王垚，李江遐，王冬良，等.基于Cd污染土壤修复的天竺葵品种差异性研究J].环境科学与技术，2019,42(10): 148-154. Wang Yao, Li Jiangxia, Wang Dongliang, et al. Study on variety difference of *Pelargonium* for rehabilitation of contaminated soil based on Cd[J]. Environmental Science & Tech- nology,2019,42(10):148-154.

基于Cd污染土壤修复的天竺葵品种差异性研究

王垚 1， 李江遐 1， 王冬良 2， 李丁 3， 马友华 1\*

(1. 安徽农业大学资源与环境学院,安徽 合肥 230036； 2. 安徽农业大学园艺学院,安徽 合肥 230036；

3. 芜湖格丰环保科技研究院有限公司,安徽 芜湖 241080)

**摘 要：**花卉修复重金属污染土壤,既能有效降低土壤重金属污染,又可美化环境,带来一定的经济效益。为探讨不同品种天竺葵 *(Pelargonium hortorum)*对重金属的耐性，通过温室盆栽方式，研究了在土壤Cd污染和添加活化剂EDTA下，不同品种天竺葵对Cd耐性 和富集特征。结果表明：(1)在Cd重金属胁迫下，除“迪娃玫粉渐变”卜，其余8个品种天竺葵生长均受抑制，土壤添加活化剂EDTA 后,“'地平线苹果红色”品种生长抑制最明显，但植株依然能保持生长；2)9种天竺葵地上部分Cd含量和地下部分Cd含量分别为 0.21〜1.04 mg/kg和1.12~4.08 mg/kg,其中“迪娃树莓脉纹”“地平线淡蓝色”地上部和根部Cd含量最高“地平线淡蓝色”在添加活化剂 后,地上部Cd含量相比较污染土上Cd含量增长了 0.60 mg/kg；(3“地平线绯红色”“地平线玫瑰”地上部对Cd的富集系数达到最大值 0.221“地平线淡蓝色”根部对Cd的富集系数达到最大值1.700,添加活化剂后“地平线淡蓝色”地上部与根部Cd的富集系数分别达到 0.395和1.875 ； (4)“地平线玫瑰”“'地平线淡蓝色”在2种处理下,地上部Cd累积量达到最大值*,*分别为0.855憾/株和0・781憾/株“迪 娃玫粉渐变”在2种处理下根部Cd累积量达到最大,分别为3.632 wg/株和3.262 ^g/株；(5)不同品种天竺葵植株内氮、磷、钾含量存在显 著差异,Cd污染土壤在一定稈度上促进了天竺葵对营养元素的吸收，其中“地平线绯红色”属于吸收氮磷钾较多的品种。综合生物量、 Cd富集系数、营养元素分析“迪娃玫粉渐变”“地平线杂色”“地平线玫瑰”“地平线淡蓝色”个品种对Cd都具有较好的吸收，不论 是污染土壤还是污染土壤+EDTA上，在所筛选的品种中都有很大的优势。

**关键词：**天竺葵； 重金属； Cd； 富集

**中图分类号**：X503.233 **文献标志码:**A **doi：** 10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.10.023 **文章编号：**1003—6504(2019)10—0148—07

Study on Variety Difference of *Pelargonium* for Rehabilitation  
of Contaminated Soil Based on Cd

WANG Yao1, LI Jiangxia1, WANG Dongliang2, LI Ding3, MA Youhua1\*

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. College of Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

3. Wuhu Gefeng Environmental Protection Technology Research Institute Co. LTD, Wuhu 241080, China)

Abstract：Flower remediation of heavy metal contaminated soil can not only effectively reduce heavy metal pollution in soil, but also beautify the environment, bringing certain economic benefits. In order to investigate the tolerance of different *Pelar­gonium hortorum* varieties to heavy metals, the tolerance and accumulation characteristics of different *Pelargonium* varieties under Cd pollution and EDTA were studied by pot culture in greenhouse. The results showed that under Cd stress, the growth of 8 *Pelargonium cultivars* was inhibited except "Dewa Rose Powder Gradual Change". The growth of "Horizontal Apple Red" cultivars was inhibited most obviously by adding activator (EDTA) to the soil, but the plants couldstill grow. Cd content in the above ground part and the Cd content in the underground part of nine *Pelargonium cultivars* were 0.21~1.04 mg/kg and 1.12~4.08 mg/kg, respectively. The content of Cd in the above—ground and root parts of "Deva Raspberry Vein" and "Horizon Light Blue" were the highest, and the content of Cd in the above—ground part increased by 0.60 mg/kg compared with that in the polluted soil after adding activator. The enrichment coefficients of cadmium in the aboveground parts of "Horizon Rose" and "Horizon Pale Blue" reached the maximum of 0.221, and that in the root parts of "Horizon Pale Blue" reached the maximum of 1.700. After adding activator, the enrichment coefficients of cadmium in the aboveground parts and root parts of

**《环境科学与技术》编辑部：（**网址）http://fjks.chinajournal.net.cn（电话）027-87643502（电子信箱）hjkxyjs@vip.126.com **收稿日期：**2019—05—13 ；修回2019—07—02

