壤样品消解:采用HC1-HNOs-HClO』消煮法。

植物、土壤消解液中镉：采用Thermo Fisher

ICE-3300型原子吸收光谱仪分析。

1. 统计分析方法

试验结果绘图采用Microsoft Excel 2010 ,方差 分析使用DPS 7.5进行单因素统计，显著性检验使 用新复极差法 ［**18**］。

2结果与分析

2.1不同尿素施用量对土壤pH和有效态镉的影响 由表1可知，随着尿素施用量增加，土壤pH从 833下降至761，最多降低了86%；土壤全镉含量 大体呈下降趋势，但土壤有效态镉随着尿素施用量 的增加而升高，从1.26 mg/kg提高到1.38 mg/kg, 增加了95%。 究其原因，可能是由于施用的尿素水 解后转化为NH才和CO2,NH才对重金属离子的置 换作用降低了土壤对重金属的吸附，从而提高其有 效性；NH+在土壤中发生硝化作用，释放H+，使土 壤pH明显降低；作物吸收NH+时，根系分泌H+ , 造成土壤酸化，引起土壤中镉的形态分布产生一系 列变化，进而提高了有效态镉的含量。

表1不同施肥处理对土壤pH、有效态镉和全镉的影响"  
Table 1 The effect of different fertilizer treatments on pH,  
effective cadmium and total cadmium in the soil

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 处理 | pH | 有效态镉  **/**(mg **•** kgT **)** | 全镉  **/**(mg **•** kgT**)** |
| T1 | 8.33±0.05a | 1.26±0.04c | 3.26±0.04b |
| T2 | 8.12±0.04b | 1.31±0.02b | 3.17±0.02ab |
| T3 | 7.84±0.06c | 1.33±0.03ab | 3.11±0.03a |
| T4 | 7.69±0.03cd | 1.37±0.04a | 3.07±0.06a |
| T5 | 7.61±0.04d | 1.38±0.03a | 3.09±0.05a |

注：1；）a、b、c、d表示各处理在**a**=0.05水平上的显著性差异**。**

相同字母表示差异不显著**，**字母不同表示差异显著**，**表2**、**图1和 图2同**。**

1. 不同尿素施用量对刺儿菜生物量的影响 由图1可知，随着尿素施用量的提高，各处理植 株地上部分生物量大体逐渐增加，且T4、T5处理的 地上部分生物量显著高于T2处理，但T3处理与

• 41 •

T2 处理无显著性差异；施肥对地下部分生物量无显 著影响。氮是植物生长必须的营养元素，是蛋白质 和叶绿素的重要组成部分。氮素供应使得细胞分裂 快、增长迅速、植株高大、枝叶旺盛。但氮肥施用过 多会造成其他养分比例失调，影响植物的生长，甚至 造成植物发生病害。综上考虑，尿素施用量宜为 1.5〜2.0 kg(即 694.4〜925.9 kg/hm**2**)。

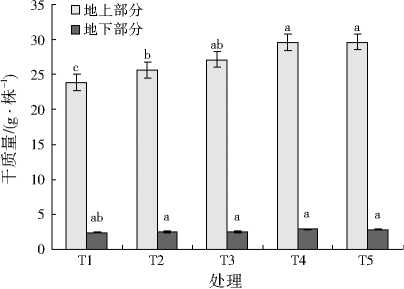


图1 不同施肥处理对刺儿菜生物量的影响

Fg.1 Thee**f**ectofd **f**erentfertlzertreatments  
onthebomassof*Cephalanoplos*

1. 不同尿素施用量对刺儿菜中镉的积累影响 植物不仅从土壤中吸收营养元素，也可以通过 根系代谢作用吸收土壤中的重金属并积累在茎叶和 籽实中。 由表2 可知，施用尿素基本可提高刺儿菜 地上、地下部分镉的浓度。其中，T3处理效果最佳, 地上部分镉从20.93 mg/kg升高到23.51 mg/kg，提 高了 12.3%，地下部分镉从6.71 mg/kg升高到6.90 mg/kg；其次为T4处理，地下部分镉为6. 82 mg/kg。 施用尿素可提高刺儿菜地上、地下部分镉 的浓度的原因可能为：尿素施用引起土壤pH下降, 提高了土壤中有效态镉含量，特别是其中的交换态 镉含量。 转移系数［**19**］是植物地上部分和地下部分 重金属含量的比值，可以体现植物从地下部分向地 上部分运输重金属的能力。由表2可知，T2、T3、T4 处理均可显著提高刺儿菜对镉的转移系数，提高刺 儿菜将镉从地下部分向地上的转移能力，其中 T3 处理效果最好，转移系数从3.12升高到3.41，其次 表2不同施肥处理刺儿菜中镉的质量浓度

