

籽粒苋对土壤中镉的耐性和积累特征*

李凝玉^{1,2} 卢焕萍^{1,2} 李志安^{1**} 庄萍¹ 丘静^{1,2}

(¹中国科学院华南植物园 广州 510650)

(²中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 籽粒苋是一种生物量大、易栽培的镉(Cd)富集植物,具有作为Cd污染土壤修复植物的潜力.比较了两个基因型籽粒苋(K112和R104)的耐Cd性特征,土壤Cd污染浓度范围是0~50 mg kg⁻¹,生长60 d收获.结果表明,籽粒苋K112(*Amaranthus hypochondriacus* L. Cv. 'K112')与R104(*A. hypochondriacus* L. Cv. 'R104')生物量随土壤中Cd浓度的增加而逐步下降,在土壤中Cd浓度<16 mg kg⁻¹时,其生物量积累没有受到明显的影响.在本试验最高Cd浓度条件(50 mg kg⁻¹)下仍可生长,但生物量显著下降.两种籽粒苋叶中Cd含量随土壤中Cd浓度增加而快速上升,在土壤Cd浓度为16 mg kg⁻¹时,叶内Cd浓度分别达120.63和109.96 mg kg⁻¹ (DW),达到超富集植物的临界标准. Cd在植物体内的分布特征为叶>根>茎.籽粒苋两个品种相比, K112吸收Cd的能力大于R104,尤其是在高Cd浓度时,两种籽粒苋对Cd的绝对提取量相似,并随土壤Cd浓度的上升而快速增加.籽粒苋K112和R104对土壤中的Cd具有很强的耐性和积累的能力,可作为Cd污染土壤的修复植物.图4 表1参22

关键词 籽粒苋; 镉; 植物修复; 耐性; 重金属; 超富集植物

CLC X53 : X173

Tolerance and Accumulation of Cadmium in Soil by *Amaranthus hypochondriacus* L.*

LI Ningyu^{1,2}, LU Huanping^{1,2}, LI Zhi'an^{1**}, ZHUANG Ping¹ & QIU Jing^{1,2}

(¹South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract *Amaranthus hypochondriacus* L. is an easily cultivated and high-biomass plant which could uptake and accumulate high level of cadmium (Cd) from polluted soil. Two hybrid clones (*A. hypochondriacus* L. Cv. 'K112' and *A. hypochondriacus* L. Cv. 'R104') were tested for their capability of Cd tolerance and accumulation in a 60 days greenhouse pot experiment. The Cd concentration in the tested soil ranged from 0 to 50 mg kg⁻¹. The results indicated that the biomass of the two clones declined with the increasing of Cd concentration in soil. The soil with Cd concentration lower than 16 mg kg⁻¹ did not restrain the growth of the two tested plants. At the highest Cd concentration (50 mg kg⁻¹) in soil, the both clones were still alive, but produced very low biomass. The Cd concentration in leaves markedly increased at the Cd concentration in soil from 0 to 50 mg kg⁻¹. When growing in the soil with 16 mg kg⁻¹ Cd, the Cd concentrations in the leaves of the two plants were up to 120.63 mg kg⁻¹ and 109.96 mg kg⁻¹, respectively, which were larger than the threshold as Cd hyperaccumulator (100 mg kg⁻¹). The Cd concentrations in different parts of the plants with in the order of leaf > root > stem. The Cd concentration in the leaves of K112 was higher than that of R104, especially growing in the soil with high Cd concentration. The total quantities of Cd uptake by K112 and R104 were similar, but sharply increased with the increasing of Cd concentration in soil. K112 and R104 are two promising plants for phytoremediation because of their high Cd accumulation capacity and high biomass yield. Fig 4, Tab 1, Ref 22

Keywords *Amaranthus hypochondriacus* L.; cadmium; phytoremediation; tolerance; heavy metal; hyperaccumulator