**基金项目：**安徽省科技重大攻关项目：农田重金属污染高效修复材料的开发与应用（17030701053）；安徽省重点研发专项（11008762）

**作者简介:**王垚（1994-）,女，硕士研究生，主要从事土壤重金属污染与修复,（电子信箱）976404763@qq.com；通讯作者，（电子信箱）yhma@ahau. edu.cn。

"Horizon Pale Blue" reached 0.395 and 1.875 respectively. Under the two treatments, the accumulation of cadmium in the shoot of "Horizon Rose” and root of "Horizon Blue" reached the maximum value, 0.855 Rg/plant and 0.781 Rg/plant respec­tively, and the accumulation of cadmium in the root of "Dewa Rose Powder Gradual Change" reached the maximum, which was 3.632 Rg/plant and 3.262 Rg/plant respectively. There were significant differences in the contents of nitrogen, phosphorus and potassium in different varieties of geranium plants. In contrast, Cd-contaminated soil promoted the uptake of nutrients by geranium to a certain extent, among which "Horizon Scarlet" belonged to the species that absorbed more nitrogen, phosphorus and potassium. In terms of biomass, Cd enrichment coefficient and nutrient elements, the varieties of "Dewa Rose Powder Gradual Change", "Horizon Variety", "HorizonRose" and "Horizon Light Blue" all have good absorption of Cd, and they have great advantages over both contaminated soil and contaminated soil+EDTA.

Key words：geranium; heavy metals; Cd; enrichment

近年来，重金属污染问题尤其突出。据《全国土 壤污染状况调查公报》显示，我国遭受Cd污染的农田 已达1.33X104 hm2叭植物对必需营养元素的吸收会 因为过量的Cd胁迫而导致作物减产，进而危害人体 健康［2］。根据农用地土壤污染风险管控标准，土壤中 的重金属含量超过风险管控值时，应当禁止种植食 用农产品，进行种植结构调整，国内外对于重金属污 染土壤的治理已多有研究和实践，植物修复因具有 修复成本低、不毁坏土壤结构、植物取材方便、改善 环境的同时还能提高土壤肥力又不产生二次污染等 诸多优点［3］成为当前国内外研究的热门，植物利用自 身的生长代谢活动来降低存在于土壤中的重金属浓 度，从而实现环境净化、生态效应恢复。同时向土壤 中施加乙二胺四乙酸(EDTA )等螯合剂能不同程度地 解析、活化出土壤中的重金属，促进植物对重金属的 吸收［4-6］。

天竺葵因其经济价值高而广泛应用于医药和化妆 品业，在利用其治理重金属方面较少的报道。 Majid Mahdieh等［7］通过水培实验研究发现,在低浓度(250， 500 mg/L)和中等水平(750 mg/L)条件下，香叶天竺 葵根系对Cd的吸收和积累量随浓度的增加而增加， 但在最高水平(1 000 mg/L)时开始出现下降。牟祚 民等［8］研究了不同浓度的Pb2+、Cd2+、Cu2+、Zn2+对天竺 葵生长和生理特性的影响。结果表明，天竺葵对4 种重金属均有一定的耐性，是修复重金属污染土壤 的潜力花卉，但土壤重金属生物有效性低则会影响 修复效果，重金属一旦进入土壤，将通过一系列物 理、化学等过程转化为难溶态，无法直接被植物吸 收利用［5］。

本试验通过比较不同品种天竺葵在土壤Cd污染 胁迫，以及加入EDTA下，研究不同品种天竺葵生长 状况，Cd在天竺葵内的富集和转移能力以及加入 EDTA对天竺葵修复重金属污染的增效作用。为农 田土壤Cd重度污染或限制使用下，种植结构调整修 复重金属污染提供技术依据。

1. 材料与方法
   1. 供试材料

试验供试天竺葵系牻牛儿苗科天竺葵属多年生 草本植物，原产南非。灌木状草本，蔓生，性喜温暖、 阳光充沛和肥沃、疏松、排水良好的土壤环境条件生 长，收集的品种为园艺学院提供的地平线系列和迪娃 系列，分别为“地平线淡蓝色”、“地平线苹果红色”、 “迪娃树莓脉纹”、“地平线腥红色(PELO3)”、“地平线 杂色”、“地平线绯红色”、“地平线红色”、“迪娃玫粉渐 变”和“地平线玫瑰”9个品种。

供试清洁土壤和Cd污染土壤采自安徽省某矿区 周边，土壤类型为黄红壤，采样深度为0~20cm。供试 土壤基本理化性质见表1，其污染土中Cd的含量，超过 农用地土壤污染风险管制值(GB 15618-2018)。

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the soil under test

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土壤类型 | pH | 有机质/(g・kg-1) | 碱解氮/(mg・kg-1) | 有效磷/(mg・kg-1) | 速效钾/(mg・kg-1) | 全量 Cd/(mg・kg-1) |
| 清洁土 | 5.83 | 30.11 | 121.54 | 6.8 | 120 | 0.266 |
| 污染土 | 5.14 | 22.66 | 137 | 29.4 | 78 | 2.400 |

