



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102784797 B

(45) 授权公告日 2014.06.18

(21) 申请号 201210282994.1

CN 101116864 A, 2008.02.06, 全文.

(22) 申请日 2012.08.10

CN 101332466 A, 2008.12.31, 全文.

(73) 专利权人 四川农业大学

地址 611131 四川省成都市温江区公平镇惠民路 211 号

李冰等.《烂泥沟金矿区紫茎泽兰对重金属的富集特性及生态修复分析》.《黄金》.2008,第 29 卷(第 8 期),对比文件 1 第 1 页第 2 栏第 1 段-第 3 页第 2 栏第 2 段,表 2.

(72) 发明人 张世熔 赵小英 周玲 徐小逊
蒲玉琳 贾永霞 李婷 李云
龚国淑

审查员 彭小珍

(74) 专利代理机构 成都九鼎天元知识产权代理有限公司 51214

代理人 吴彦峰

(51) Int. Cl.

B09C 1/00(2006.01)

B09C 1/10(2006.01)

(56) 对比文件

CN 1568668 A, 2005.01.26, 全文.

权利要求书1页 说明书6页

(54) 发明名称

紫茎泽兰在修复矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用

(57) 摘要

本发明为紫茎泽兰在修复矿区重金属锌、铅和铜污染土壤中的应用。该应用为将紫茎泽兰种植于已经有该植物广泛分布的重金属污染矿区土壤中,利用其植株对重金属锌、铅和铜的富集特性吸收累积重金属,并将其大部分转运到植株地上部分;在其种子成熟之前收割植株地上部分,防止其种子随风飘散向矿山外蔓延,并将植物地上部分进行灰化处理,提取重金属,以达到修复矿区土壤重金属锌、铅和铜污染的目的。由于紫茎泽兰生命力旺盛,生物量大,能通过自身机制降低其根际土壤中重金属锌、铅和铜的浓度而保护自身免受重金属伤害且正常生长,因此将紫茎泽兰应用于修复矿区重金属锌、铅和铜污染的土壤成本低、修复潜力大。

1. 紫茎泽兰在修复矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用,其特征在於:将紫茎泽兰种植于重金属锌、铅和铜污染的土壤中,利用其对重金属锌、铅和铜的富集特征吸收累积重金属,在其种子成熟之前收割植株地上部分,并进行灰化处理,提取重金属锌、铅和铜,从而实现对已经有紫茎泽兰广泛分布的矿区重金属锌、铅和铜污染的土壤进行修复,不同锌浓度和不同铅浓度对紫茎泽兰的生长具有低促高抑的作用,其株高、根长、茎生物量和叶生物量均随锌处理浓度增加先升高后降低,不同铜浓度处理下,紫茎泽兰的株高随铜的处理浓度增加而逐渐下降,其根长和根生物量、茎生物量和叶生物量均随铜处理浓度先上升后下降,其中紫茎泽兰对污染土壤中锌的耐受范围为 $0-4000\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且当土壤中锌浓度为 $2500\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时单株植株锌累积量达到最高,其对铅的耐受范围为 $0-1800\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且当铅浓度为 $100\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时单株植株铅累积量达到最高,其对铜的耐受范围为 $0-1800\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且当铜浓度为 $600\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时单株植株铜累积量达到最高。

2. 根据权利要求1所述的紫茎泽兰在修复矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用,其特征在於:所述的紫茎泽兰的种植方法为直接播种或者扦插,即将紫茎泽兰种子直播种或者直接扦插种植于重金属锌、铅和铜污染的土壤中,株距 40cm ,在紫茎泽兰一茬生长周期中,分别在8片叶时期和分蘖期各施肥一次,施用肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾,两次施肥共保证施纯氮 $100\text{kg}/\text{hm}^2$ 、纯磷 $40\text{kg}/\text{hm}^2$ 和纯钾 $40\text{kg}/\text{hm}^2$,且每月灌水两次。