CLC X53 : X173

植物修复技术是目前经济有效的重金属污染土壤修复方法之一,即将具有一定重金属富集能力的植物种植于污染土地上,生长一定时间后将植物地上部或整株收获并集中填

埋或焚烧,通过多次种植富集植物后使土壤重金属含量降低到可接受的水平^[1-2].这一技术的应用前提在于植物组织积累高浓度某元素以及植物的高生物量,从而实现可观的重金属去除量.因此,重金属富集植物是植物修复的基础,国内外均在努力寻找富集植物并已取得相当的研究进展,如已报道的Cd超富集植物有宝山堇菜(*Viola baoshangensis* L.)^[3],印度芥菜(*Brassica juncea* L.)^[4-5]、龙葵(*Solanum nigrum* L.)^[6]等.然而,目前发现的绝大多数超富集植物生物量小或地域性强,不适宜大面积污染土壤的修复,继续寻找生物量大、生长迅速、富集重金属能力强的植物是植物修复技术走向实际应用的关键.已有的研究表明,一些高生物量农作物通常

收稿日期: 2009-01-03 接受日期: 2009-05-05

*国家自然科学基金项目(Nos. 30630015, 30670393)、广东省科技计划(No. 2006A36703004)、广东省自然科学基金(No. 5006760)和中国科学院知识创新工程方向性项目(No. KSCX2-SW-133)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 30630015, 30670393), the S & T Project of Guangdong Province, China (No. 2006A36703004), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 5006760), and the Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (No. KSCX2-SW-133)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: lizan@scbg.ac.cn)

富集水平一般,但生物量大,使得实际富集总量大,如玉米、向日葵、烟草等^[7-8]具有生长快、生物量大、易栽培、农耕习性清楚等优点,具有作为修复植物的潜力,与野外发现的一些超富集植物相比,在应用推广上具有明显的优势^[9]。如苏德纯等在十字花科中筛选出具有Cd超积累特性的油菜品种,发现印度芥菜(*B. juncea*)所在的十字花科芸苔属植物中有很多种或基因型具有较强的吸收Cd的特性^[10]。

我们在研究中发现一种苋科植物——籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* L.)具有很强的Cd富集能力,在土壤Cd浓度为3 mg kg⁻¹时,地上部分Cd含量高达50.96 mg kg⁻¹^[11]。籽粒苋是苋科植物中生物量大、生长迅速、易栽培和收割的牧草品种,因而具有作为Cd污染土壤修复植物的潜力。早在1995年,周启星等在沈阳张土污灌区生物样品调查中发现野生苋为富Cd植物^[11]。范洪黎等研究显示,苋科植物中很多品种具有Cd富集特征,如苋属植物天星米(*Amaranthus mangostanus* L.)在土壤Cd浓度为2.5 mg kg⁻¹条件下,其地上部Cd含量达到234 mg kg⁻¹^[12]。Chunilal等也发现食用红叶苋菜(*Amaranthus dubius* L.)和绿叶苋菜(*Amaranthus hybridus* L.)对Cd有极强的富集能力^[13]。因此,本研究探讨了籽粒苋两个品种(K112和R104)的耐Cd性及富集能力,评估其在不同污染水平土壤上的可能应用范围,以期为籽粒苋应用于修复Cd污染土壤提供直接的依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自中国科学院华南植物园实验田,为珠江三角洲典型沉积土,室内风干、磨碎、混匀,过2 mm筛。土壤的基本理化性质为:pH 7.2,有机质15.4 g kg⁻¹,硝态氮2.57 mg kg⁻¹,氨态氮19.4 mg kg⁻¹,有效磷0.13 mg kg⁻¹,总钾(K) 4.01 g kg⁻¹,总钙(Ca) 0.70 g kg⁻¹,总镁(Mg) 0.61 g kg⁻¹,总镉(Cd) 0.005 mg kg⁻¹,交换态K 64.2 mg kg⁻¹,交换态Ca 45.2 mg kg⁻¹,交换态Mg 9.7 mg kg⁻¹,交换态Cd 低于检出限。

供试作物:籽粒苋K112(*A. hypochondriacus* L. Cv. 'K112')和R104(*A. hypochondriacus* L. Cv. 'R104'),种子由辽宁省朝阳市畜牧研究所提供。