Table2 Concentrationofcadmiumindi**f**erent

fertilizationtreatments

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 处理 | 地上部分镉  /(mg • kgT) | 地下部分镉  /(mg • kgT) | 转移  系数 | 富集  系数 |
| T1 | 20.93±0.19c | 6.71±0.11b | 3.12c | 6.50d |
| T2 | 22.27±0.21b | 6.73±0.20b | 3.31b | 7.03bc |
| T3 | 23.51±0.11a | 6.90±0.15a | 3.41a | 7.51a |
| T4 | 22.82±0.27ab | 6.82±0.09ab | 3.35b | 7.18b |
| T5 | 21.14±0.16bc | 6.70±0.12b | 3.16c | 6.80c |

为T4处理，转移系数升高到3.35。

富集系数是指植物中某元素含量与土壤中该元 素含量之比，表征土壤/植物体系中元素迁移的难易 程度，是反映植物将重金属吸收转移到体内的能力 大小的评价指标，富集系数越大，其富集能力越强。 表2表明，施用尿素显著提高了刺儿菜对镉的富集 系数，最高可从6.50 升高到7.51，升高了15.5%。 可能是施用尿素后降低了土壤的pH,使土壤中碳酸 盐结合态镉和铁锰氧化物结合态镉转变为交换态 镉，从而增加了镉的有效性；而且氮素的供给，使植 物代谢增强，可促进对镉的吸收。

由图2可知，随着植物对水分和养分的吸收，施 用尿素后，提高了刺儿菜地上部分对镉的积累。 T4 处理时，刺儿菜地上部分的镉积累量显著高于其他 处理。

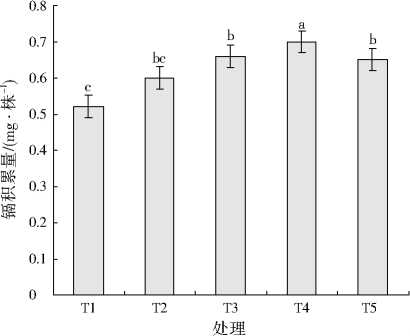


图2 不同施肥处理下刺儿菜地上部分的镉积累量  
Fig.2 The accumulation of cadmium on the above－ground  
partof*Cephalanoplos* indi**f**erentfertilizationtreatments

1. 不同尿素施用量对刺儿菜修复镉污染土壤的 效果影响 植物修复重金属污染土壤能力的大小与植物体 内重金属的含量及地上部分生物量有直接关系， 通 常用重金属提取率来表征。 重金属提取率是指植物 地上部分的重金属积累量与土壤中同种重金属量的 比值。 由表3 可知，污染土壤中镉为3.30 mg/kg， 刺儿菜种植密度为60株**/m2**时，施用尿素可以提高 刺儿菜对镉的提取率，随着尿素施用量的升高，提取 率从4.47%最高可升高到6.04%，升高了35.12%， 即 T4 处理 。

表3 不同施肥处理的镉提取率

Table3 Extractionrateofcadmiumindi**f**erent

fertilizationtreatments

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 处理 | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 |
| 提取率/% | 4.47 | 5.16 | 5.71 | 6.04 | 5.65 |
| 较对照提高/ % |  | 15.44 | 27.74 | 35.12 | 26.40 |

3结语

1. 刺儿菜的镉含量地上部分大于地下部分， 且富集系数也大于1，具备了超富集植物的基本特 征，且刺儿菜具有较高的生物量，有利于提高植物提 取修复的效率，可以作为本污染区土壤修复的乡土 植物。
2. 施用231.5〜925.9 kg/hm**2**尿素不仅可以 提高刺儿菜的生物量，而且对其地上部分的镉积累 量有着显著提高。
3. 施用尿素可提高刺儿菜对镉的提取率，提 取率最高可达6.04%。在利用刺儿菜对本污染区土 壤修复时，可以通过施用尿素来提升镉污染土壤修 复的效果，其中施用694.4 kg/hm**2**尿素效果最佳。

参考文献：

：1]林玉锁，李波，张孝飞.我国土壤环境安全面临的突出问题[J]. 环境保护，2004(10)：39-42.

[2]骆永明，滕应.我国土壤污染退化状况及防治对策[J].土壤,

2006，38(5)：505-508.

：3]戴树桂.环境化学进展[M].北京：化学工业出版社，2005.

「4] ZIIUANG X L,IIAN Z,BAI Z II,et al.Progress in decontami­

nation by halophilic microorganisms in saline wastewater and

soil[J].Environmental Pollution,2010,158(5) : 1119-1126.

PRADIIAN S P,CONRAD J R,PATEREK J R,et al.Potential

of phytoremediation for treatment of PAIIs in soil at MGP sites]J].Journal of Soil Contamination, 1998,7(4) ：467-480.