* 1. 试验方法

采集的清洁土壤与污染土壤风干后，去除残渣过 筛备用，然后按照每盆1 kg干土的标准装入塑料花 盆。将装有干土的塑料花盆置于阳光大棚中，将在基 质穴盘中长出4片真叶的的天竺葵，挑选长势一致的 幼苗移栽至塑料花盆，并控制土壤含水量为田间持水 量的 60%。施肥:N:200 mg/kg 土 ；P:12 mg/kg 土 ； K: 200 mg/kg 土。即氮肥(尿素):430 mg/kg 土 ；磷肥(过磷酸钙）:56 mg/kg 土，钾肥（氯化钾）：484 mg/kg 土，试 验以清洁土壤作为对照（CK） ,T1和T2处理分别为污 染土壤和污染土壤+EDTA,其中EDTA添加量为5 mmol/kg。每个处理2次重复，每盆1株共54株，种植 深度2~3 cm,使土壤湿度基本一致。该试验大棚温度 为（30±3）贮。种植3个月后，样品按根部和地上部收 集,分别测定其养分含量、生物量以及Cd含量等。

* 1. 测定方法

将烘干至恒重的天竺葵幼苗根与茎叶样品粉碎 至粉末,采用H2SO4-HQ2法消煮,植株中氮磷含量采 用流动分析仪进行测定，钾含量采用火焰分光光度计 测定。采用电感耦合等离子体质谱仪测定植株Cd含 量,参照GB 5009.268-2016食品安全国家标准食品中 多元素进行测定。

Cd积累量=植株地上部或根系生物量x植株地上 部或根系Cd含量

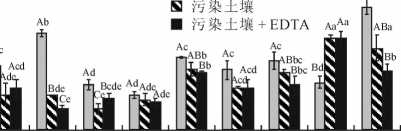
富集系数=植物某部位Cd含量/ 土壤中Cd含量 转运系数=地上部Cd含量/根系Cd含量 差异率=（处理值-对照值）/对照值X100%

* 1. 数据分析

所有数据均为2次独立试验的平均值，数据采用 SPSS 17.0软件统计分析，最小显著性差异法（LSD）检 验,Microsoft Excel 2007制表作图。显著性水平设定 为 *a*=0.05。

1. 结果与分析
   1. 重金属胁迫对不同品种天竺葵生物量的影响 在污染土壤上种植的天竺葵幼苗收获后，9个品 种天竺葵地上和地下生物量表现出不同的变化趋势 及程度（图1、2）。与对照相比，除“迪娃玫粉渐变”生 物量增加外，其余品种均呈现降低的趋势，地上部生 物量降低的有8种，与对照达到显著差异（*p*<0.05）的 有4种，降低最大的“地平线苹果红色”，达65.45%，地 下生物量与对照相比没有形成显著性差异（***卩***<0.05）, 降低最大的“迪娃树莓脉纹”，达51.22%，在污染土壤+ EDTA上种植的天竺葵幼苗收获后,“地平线玫瑰”、 迪娃树莓脉纹”、“地平线红色”和“迪娃玫粉渐变”4 个品种均与对照和污染土形成显著差异，最大增福为 迪娃玫粉渐变” ，达93.62%。

在污染土上，地上生物量、地下生物量的差异率 变化分别在13.24%~93.26%、4.22%~39.76%，在污染 土+EDTA上,地上生物量、地下生物量的差异率变化 分别在19.72%~93.26%、4.88%~26.51%，说明植物间 对Cd的耐性差异变化较大，“迪娃玫粉渐变”、“地平 线杂色”和“地平线玫瑰”均表现出较好的耐性，而 有的品种受到显著影响。此外，同一品种天竺葵地 上部与根系变化幅度与变化趋势不同，表现较为明 显的是“地平线杂色”，表现出地下部促进而地上部 抑制。



**3.0**

**2.5**

**2.0**

**1.5**

**1.0**

**0.5**

**0.0**

■对照 Aa



不同品种

图中大写字母表示同一品种不同处理间差异显著**（p<0.05）,**

小写字母表示同一处理不同品种间的差异显著**（p<0.05）,**下同。

图1 Cd污染土壤中不囘品种天竺葵地上部生物量

Fig.l Above-ground biomass of different species  
of geranium in Cd contaminated soil

**1.4**

**1.2**

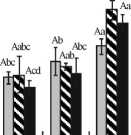
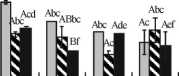
**1.0**

**0.8**

**0.6**

**0.4**

**0.2**

不同品种

□对照

K污染土壤

■污染土壤**+EDTA**

Ab

Aa

Aa

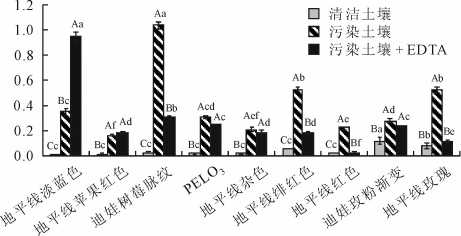
图2 Cd污染土壤中不国品种天竺葵地下部生物量

Fig.2 Underground biomass of different geranium  
species in Cd contaminated soil