1.2 实验方法

采用温室盆栽实验,塑料盆中装干土1 kg,盆底垫20目尼龙网。土壤设8个Cd处理浓度,分别为0、1、2、4、8、16、32、50 mg kg⁻¹,以3CdSO₄·8H₂O水溶液的形式污染土壤,保持土壤湿润,平衡2 mo后种植作物。每种处理3个重复,共48盆。每盆播种约20粒,出苗1 wk后每盆保留大小均一的苗6株。每天观察,根据植物生长情况浇水。自出苗生长60 d后收获植物,整个生长过程不作施肥处理。

1.3 测定方法

收获时将籽粒苋分为根、茎、叶3个部分,自来水冲洗后再用去离子水冲洗干净,晾干水分后称其鲜重,并测定其根长。植物样品在70℃下烘干至恒重,分别测定干重。烘干的样品用粉碎机全部粉碎、混匀并装袋备用。

准确称取植物样品约0.5 g于三角瓶中, HNO₃-HClO₄ (5:1)湿法消解,采用火焰原子吸收分光光度法(AAS, GBC 3000)测定Cd含量。用国家物资标准中心提供的杨树叶进行质量控制,分析误差均控制在允许的误差范围,同时做空白对照。用Microsoft Excel 2003和SPSS 13.0软件对数据进行方差分析,并用LSD法进行多重比较,显著性水平取P=0.05。

2 结果

2.1 不同土壤Cd处理浓度对籽粒苋生长的影响

籽粒苋K112和R104地上部生物量和根长均随土壤中Cd浓度增加而递减(图1)。土壤Cd浓度为1 mg kg⁻¹、2 mg kg⁻¹和4 mg kg⁻¹时,籽粒苋K112地上部生物量(DW)均未显著下降(P>0.05);但在Cd污染水平高于8 mg kg⁻¹以后,地上部生物量比对照明显降低(P<0.05);土壤Cd为50 mg kg⁻¹时,地上部生物量最小,只有1.52 g/盆,与对照相比下降了61.4%。籽粒苋R104地上部生物量也随Cd处理浓度升高而下降,在土壤Cd为16 mg kg⁻¹时显著降低,Cd为50 mg kg⁻¹时地上部生物量最小,为1.40 g/盆,与对照相比下降了57.3%。两种籽粒苋的根长同样随土壤中Cd浓度的增加而递减,在土壤Cd浓度超过8 mg kg⁻¹时根长显著小于对照(P<0.05),最小值同样在土壤Cd浓度为50 mg kg⁻¹时,分别为6.17 cm和5.67 cm,与对照相比分别下降了52.2%和50.7%。在整个生长过程中,两种籽粒苋均未出现叶片失绿现象,即使在Cd为50 mg kg⁻¹时籽粒苋

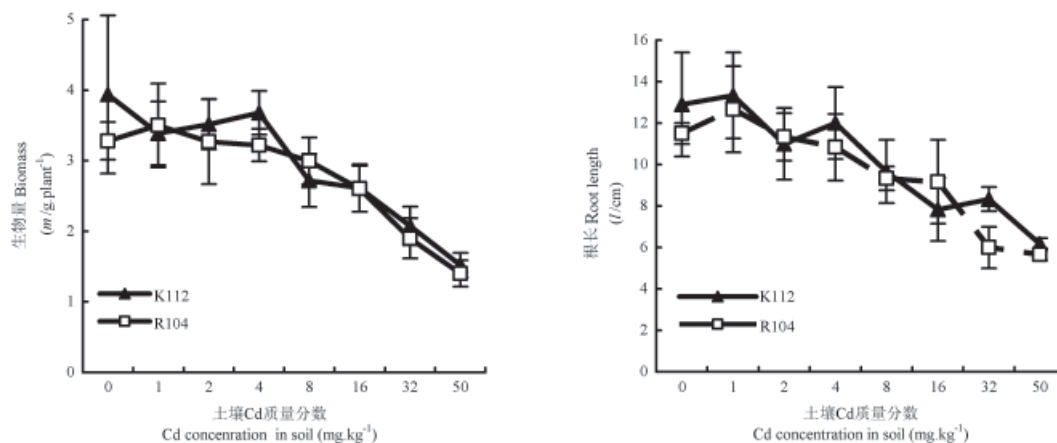


图1 籽粒苋生物量与根长随土壤Cd浓度的变化
Fig. 1 Dry biomass and root length of K112 and R104 growing in the Cd contaminated soil