3. 根据权利要求1所述的紫茎泽兰在修复矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用,其特征在於:在一定重金属锌、铅和铜浓度范围内,紫茎泽兰能通过自身机制吸收根际土壤中的重金属并向地上部转移,不同锌处理浓度下,紫茎泽兰地上部的富集系数小于1,而紫茎泽兰在不同铅和铜浓度处理下,其地上部迁移系数和富集系数都小于1,紫茎泽兰通过自身机制吸收重金属,降低了根际土壤锌和铅有效量和全量,这一机制作用随根际环境中锌和铅含量增加而逐渐增强,从而保护自身免受伤害。

4. 根据权利要求1所述的紫茎泽兰在修复矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用,其特征在於:在紫茎泽兰种子成熟之前进行剪枝收割、留茬发芽,防止紫茎泽兰种子随风飘散而向周围非矿区蔓延,并对其收割的地上部分进行灰化处理,提取重金属锌、铅和铜,从而实现对已经有紫茎泽兰广泛分布的矿区重金属锌、铅和铜污染的土壤进行修复。

紫茎泽兰在修复矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用

技术领域

[0001] 本发明涉及矿区环境中重金属污染的修复技术领域,即利用一种菊科植物紫茎泽兰在修复重金属污染的土壤,具体为紫茎泽兰在修复已经有该植物广泛分布的矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用。

背景技术

[0002] 随着经济全球化的迅速发展,环境污染和生态破坏日益严峻,严重影响并威胁到人类的健康和生存,其中重金属元素对环境的污染和破坏尤为严重。而人类对矿产资源的开发和利用正是土壤重金属污染物的主要来源之一。矿山开采过程中洗选废液的排放及尾矿中所含有的重金属,对周围环境、地表水、地下水造成严重的污染。因此,矿业废弃地的恢复已成为我国当前所面临的紧迫任务之一,也是我国实施可持续发展战略应优先关注的问题之一。由于重金属元素是一种潜在的污染物,很难被土壤微生物降解,重金属污染具有隐蔽性、长期性、累积性、不可逆性的特点,导致重金属污染治理困难,因此矿区重金属污染的治理已成为当前环境科学界急需解决的重大课题。

[0003] 目前,重金属污染土壤的修复主要采用物理、化学和生物学修复。植物修复是生物修复中的一种,也是目前国际学术界研究的热点问题,并且开始进入初步商业化阶段。相对于其它修复技术,其成本低、效果好、应用前景广泛、无二次污染,且复垦后会有较多的生态效益和审美价值,能达到对污染土壤永久清洁修复的目的,因而被公认为环境友好型原位绿色修复技术。植物修复主要包括植物提取、植物挥发、植物稳定等方式。其中,植物提取主要是利用自然生长的富集或超富集植物吸收、转运和富集土壤重金属到植物地上部,然后将其收获焚烧回收重金属的过程。该修复技术的效果取决于如何提高植物地上部分生物量及重金属含量,即需要选育生长速度快、生物量大且能富集或超富集一种或多种重金属的植物即具有修复潜力的植物。

[0004] 富集重金属植物对重金属具有一定的选择性,即一般只对一种重金属具有耐性和富集能力,而土壤重金属污染多为几种重金属复合污染,用只对一种重金属富集的植物难以全面清除土壤中的多种污染物。因此,寻找对土壤重金属锌、铅和铜污染具有广谱的重金属耐性和积累特性的植物,是多种重金属污染土壤植物修复技术亟待解决的问题。

[0005] 矿山开采过程中洗选废液的排放及尾矿中所含有的重金属,对周围环境、地表水、地下水造成严重的污染。因此,利用能在废弃的矿山或金属矿露头上自然生长的优势植物对矿业废弃地进行恢复是解决这一环境问题的有效途径之一。而目前可用于锌、铅和铜污染土壤修复的植物品种资源不足,其大多数植物富集部分生长缓慢、植株矮小或地上部生物量小,在实际应用中受到限制,部分植物因受土壤类型、污染类型、气候等环境条件的影响无法生长。另外,入侵植物的防治也成为目前的研究热点,但很少有研究将入侵植物防治与重金属污染土壤的植物修复相结合。因此,利用入侵植物生长迅速、生物量大、抗逆性强、耐旱耐贫瘠的特点,用于修复已经有该植物入侵的矿区重金属污染土壤,以达到以害治害、变害为宝的目的非常有必要。