* 1. 不同品种天竺葵内Cd含量和累积量差异性研究

植物对土壤中Cd的吸收会由于品种、转运能力 不同表现出一定的差异性［9］。通过检测天竺葵植株中 Cd的含量发现,天竺葵体内的重金属主要积累于根 部，茎叶部分含量相对较低（图3、4） 。

在污染土上,地上部Cd含量为0.17~1.04 mg/kg, “迪娃树莓脉纹” Cd含量显著高于其他品种（***卩***<0.05）, 可达到1.04 mg/kg,所选的天竺葵品种Cd含量的平均 值为0.40 mg/kg,变异系数为66.9%，添加活化剂后, 地上部Cd含量最高的为地平线淡蓝色，可达0.95 mg/kg,相比较污染土上，地上部含量提高了 171.43%。 而迪娃树莓脉纹相比较污染土上，含量降低了 70.19%,植株地上部Cd含量的平均值为0.27 mg/kg, 变异系数为96.81% ；在污染土上，根部Cd含量整体处 于1.12~4.08 mg/kg,最高的为地平线淡蓝色,可达 4.08 mg/kg,含量最低的为PELO3，为1.12 mg/kg,地平 线淡蓝色是PELO3的3倍，平均值为2.82 mg/kg,变异 系数为32.88%,添加活化剂后，根部Cd含量最高的为 地平线淡蓝色，可达4.50 mg/kg,相比较污染土上,根 部Cd含量提高了 10.29%。含量最低的为地平线绯红

色，仅为1.23 mg/kg,相比较污染土上，根部Cd含量降 低了47.65%,植株根部Cd含量的平均值为2.90 mg/kg, 变异系 数为 35.59% ，可以看出，不同品种间对 Cd 的 吸收也存在着显著差异,EDTA既能够促进地平线 淡蓝色对 Cd 的吸收，也能抑制其他品种对 Cd 的吸 收，根部 Cd 含量的变异程度整体要小于地上部 Cd

O

不同品种

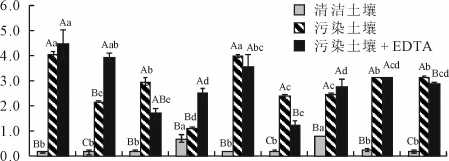


图3在不同处理下不同品种天竺葵地上部Cd的含量

Fig.3 The content of Cd in the aerial parts of different geranium varieties under different treatments

(I空・3UI)誠刼黑駅$虽



不同品种

图4在不同处理下不同品种天竺翠根部Cd的含.量

Fig.4 The content of Cd in roots of different geranium cultivars under different treatments

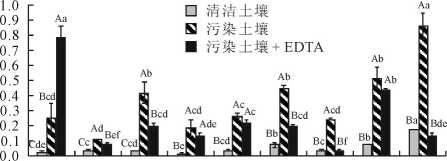
Cd积累量指的是植物体内积累Cd的总量，可反

映出不同品种天竺葵对Cd的吸收能力，而地上部Cd 单株积累量可反映出植物净化土壤污染的潜力，由图

5 可以看出，在清洁土壤上，所选的天竺葵地上部积累 量最大值为0.176 wg, 出现在“地平线玫瑰”，显著高 于其他品种（***卩***＜0.05）,其次，“地平线玫瑰”、“迪娃玫 粉渐变” 、“地平线绯红色”和“迪娃树莓脉纹”4个品种 在污染土上对 Cd 的积累量也显著高于其他品种，且 具有较大的生物量，添加 EDTA 后，不同品种天竺葵 地上部镉的积累量整体处于0.035~0.781 wg/株，其中 地平线淡蓝色”表现出较好的耐性，而有的品种则受 到显著影响。此卜， “地平线玫瑰” 、 “迪娃玫粉渐变” 和“地平线杂色”根部积累Cd含量也显著高于其他品 种，并拥有较大的生物量（图6） ，故可将其应用于土壤 Cd污染的固定。

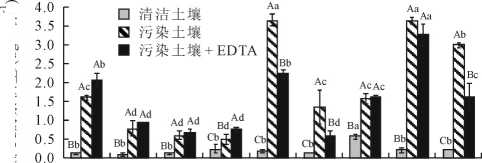
2.3 不同品种天竺葵植株中Cd的富集分析

通常土壤中某金属元素含量越高，种植的植物中 该金属元素含量往往也较高，但就植物种类不同、植

物部位不同，植物体中重金属含量都会存在较大差 异［10］。不同优势植物体内重金属含量存在不同程度 的差异，这可能与不同品种天竺葵对对重金属吸收 转移和富集有关。

(一抵-an)、咽來砾gpo^q-^

不同品种



目5在不同处理丁不同品种天竺葵地上部Cd的累犁量

Fig. 5 Accumulation of Cd in shoots of different geranium cultivars under different treatments

fc・mn)嗣駆除SPOB樂



不同品种

图6在不同处聖下不同品种天竺葵根部Cd的累积量

Fig. 6 Cumulative amount of Cd in roots of different  
geranium cultivars under different treatments