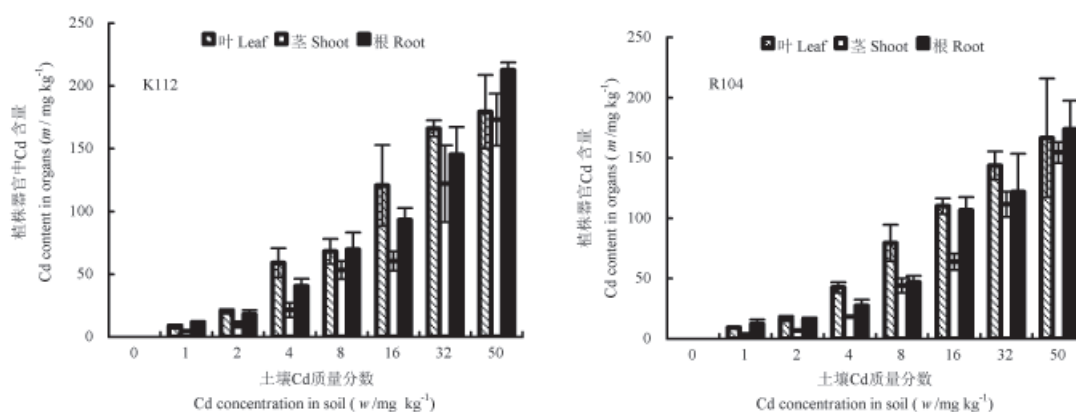


图2 籽粒苋不同器官中Cd含量随土壤Cd浓度的变化

Fig. 2 Cd contents in different organs of K112 and R104 growing in the Cd contaminated soil

依然能缓慢生长。

2.2 不同浓度Cd对籽粒苋各器官中Cd含量的影响

植物各器官中Cd含量变化见图2。两种籽粒苋各器官中Cd的分布趋势为叶>根>茎,只有在最大Cd处理浓度时,根Cd含量高于叶Cd含量。植物体内Cd含量与土壤中Cd浓度上升接近线性增加。在Cd浓度为50 mg kg⁻¹时,植物Cd含量达到最大值, K112的叶、茎、根中Cd含量分别为179.41、173.20、212.60 mg kg⁻¹; R104的叶、茎、根中Cd含量分别为166.58、154.49、173.77 mg kg⁻¹。籽粒苋两个品种相比, K112吸收Cd的能力大于R104,尤其是在土壤Cd浓度50 mg kg⁻¹时, K112叶、茎和根中Cd含量分别是R104的1.08、1.12和1.22倍。

2.3 不同土壤Cd水平对籽粒苋提取Cd总量的影响

两种籽粒苋提取Cd总量见图3。土壤含Cd量在0~32 mg kg⁻¹范围内时,籽粒苋K112和R104提取Cd总量随土壤Cd浓度增加而急剧增加,在土壤Cd为50 mg kg⁻¹时,尽管植株体内Cd含量增加,但由于生物量显著下降而导致吸Cd量略有下降。K112和R104提取Cd最大值均在土壤Cd浓度为32 mg kg⁻¹时,分别为292.9 μg/盆和243.4 μg/盆。两种籽粒苋相比较, K112提取的Cd总量略高于R104,在高浓度Cd时, K112提取Cd总量显著高于R104,在土壤Cd浓度32 mg kg⁻¹和50 mg kg⁻¹时分别是R104的1.25和1.22倍。