[0006] 因此,寻找适合于川西气候、矿区重金属污染土壤条件,生长迅速,生物量较大且对锌、铅和铜富集能力强的植物新品种是该区域矿山重金属污染土壤植物修复技术亟待解决的问题。本研究中选取的紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)为菊科多年丛生型半灌木草本植物,由于它抗逆性强、生长迅速,且在许多矿区有广泛分布,是一种对已有其广泛分布的矿区污染土壤的潜在修复植物。目前一些对废弃的矿山或金属矿露头上自然生长的植物进行调查研究发现紫茎泽兰对矿山重金属镉、铬、铅和锌具有一定的抗性和适应能力,是一种富集重金属的潜力植物。但是已有研究没有研究紫茎泽兰在单一及复合重金属锌、铅和铜胁迫下的耐性和富集特征。

发明内容

[0007] 发明人在从事重金属污染修复的研究工作中,继发现秃疮花、野茼蒿、蒲公英、豨莶等重金属富集植物之后,再次发现:菊科泽兰属紫茎泽兰,对已有该植物广泛分布的矿区土壤中的重金属锌、铅和铜具有显著的耐性和富集特性。因此,本发明的目的就是针对上述可用于川西矿区土壤重金属污染生物修复的植物品种资源不足的问题,提供一种新的植物品种紫茎泽兰在修复矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用。

[0008] 为了实现上述发明目的,本发明采用的技术方案如下:

[0009] 本发明中的紫茎泽兰(拉丁名为 *Eupatorium adenophorum*)为菊科多年丛生型半灌木草本植物,现已在我国的云南、贵州、四川等地矿区及非矿区广泛分布。有研究表明紫茎泽兰对重金属镉、铬、铅和锌具有较强的抗性和适应能力,是一种富集重金属的潜力植物。本发明充分利用了紫茎泽兰抗逆性强、易于成活、生长迅速、生物量大,可进行播种或扦插繁殖,在自然条件下即可存活,在其整个生长过程中不需要特殊管理的特点。紫茎泽兰对重金属锌、铅和铜具有耐受能力,再利用其植株对重金属锌、铅和铜的富集特性吸收累积重金属,并将其大部分转运到植株地上部分,在紫茎泽兰种子成熟之前进行剪枝收割、留茬发芽,防止紫茎泽兰种子随风飘散向周围非矿区蔓延,并对其收割的地上部分的生物量进行灰化处理,提取重金属锌、铅和铜,从而实现将重金属从土壤中移除,达到对已经有紫茎泽兰广泛分布的矿区污染土壤进行修复。

[0010] 紫茎泽兰在修复矿区重金属锌铅铜污染土壤中的应用,其种植方法为直接播种或者扦插,即将紫茎泽兰种子直播种或者直接扦插种植于重金属锌、铅和铜污染的土壤中,每株株距 40cm。在紫茎泽兰一茬生长周期中,分别在 8 片叶时期和分蘖期各施肥一次,施用肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾,两次施肥共保证施纯氮 100kg/hm²、纯磷 40 kg/hm² 和纯钾 40kg/hm²,且每月灌水两次,在紫茎泽兰生长过程中只需要施用少量肥料和适当灌水,即可保证其在重金属污染土壤中正常生长。

[0011] 在一定重金属锌、铅和铜浓度范围内,紫茎泽兰能通过自身机制降低其根际土壤中重金属锌、铅和铜的浓度,从而保护自身免受重金属伤害正常生长。紫茎泽兰对污染土壤中锌的耐受范围为 0-4000mg·kg⁻¹,且在土壤锌浓度为 2500 mg·kg⁻¹ 时单株植株锌累积量达到最高;紫茎泽兰对污染土壤中铅的耐受范围为 0-1800 mg·kg⁻¹,且在土壤铅浓度为 100 mg·kg⁻¹ 时单株植株铅累积量达到最高;紫茎泽兰对污染土壤中铜的耐受范围为 0-1800 mg·kg⁻¹,且在土壤铜浓度为 600 mg·kg⁻¹ 时单株植株铜累积量达到最高。