1. CAI Z, ZHOU Q X, PENG S W,et al.Promoted biodegrada-

tionand microbiologicale**f**ectsofpetroleum hydrocarbonsby ***Impatiens balsamina*** L．withstrongendurance[J] Journalof Iazardous Materials,2010,183(1/2/3)：731-737．

1. MICHAEL R,YUEN S, BAKER A, et al. A sustainable ap­proach for hydraulic control of landlills using quarry scalpings andnativeplants[J] AustralianJournalof Multi-Disciplinary Engineering,2007,5(1)：39-48．
2. TODD A A,ELIZABETI A,BARBARA T．Bioremediationin the rhizosphere [J] Environmental Science ＆ Technology, 1993,27(13)：2630-2636．
3. ZIOU Q X,CAIZ,ZIANG Z Ecologicalremediationofhy- drocarboncontaminated soils with weed plant[J] Journalof ResourcesandEcology,2011,2(2)：97-105．
4. 廖晓勇,陈同斌,阎秀兰,等．提高植物修复效率的技术途径与

强化措施「J].环境科学学报，2007,27(6):881-893.

「11] SOUDEK P,TYKVA R, VANEK T. Laboratory analyses of

137Csuptakebysunflower,reedandpoplar[J]Chemosphere, 2004,55(7):1081-1087．

「12] ANDERSON CW N,BROKS R,CIIIARUCCI A,t al.Phyto mining for nickel,tha**l** ium and gold「J] Journal of Geochemi- calExploration,1999,67:407-415．

「13] TASSI E,PEDRON F,BARBAFIERA M,t alPhosphate-as-

sisted peyote traction in As-contaminated soil「J] Engineering

inLifeSciences,2004,4(4):341-346．

「14] WU L I,LII,LUO Y M,etalNutrientscanenhancephy- toremediationofcopper-po**l**utedsoilbyIndian mustard「J]． EnvironmentalGeochemistryand Iealth,2004,26(2):331- 335．

「15]廖晓勇•典型地区土壤砷污染的现状评价与植物修复[D].北 京:中国科学院地理科学与资源研究所,2004．

「16] SWORD M A．Seasonldevelopmentofloblo**l**y pinelateral

rootsinresponsetostanddensityandfertilization「J] Plant andSoil,1998,200(1):21-25．

「17] 罗少辉,聂秀青,盛海彦,等．高寒干旱区乡土植物重金属富集 性的研究「]•湖北农业科学，2013,52():1848-1852.

「8] 盖钧镒.试验统计方法[M].北京：中国农业出版社,000.

「19] FAYIGA A. Arsenic up take by two hyper accumulator ferns fromfourarseniccontaminatedsoils「J] Water,Air,andSoil Po**l**ution,2005,168(1/2/3/4):71-89．

编辑：胡翠娟 (收稿日期:2017-03-15)

(上接第39 页)

「21] WANGLF, IE D Q,TONG Z I,etalCharacterizationof dewateringprocessofactivatedsludgeassistedbycationicsur- factants「J] BiochemicalEngineeringJournal,2014,91:174- 178．

「22] IIGGINS M J,NOVAK J T．Dewatering and se**t**ling of acti-

vatedsludges:thecaseforusingcationanalysis「J] WaterEn- vironmentResearch,1997,69(2):225-232．

「23] ZIANG C,CIEN Y．Simultaneousnitrogenandphosphorus recoveryfromsludge-fermentationliquidmixtureandapplica- tion of the fermentation liquid to enhance municipal wastewaterbiologicalnutrientremoval「J]EnvironmentalSci- ence ＆ Technology,2009,43(16):6164-6170．

「24] 朱英,赵由才,李鸿江,等．污泥填埋稳定化过程中的物理、化 学性状变化「]•生态环境学报，2009,18():1207-1212.

「25] NEYENSE,BAEYENSJ,CREEMERSC．Alkalinethermalsludge hydrolysis「J]JournalofIazardousMaterials,2003,97(1/2/3): 295-314．

「26]严伟嘉，孙永军，冯丽颖，等.污泥调理技术研究进展「]. 土木 建筑与环境工程,2015,37(增刊1):41-45．

「7]武博然，柴晓利•疏浚底泥固化改性与资源化利用技术「].环 境工程学报,2016,10(1):335-342．

「28] MUDRAGADA R, KUNDRAL S, CORO E,etalPhosphor- ousremovalduringsludgedewateringtopreventstruvitefor- mationinsludgedigestersbyfu**l**scaleevaluation「J]Journal of WaterProcessEngineering,2014,2:37-42．

「29] QIAN Y, IUANGZX,YANZGIntegratedassessmentofenvi- ronmentalandeconomicperformanceofchemicalproductsusing analytichierarchyprocessapproach「J] ChineseJournalofChemi- calEngineering,2007,15(1):81-87．

「30] 王新民,康虔,秦健春,等．层次分析法—可拓学模型在岩质边坡 稳定性安全评价中的应用「]•中南大学学报(自然科学版), 2013,44(6):2455-2462．

编辑：胡翠娟 (收稿日期:2017-05-31)