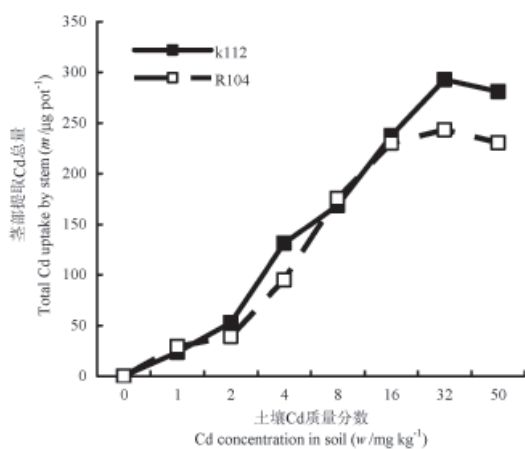


图3 不同Cd浓度水平上籽粒苋地上部提取Cd总量

Fig. 3 Total quantities of Cd uptake by stems of K112 and R104 growing in the Cd contaminated soil

2.4 两种籽粒苋对Cd的积累特性

从表1可以看出,籽粒苋的富集系数与转运系数均随土壤Cd浓度增加而有所变化, K112的富集系数随土壤中Cd浓度的增加先增加后降低,在土壤Cd浓度为4 mg kg⁻¹时达到最大值为8.8,此后逐步下降,当土壤Cd浓度为50 mg kg⁻¹时只有3.6。R104的富集系数变化趋势与K112相似,在土壤Cd浓度为8 mg kg⁻¹时表现最大值为7.6,而最小值3.2出现在土壤Cd浓度为50 mg kg⁻¹时。

两种籽粒苋的转运系数有所不同, K112转运系数范围为0.57~0.98, R104的转运系数通常高于K112,为0.5~1.12,具有随土壤Cd浓度增加而先增加后降低的趋势。K112的最大值出现在土壤Cd浓度为16 mg kg⁻¹时,达0.98;而R104的最大值出现在土壤Cd浓度为8 mg kg⁻¹时,达1.3。

表1 籽粒苋的富集系数和转移系数

Table 1 Bioconcentration factor (BF) and Transfer factor (TF) of Cd in K112 and R104 growing in soil with different Cd concentrations

植物品种 Variety	参数 Parameter	土壤Cd浓度 Cd concentration in soil (w/mg kg ⁻¹)						
		1	2	4	8	16	32	50
K112	富集系数EF	6.4	7.2	8.8	7.6	5.8	4.5	3.6
		R104	6.5	5.5	7.4	7.6	5.5	4
K112	转移系数TF	0.57	0.82	0.89	0.9	0.98	0.98	0.84
		R104	0.5	0.7	1.12	1.3	0.8	1.1

3 讨论

植物修复技术能否取得成功,关键在于富集植物能持续有效提取土壤中的重金属,生长快速,生物量大,对土壤条件有一定耐受性以及易于收割处理和后期处理。籽粒苋是一种生物量很大的牧草植物,主茎粗壮,田间生长可高达2~3 m且主根发达,侧根25~80 cm,主根入土1~3 m^[15]。在本实验中,由于盆栽试验的限制,植株生长受到比较明显的制约,在没有Cd污染的对照中,每盆地上部生物量只有3.5 g,试验中没有施肥处理导致了养分供应的不足,也是生物量低的重要原因,这种生长上的制约可能对植物Cd耐性和积累产生一定影响。从试验结果可以看出,籽粒苋的生长对Cd污染有较高的敏感性,生物量随Cd污染水平的升高而逐步下降,在土壤含Cd 8 mg kg⁻¹时,籽粒苋生长受到了明显的限制,其地上部生物量和根长与对照相比显著降低。这一耐性水平低于大

部分已发现的超富集植物, 如龙葵在供Cd水平达 25 mg kg^{-1} 时地上部生物量未下降^[6], 但这一临界浓度显然高于我国大部分农田Cd污染水平, 对籽粒苋作为Cd污染土壤修复植物并不形成制约. 从我们开展的其它试验看, 籽粒苋在大田条件下, 预期可以耐受更高的Cd污染水平.