富集系数（BCF）是指植物某部分重金属含量与 土壤中重金属含量的比值，富集系数越大，表示植物 地上部或根部部分中重金属含量越大。

由表2可以看出，由于天竺葵根部对Cd的固定和 区隔化较强，使得仅有少量的 Cd 能通过木质部导管 运输至地上部，从而减缓 Cd 对植物地上部分的胁 迫，导致其根部富集系数远高于地上部。在污染土 壤上，地上部 Cd 的富集系数处于 0.07~0.221 之间，富 集系数最大值出现在“地平线绯红色”和“地平线玫 瑰”是“地平线苹果红色”的 3 倍，添加活化剂后，除 地平线淡蓝色”和“地平线苹果红色”卜，其余品种 地上部Cd的富集系数均呈现降低趋势;地下部Cd的 富集系数处于 0.467~1.700 之间，其中“地平线杂色” 地平线淡蓝色”、“迪娃玫粉渐变”、“地平线玫瑰” “迪娃树莓脉纹”、“地平线红色”个品种根部分对Cd 的富集超过 1，分别为 1.021、1.229、1.304、1.304、1.663 和1.700,添加活化剂EDTA后,PELO3、“地平线淡蓝 色”、“地平线苹果红色”、“地平线红色”和“地平线 玫 瑰 ” 5 个 品 种 根 部 富 集 系 数 都 有 所 增 加 ，其中 PELO3和“地平线苹果红色”个品种Cd的富集超过 1，分别为1.650 和 1.038。

表2 Cd胁迫下不同品种天竺葵的富集系数(BCF)

Table 2 Concentration factor (BCF) of different geranium cultivars under Cd stress

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 品种 | 清洁土壤 | | 污染土 | | 污染土+EDTA | |
| 地上  富集 | 地下  富集 | 地上  富集 | 地下  富集 | 地上  富集 | 地下  富集 |
| 地平线淡蓝色 | 0.007 | 0.063 | 0.146 | 1.700 | 0.395 | 1.875 |
| 地平线苹果红色 | 0.008 | 0.065 | 0.070 | 0.896 | 0.077 | 1.650 |
| 迪娃树莓脉纹 | 0.014 | 0.090 | 0.433 | 1.229 | 0.129 | 0.708 |
| PELO3 | 0.009 | 0.288 | 0.129 | 0.467 | 0.105 | 1.038 |
| 地平线杂色 | 0.010 | 0.073 | 0.089 | 1.663 | 0.080 | 1.471 |
| 地平线绯红色 | 0.024 | 0.080 | 0.221 | 0.979 | 0.078 | 0.513 |
| 地平线红色 | 0.011 | 0.333 | 0.093 | 1.021 | 0.015 | 1.150 |
| 迪娃玫粉渐变 | 0.042 | 0.463 | 0.117 | 1.304 | 0.100 | 1.296 |
| 地平线玫瑰 | 0.072 | 0.073 | 0.221 | 1.304 | 0.049 | 1.188 |

综合9种天竺葵对重金属富集系数结果来看“地

平线淡蓝色”、“地平线红色”、“地平线玫瑰”对重金属

Cd的富集能力相对较强。因此，可以考虑作为重金 属污染地区的修复植物。

1. Cd污染土壤中天竺葵地上部品种间氮磷钾吸 收差异性研究

在污染土壤上和添加活化剂后，不同品种天竺葵 地上部中氮、磷、钾的含量也存在着一定差异(表3) ， 在污染土壤上，“地平线绯红色”N、P、K含量相较于 CK处理分别提升了 62.01%、235.85%和16.58%。而 地平线淡蓝色”、“地平线杂色”、“迪娃玫粉渐变”和 “地平线玫瑰”4个品种对N的吸收量相较于CK,分别 下降0.007%、29.72%、0.08%和27.23%，添加活化剂后， “地平线绯红色”N、P、K含量相较于CK处理分别提 升了 91.82%,96.52%和10.66%,随着Cd浓度逐渐增 高，“地平线淡蓝色”、“地平线杂色”和“地平线玫瑰”3 个品种对N的吸收出现上升趋势。