籽粒苋显然具有Cd超富集植物的特征, 在土壤Cd水平为 16 mg kg^{-1} 时, 籽粒苋K112和R104叶中Cd含量分别为 $120.63 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $109.96 \text{ mg kg}^{-1}$, 超过了 100 mg kg^{-1} 这一Cd超积累植物临界含量标准^[16], 而且叶内Cd浓度一般超过根内Cd浓度. 籽粒苋富集Cd的能力随品种而有一定变化, K112明显优于R104, 但R104仍具有Cd超富集植物特征, 在土壤Cd达 50 mg kg^{-1} 时仍然能生长, 说明籽粒苋本身具有很强的Cd耐受机制, 可以在高Cd污染的环境中生长.

尽管籽粒苋生物量随土壤中Cd浓度上升而明显下降, 但籽粒苋对Cd的提取总量随土壤中Cd浓度的上升而大幅增加, 显然, 这是由于体内Cd浓度增加幅度大大超过生物量的下降. 因而当土壤中Cd污染水平较高时, 应用籽粒苋提取的Cd绝对量也较高, 这是优良修复植物的一个重要特性. 两个籽粒苋品种提取的Cd总量极为相似, 两条曲线多数情况下是重叠的, 只是在最高浓度时, K112略高于R104. 籽粒苋不同品种富集Cd能力的相似性进一步增加了它作为Cd修复植物的应用潜力.

富集系数 (Bioconcentration factor) 与转运系数 (Transfer factor) 被用于评估富集植物对重金属的富集特征^[17]. 富集系数指植物地上部Cd含量与土壤中Cd浓度的比

值, 转运系数是指植物地上部分与地下部分Cd含量的比值. 富集系数和转运系数越高, 就能越有效地将环境中的重金属提取到容易收割的地上部分. 因此, 富集系数和转运系数的高低将直接影响富集植物能否应用于重金属污染土壤的实地修复. 由本实验可以看出, 在土壤Cd浓度较低时 ($<16 \text{ mg kg}^{-1}$), 籽粒苋对Cd的富集系数通常超过6, 高于已报道的重金属富集植物^[3-6]. 土壤Cd较高浓度时, 籽粒苋富集系数有明显下降, 特别是土壤中Cd浓度超过 32 mg kg^{-1} 时富集系数在4.5以下, 但仍然是一个不小的值. Cd在籽粒苋体内的转移系数一般在0.8以上, 只是在最低Cd浓度时转移系数约0.5, 较高的转移系数有利于修复植物的应用. R104的转移系数略高于K112, 在修复应用上, 品种选择可以把转移系数作为一个因素来考虑.

籽粒苋在Cd胁迫条件下的生长过程中对土壤酸度没有明显影响 (图4), 表明它不是通过影响酸度来改变Cd的有效性, 并由此增加对Cd的吸收. 籽粒苋具有很多品种, K112和R104是富钾基因型^[18], 对K具有较强的富集能力, 这种富集能力可能是通过根系分泌物对土壤K的活化而实现的. 籽粒苋根系分泌物中95%以上的低分子量有机酸为草酸^[19], 草酸对土壤矿物K具有强烈的促进释放作用^[20], 草酸也可能是增进其吸收Cd的一个重要因素^[21], 因此籽粒苋对Cd的富集与其对K的富集机理可能是相似的. 图4显示, 土壤有效Cd与有效K变化趋势非常相似, 特别是土壤Cd超过 16 mg kg^{-1} 时, 两者均大幅上升, 表明籽粒苋通过某种机理提高了环境中K与Cd的有效性, 也大幅提高了自身对K与Cd的吸收 (体内K数

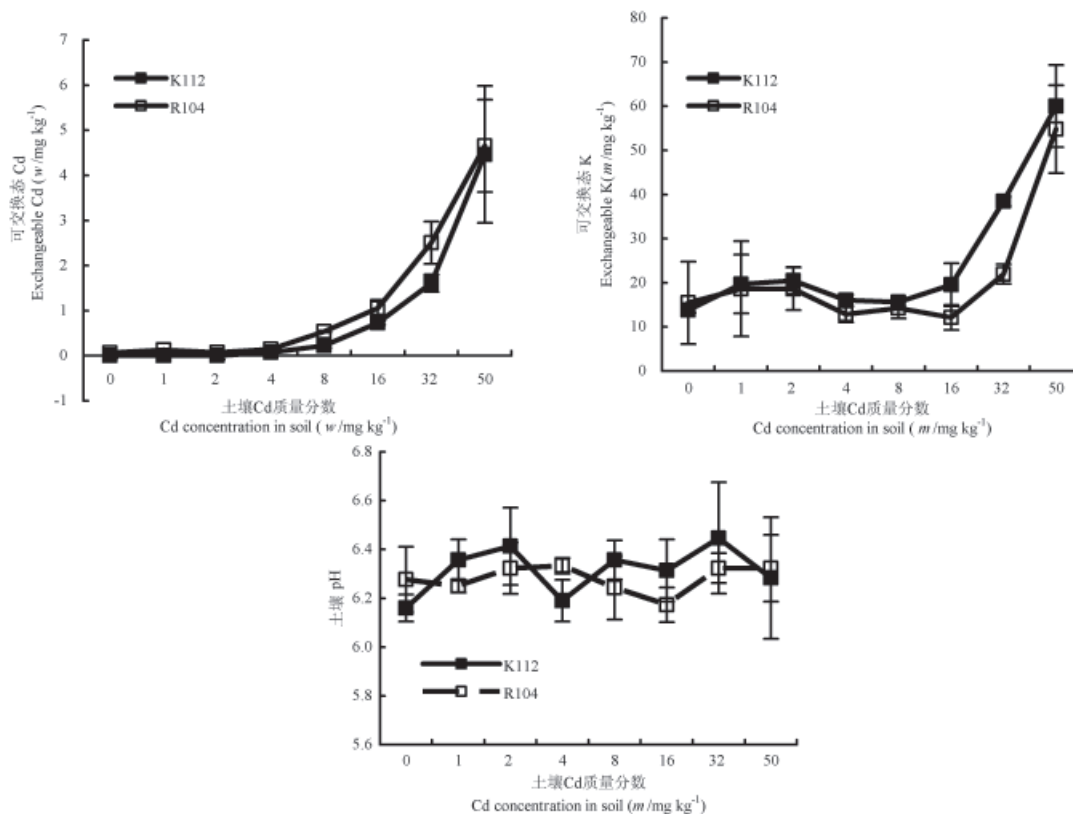


图4 土壤pH、可交换态Cd和可交换态K

Fig. 4 pH, exchangeable Cd and exchangeable K of the soil

据未列出)。范洪黎等的研究证实, Cd诱导了苋菜根系低分子量有机酸的分泌, 而有机酸与Cd形成的金属螯合物大大缓解了土壤游离Cd离子对植物的毒害作用, 增加了植株对Cd的耐性^[12, 22]。

4 结论

籽粒苋K112与R104生物量随土壤中Cd浓度的增加而逐步下降, 但在土壤中Cd浓度 $<16 \text{ mg kg}^{-1}$ 时, 其生物量积累没有受到显著的影响, 表现出对Cd较强的耐性; 两个品种在本试验的最高Cd浓度条件 (50 mg kg^{-1}) 下仍可正常生长, 但生物量显著下降。两种籽粒苋体内Cd含量随土壤中Cd浓度增加而快速上升, 在土壤Cd浓度为 16 mg kg^{-1} 时, 体内积累Cd浓度超过 100 mg kg^{-1} , 达到超富集植物的临界标准。两种籽粒苋对Cd的绝对提取量相似, 并随土壤Cd浓度的上升而快速增加。籽粒苋Cd富集系数一般大于6, 但在土壤中Cd浓度超过 32 mg kg^{-1} 时, 富集系数在4.5以下; 而Cd转移系数一般大于0.8。因此, 籽粒苋是一种优良的Cd污染土壤修复植物, 具有很好的应用前景。