表3 不同品种天竺葵内的N、P、K含量的影响

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | Table 3 | Effects of N, P, K contents in different geranium varieties | | | | | (g/kg) | |
| 品种 |  | 清洁土壤 |  |  | 污染土壤 |  |  | 污染土壤+EDTA | |
| N | P | K | N | P | K | N | P | K |
| 地平线淡紫色 | 14.60±2.56ab | 1.80±0.21b | 16.49±0.78de | 14.50±1.62abc | 1.69±0.72bc | 13.34±1.51de | 20.38±3.76a | 1.45±0.22bc | 14.82±0.61e |
| 地平线苹果红色 | 12.30±0.34ab | 1.75±0.18b | 17.33±0.59bcd | 14.03±2.40abc | 2.25±0.6b | 13.10±0.29e | 15.02±0.06a | 1.31±0.46c | 13.74±0.85e |
| 迪娃树莓脉纹 | 12.93±4.67ab | 1.62±0.2ab | 17.51±0.50bcd | 15.31±2.11ab | 1.62±0.03bc | 18.49±1.18b | 21.45±6.43a | 1.81±0.11abc | 16.88±0.42cde |
| PELO3 | 13.89±1.58ab | 2.00±0.05b | 19.09±1.13a | 16.01±1.04ab | 1.29±0.04c | 15.47±0.23cd | 20.72±0.03a | 2.20±0.24abc | 15.55±0.31de |
| 地平线杂色 | 15.34±1.22ab | 1.52±0.28ab | 19.25±0.27a | 10.78±0.57c | 1.24±0.23c | 16.80±0.01bc | 17.36±5.06a | 2.05±0.27abc | 20.66±2.70ab |
| 地平线绯红色 | 11.13±1.34b | 1.59±0.26ab | 18.58±0.24ab | 18.03±0.38a | 5.34±0.19a | 21.66±1.29a | 21.35±0.97a | 2.70±0.67ab | 20.56±0.12ab |
| 地平线红色 | 12.31±0.55ab | 1.15±0.11c | 16.90±0.40cde | 12.35±1.49bc | 2.15±0.07bc | 15.08±0.52cde | 16.04±0.11a | 1.79±0.04abc | 19.51±0.09abc |
| 迪娃玫粉渐变 | 17.08±3.61a | 1.95±0.45b | 15.67±0.49e | 15.64±0.17ab | 1.85±0.11bc | 17.05±0.59bc | 14.11±0.05a | 1.80±0.27abc | 18.44±0.63bcd |
| 地平线玫瑰 | 17.22±0.56a | 2.83±0.05a | 18.22±0.09abc | 12.53±3.34bc | 1.84±0.47bc | 15.35±1.20cd | 21.38±0.31a | 3.05±1.20a | 22.46±2.85a |

注:表中数值均为(平均值士标准误差)。表中同列中不同字母表示同一处理间不同品种的差异显著(*P*＜0.05)

1. 讨论
   1. 不同品种天竺葵的Cd耐性分析

重金属胁迫会对植物根系造成损伤从而影响地 上部生长［11］。植物对逆境的响应情况可以由生物量 看出，通常植物对重金属的吸收超过临界浓度就会影 响植物正常生长［12，13］。本研究发现，与对照植株相比， 除“迪娃玫粉渐变”生物量增加外，其余品种生长均受 到抑制,添加活化剂后,抑制作用在污染土壤+EDTA 中随着浓度的增加而增强，生物量也随之降低，说明 “迪娃玫粉渐变”对Cd有一定的耐性机制和适应能 力，甚至该浓度Cd对其生长起到一定的刺激作用,这 为今后的耐Cd植物筛选提供良好的资源。此外，地 上生长与根系生长并非完全协同一致，多数品种表现 出明显的地上部受抑程度大于地下部的现象，陈杰 等「14研究发现,天竺葵在100 mg/kg Cd2+胁迫下生长缓 慢、干重降低，对Cd2+的耐性较强但积累能力较弱***•，贾*** 玉华等［15］研究发现，在1 500 mg/kg Pb2+和50 mg/kg Cd2+复合条件下,天竺葵的株高、地上及地下干重都呈 下降趋势且Cd含量都呈现为根系大于茎叶，与本文 结果相似，9个品种天竺葵均表现出地上部重金属含 量小于根部，表明根系对Cd富集能力高于地上部，与 先前大多数研究结果一致［16，17］，这可能是因为根系作 为接触土壤Cd污染的直接器官,储存在根系中的Cd 通过根细胞中的谷胱甘肽或含硫化合物作用形成螯 合物,从而降低Cd对根的毒害。

富集系数是衡量植物对重金属积累能力的一种 重要参考标准［18］, Baker和Broks等［19抑认为超富集植 物至少应满足地上部重金属含量达到标准且富集系 数＞1等条件。本文研究结果表明，只有部分品种天竺 葵根部对Cd的富集系数＞1,这可能是由于根系分泌 的有机酸与土壤中的金属离子发生络合作用，从而阻 止根部吸收的Cd向地上部运输。贾玉华［21］研究发现， 天竺葵吸取量虽然达不到超富集植物的标准，但对 Cd 具有一定的吸收和积累，本文结果与其一致。综 上所述，虽然 9 个品种并未达到 Cd 超富集植物的标 准，但将高生物量、高富集能力的“地平线玫瑰”、“迪 娃玫粉渐变”和“地平线杂色”用于土壤 Cd 污染土壤 修复是可行的。

* 1. Cd污染土壤中天竺葵幼苗养分含量分析 植物在大量积累重金属时，高含量的重金属可能 会影响其他元素的吸收和运输机制，进而干扰植物的 正常代谢［22］， Cd 在叶片内积累过多，易与叶绿体蛋白 质上的巯基(—SH—)键结合，或取代Ca、Mg、Zn和 Fe 等元素，使得叶绿体结构发生破坏，干扰植物对营 养元素吸收和转移，从而降低叶绿素的生物合成能 力，本研究中，在污染土上，“地平线淡蓝色”、“地平线 杂色”、“迪娃玫粉渐变”和“地平线玫瑰”4 个品种对氮 (N)的吸收量相较于CK降低,这表明一定浓度Cd胁 迫能降低 C 和 N 代谢相关酶活性［23］，限制对 C 和 N 吸 收和利用。但添加活化剂后，“地平线淡蓝色”、“地平 线杂色”和“地平线玫瑰”3 个品种地上部 N 含量出现 上升趋势，这可能是由于天竺葵大量累积的 Cd 导致 质膜透性改变，将吸收的 N 首先利用在叶片生产以维 持最大固 C 率，通过产生大量的代谢产物同重金属缔 合来达到解除毒害作用的目的［24］。P在ATP反应、糖 类代谢、蛋白质代谢以及脂类代谢中起重要作用，本 研究中，与对照相比， Cd 污染土壤能促进也能抑制天 竺葵对 P 的吸收，这一现象是否与天竺葵的耐性机制 有关，还有待于进一步的研究。K作为一种重要的抗 逆元素对植物细胞渗透压和膨压的调节具有重要作 用。本研究中，在污染土上，“迪娃树莓脉纹”、“地平 线绯红色”和“迪娃玫粉渐变”个品种K含量都有所 上升，可能是因为其体内存在某种交互作用，缓解其 对天竺葵造成的伤害，添加活化剂后，品种“迪娃树莓 脉纹” K含量出现下降趋势，这种重金属浓度升高的 情况下植株钾的卜流现象，可能由于过量的 Cd 离子 与细胞内的含 N 或 S 的基团或蛋白质亲和形成二硫 键(—S—S—)［25］,导致膜离子通道结构的破坏。

1. 结论
2. 从生物量来看，除“迪娃玫粉渐变”表现出毒 性刺激效应，其余品种均受到明显的毒害作用，在 Cd 污染土壤上，对“迪娃树莓脉纹”的抑制最明显，添加 活化剂(EDTA)后,对“地平线苹果红色”生长抑制最 明显，但植株依然能保持生长。
3. 天竺葵体内的重金属主要积累于根部，茎叶 部分含量相对较低，在Cd污染土上，“迪娃树莓脉纹” 地上部Cd含量最高,达到1.04 mg/kg, “地平线淡蓝 色"植株根部Cd含量达到最高，为4.08mg/kg。从富 集系数和累积量来看，“地平线淡蓝色”、“迪娃玫粉渐 变”、“地平线杂色”和“地平线玫瑰”均表现出较好的 耐性和吸收能力。
4. 不同品种天竺葵植株内氮、磷、钾含量存在显 著差异,Cd污染土壤在一定程度上刺激了“地平线杂 色”和“地平线玫瑰”对营养元素的吸收，且根系耐性 较好、积累量较大，能很好地将土壤中重金属固定在 植物根系当中，具有一定的修复潜力和应用价值。

[参考文献]

1. 全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业，2014(5): 10-11.

National soil pollution survey bulletin[J]. China Environ­mental Protection Industry, 2014(5):10-11.

1. 陈颖,刘柿良,杨容孑 . 镉胁迫对龙葵生长、质膜 ATP 酶活 性及氮磷钾吸收的影响[J].应用与环境生物学报,2015,21 (1):121-128.

Chen Ying, Liu Shiliang, Yang Rongjie, et al. Effects of cad­mium stress on growth, plasma membrane ATPase activity and nitrogen, phosphorus and potassium uptake of *Solanum nigrum*[J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 2015,21(1):121-128.

1. 杨启良,武振中,陈金陵,等. 植物修复重金属污染土壤的研 究现状及其水肥调控技术展望[J].生态环境学报,2015,24 (6):1075-1084.

Yang Qiliang, Wu Zhenzhong, Chen Jinling, et al. Current status of phytoremediation of heavy metal - contaminated soil and prospects for its water and fertilizer control technol- ogy[J]. Journal of Ecology and Environment, 2015, 24(6): 1075-1084.

1. Vassil A D, Kapulnik Y, Raskin I, et a1. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard[J]. Plant Physiology, 1998,117(2):447-453.
2. Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, et a1. Enhanced accu­mulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents[J]. Environment Science and Technology, 1997, 31 (31):860-865.
3. Bursztyn Fuentes A L, Jose C, de los Rios A, et al. Phytoex­traction of heavy metals from a multiply contaminated dredged sediment by chicory (*Cichorium intybus* L.) and castor bean (*Ricinus communis* L.) enhanced with EDTA, NTA, and citric acid application[J]. International Journal of Phytoremediation, 2018,20(13):1354-1361.
4. Majid Mahdieh, Mojtaba Yazdani, Shahla Mahdieh. The high potential of *Pelargonium roseum* plant for phytoreme­diation of heavy metals[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013,185(9):7877-7881.
5. 牟祚民,姜贝贝,潘远智,等 . 重金属胁迫对天竺葵生长及生

理特性的影响[J].草业科学,2019,36(2):434-441.

Mou Zuomin, Jiang Beibei, Pan Yuanzhi, et al. Effects of heavy metal stress on growth and physiological characteris­tics of *Geranium*[J]. Grassland Science, 2019,36(2):434-441.

1. 李希铭,李金波,宋桂龙,等. 35 份草本植物镉吸收与富集特 征比较[J].草业科学,2018,35(4):760-770.

Li Ximing, Li Jinbo, Song Guilong, et al. Comparison of cadmium uptake and enrichment characteristics of 35 herba­ceous plants[J]. Grassland Science, 2018,35(4):760-770.