References

- Chaney RL, Brown SL, Li YM, Angle JS, Homer FA, Green CE. Potential use of metal hyperaccumulators. *Min Environ Manage*, 1995, **3** (3): 9~11
- Kumar NPBA, Dushenkov V, Motto H, Raskin I. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ Sci Technol*, 1995, **29**: 1232~1238
- Liu W (刘威), Su WS (束文圣), Lan CY (蓝崇钰). *Viola baoshanensis*, a plant that hyperaccumulates cadmium. *Chin Sci Bull* (科学通报), 2004, **49** (1): 29~32
- Clemente R, Walker DJ, Bernal MP. Uptake of heavy metals and As by *Brassica juncea* grown in a contaminated soil in Aznalcóllar (Spain): The effect of soil amendments. *Environ Poll*, 2005, **138** (1): 46~58
- Wu LH, Luo YM, Xing XR, Christie P. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk. *Agric Ecosyst Environ*, 2004, **102** (3): 307~318
- Wei SH, Zhou QX, Wang X, Zhang KS, Guo GL, MA LQ. A newly-discovered Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Chin Sci Bull*, 2005, **50** (1): 33~38
- Wang M, Zou J, Duan X, Jiang WS, Liu DH. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). *Biores Tech*, 2007, **98**: 82~88
- Kumar NPBA, Dushenkov V, Motto H, Raskin I. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ Sci Technol*, 1995, **29**: 1232~1238
- Ebbs SD, Lasat MM, Brady DJ, Cornish J, Gordon R, Kochian LV. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *J Environ Qual*, 1997, **26**: 1424~1430
- Su DC (苏德纯), Huang HZ (黄焕忠). The phytoremediation potential of oilseed rape (*B. juncea*) as a hyperaccumulator for cadmium contaminated soil. *Chin Environ Sci* (中国环境科学), 2002, **22** (1): 48~51
- Zhou QX (周启星), Gao ZM (高拯民). Compartmental model of cadmium cycle and pollution control countermeasures in the Zhangshi sewage irrigation area of Shenyang. *Acta Sci Circumst* (环境科学学报), 1995, **15** (3): 273~280
- Fan HL (范洪黎), Wang X (王旭), Zhou W (周卫). Low molecular weight organic acids in rhizosphere and their effects on cadmium accumulation in two cultivars of Amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.). *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2007, **40** (12): 2727~2733
- Chunilall V, Kindness A, Jonnalagadda SB. Heavy metal uptake by two edible amaranthus herbs grown on soil contaminated with lead, mercury, cadmium and nickel. *J Environ Sci Health*, 2005, **40** (2): 375~384
- Li NY (李凝玉), Li ZA (李志安), Ding YZ (丁永贞), Zou B (邹碧), Zhuang P (庄萍). Effect of intercropping different crops with maize on the Cd uptake by maize. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2008, **19** (6): 1369~1373
- Qin JH (秦嘉海). Effect of salt tolerant herbage on meadow soil in hexi corridor. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 2005, **36** (5): 806~808
- Baker AJM, Brooks RR. Terrestrial higher plants which hypemcumulate elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry biorecovery. *Biorecovery*, 1989, **1**: 81~126
- Ghosh M, Singh SP. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species. *Enviro Poll*, 2005, **133** (2): 365~371
- Li TX (李廷轩), Ma GR (马国瑞), Zhang XZ (张锡洲). Root exudates of potassium-enrichment genotype grain amaranth and their activation on soil mineral potassium. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2006, **17** (3): 368~372
- Tu SX (涂书新), Sun JH (孙锦荷), Guo ZF (郭智芬). The root exudation of grain amaranth and its role in release of mineral potassium. *Acta Agric Nucl Sin* (核农学报), 1999, **13** (5): 305~311
- Zhou M (周明), Tu SX (涂书新), Sun JH (孙锦荷), Guo ZF (郭智芬). Uptake of potassium in soil and mineral by grain amaranth (*Amaranthus* spp.). *Acta Agric Nucl Sin* (核农学报), 2005, **19** (4): 291~296
- Ding YZ (丁永贞), Li ZA (李志安), Zou B (邹碧), Tan WN (谭万能), Gu W (顾伟), Cao YS (曹裕松). Effect of organic acids on cadmium desorption from paddy soil of the Pearl River delta in China. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2007, **13** (3): 289~293
- Fan HL (范洪黎), Wang X (王旭), Zhou W (周卫). Effect of malic acid and citric acid addition on Cd transformations in soil and Cd uptake in amaranth. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2008, **14** (1): 132~138