1. 冯莲莲,郭京霞,黄梓璨,等. 水稻土中 7 个水稻品种对土壤 Cd、Pb的富集与转运:田间研究[J].生态环境学报,2017,26 (12):2146-2153.

Feng Lianlian, Guo Jingxia, Huang Zican, et al. Seven rice varieties in paddy soil enrich and transport Cd and Pb in soil：field studies[J]. Journal of Ecological Environment, 2017,26(12):2146-2153.

1. 陈诚.AtMGT1基因对植物镉吸收和忍耐的影响[D].重 庆：西南大学, 2014.

Chen Cheng. Effects of AtMGT1 Gene on Cadmium Uptake and Tolerance in Plants[D]. Chongqing：Southwest Universi­ty, 2014.

1. 刘家女.镉超积累花卉植物的识别及其化学强化[D].沈 阳：东北大学, 2008.

Liu Jiannyv. Identification and Chemical Enhancement of Flowers and Plants with Cadmium Hyperaccumulation[D]. Shenyang：Northeast University, 2008.

1. 杨洋,黎红亮,陈志鹏,等. 郴州尾矿区不同油菜品种对重金 属吸收积累特性的比较[J].农业资源与环境学报,2015,32 (4):370-376.

Yang Yang, Li Hongliang, Chen Zhipeng, et al. Comparison of absorption and accumulation characteristics of heavy met­als by different rapeseed varieties in Chenzhou tailings area [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015,32(4):370-376.

1. 陈杰. 几种积累镉花卉筛选及其修复污染土壤潜力研究 [D]. 西安：西安科技大学, 2011.

Chen Jie. Screening of Several Cadmium - accumulating Flowers and Their Potential for Remediation of Contaminat­ed Soil[D]. Xi'an：Xi'an University of Science and Technol­ogy, 2011.

1. 贾玉华,朱建雯,钱翌,等. 铅-镉复合污染对天竺葵生长的 影响[J].安徽农业科学,2008(7):2649-2650,2767.

Jia Yuhua, Zhu Jianwen, Qian Yi, et al. Effects of lead-cad- mium compound pollution on the growth of Geranium[J]. Anhui Agricultural Science, 2008(7):2649-2650,2767.

1. 袁敏,铁柏清,唐美珍,等 . 四种草本植物对铅锌尾矿土壤 重金属的抗性与吸收特性研究[J].草业学报,2005(6):57- 62.

Yuan Min, Tie Boqing, Tang Meizhen, et al. Resistance and absorption characteristics of four herbaceous plants to heavy metals in lead -zinc tailings soil[J]. Journal of Grass Indus­try, 2005(6):57-62.

1. 魏树和,周启星,王新,等. 杂草中具重金属超积累特征植物 的筛选[J].自然科学进展,2003(12):29-35.

Wei Shuhe, Zhou Qixing, Wang Xin, et al. Screening of plants with characteristics of heavy metal hyperaccumula­tion in weeds[J]. Progress in Natural Science, 2003(12): 29­35.

1. 严明理,刘丽莉,王海华,等. 3 种植物对红壤中镉的富集特 性研究[J].农业环境科学学报,2009,28(1):72-77.

Yan Mingli, Liu Lili, Wang Haihua, et al. Study on the en­richment characteristics of cadmium in red soil by three plants[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2009,28(1):72-77.

1. Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, et al. The possi­bility of *in situ* heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J]. Resourc­es, Conservation and Recycling, 1994a,11:41-49.
2. Broks R R, Shaw S, marfil A A. The chemical form and physiological function of nickel in some Iberian Alyssum species[J]. Plant Physiology,1981,51:167-170.
3. 贾玉华.三种植物对重金属Cd和Pb抗性及修复潜力的研 究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2008.

Jia Yuhua. Resistance of Three Plants to Heavy Metals Cd and Pb and Their Potential for Remediation[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2008.

1. 孙宁骁,宋桂龙. 紫花苜蓿对镉胁迫的生理响应及积累特 性[J].草业科学，2015,32(4):581-585.

Sun Ningxiao, Song Guilong. Physiological response and ac­cumulation characteristics of alfalfa to cadmium stress[J]. Grassland Science, 2015,32(4):581-585.

1. Jin X, Wenying W, Hengxia Yin, et a1. Exogenous nitric ox­ide improves antioxidative capacity and reduces auxin degra­dation in roots of *Medicago truncatula* seedlings under cad­mium stress[J]. Plant and Soil, 2010,326(1/2):321-330.
2. 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): 154­161.

Liu Shiliang, Shi Xinsheng, Pan Yuanzhi, et al. Effects of cadmium stress on growth, biomass and nutrient accumula­tion and distribution of Changchun peanut[J]. Journal of Grassland, 2013,22(3):154-161.

1. 刘俊祥,孙振元,巨关升,等. 结缕草对重金属镉的生理响应 [J]. 生态学报, 2011,31(20):6149-6156.

Liu Junxiang, Sun Zhenyuan, Ju Guansheng, et al. Physio­logical response of *Zoysia japonica* to heavy metal cadmium [J]. Journal of Ecology, 2011,31(20):6149-6156.