[0012] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0013] 发明人通过试验研究发现,紫茎泽兰对矿区重金属锌、铅和铜具有显著的耐性和富集能力。本发明正是利用紫茎泽兰对矿区土壤中重金属锌、铅和铜的富集特性,将其种植于已有该植物广泛分布的矿区土壤中,可吸收积累土壤中的重金属锌、铅和铜,并将其转移至茎和叶等地上部器官,在其种子成熟之前进行剪枝收割,留茬发芽,并对其收割部分进行灰化处理,提取重金属,以达到修复污染土壤的目的;另外,在较高的重金属锌、铅和铜浓度范围内,紫茎泽兰能够通过自身的某种机制降低其根际土壤中重金属锌、铅和铜的浓度,从而保护自身不受较高浓度重金属伤害,因此紫茎泽兰不仅可以用于修复重金属锌、铅和铜污染程度较轻的矿区土壤,还可以用于修复重金属锌、铅和铜污染较严重的矿区土壤;该发明成本较低、可操作性强、修复潜力大;紫茎泽兰属于菊科多年丛生型半灌木草本植物,个体生物量大,可提高单位面积土壤重金属修复效率;紫茎泽兰每年2-3月开花,种子4-5月成熟,在其种子成熟之前对紫茎泽兰进行留茬收割,可以人工控制其种子随风传播,从而防止紫茎泽兰向周围非矿区蔓延;同时,紫茎泽兰对矿区污染土壤还有绿化覆盖,减少水土流失和重金属污染扩散的功能,为重金属污染土壤的植物修复开发了新的植物资源品种。

具体实施方式

[0014] 下面结合具体实施方式对本发明作进一步的详细描述。

[0015] 但不应将此理解为本发明上述主题的范围仅限于下述实施例。

[0016] 实施例1 矿区土壤修复试验

[0017] 试验地点为四川省雅安市汉源县富泉联合铅锌矿区。具体作法为:将从该矿区采集的菊科泽兰属紫茎泽兰扦插种植于矿区土壤重金属锌、铅和铜平均含量分别为 $267.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1648.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $66.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的尾矿渣土壤上,共种植20行,每行20株,株距40cm,分别在8片叶时期和分蘖期各施肥一次,施用肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾,两次施肥共保证施纯氮 $100 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、纯磷 $40 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和纯钾 $40 \text{ kg}/\text{hm}^2$,且每月灌水两次,90天后留茬收割植株的地上部分(50~70cm),任意抽取10株植物样品进行测定,其余部分进行灰化处理,提取重金属。测定样品地上部重金属锌、铅和铜平均累积量分别为 $5.31 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ 、 $2.16 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ 和 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ 。

[0018] 实施例2 盆栽胁迫试验

[0019] 试验地点设在四川农业大学教学科研农场土壤肥料试验站大棚内。

[0020] 本试验采用盆栽模拟土壤单一重金属污染的方法,春天开始扦插繁殖采自四川省雅安市汉源县富泉联合铅锌矿区的紫茎泽兰。将紫茎泽兰扦插幼苗种植于投加梯度浓度重金属锌、铅和铜污染过的盆栽土壤中,每桶3棵,每个梯度3次重复,于网室内栽培。并分别在8片叶时期和分蘖期各施肥一次,施用肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾,两次施肥共保证施纯氮 $1 \text{ g}/\text{盆}$ 、纯磷 $0.4 \text{ g}/\text{盆}$ 和纯钾 $0.4 \text{ g}/\text{盆}$,并根据土壤水分实际情况不定期浇水,90天后收获植株进行分析测定。

[0021] 试验共设5个处理,分别为CK(不投加重金属)和4个投加不同重金属浓度试验,投加的重金属形态分别为 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,均为分析纯试剂,以固态加入到土壤中,充分混匀,平衡四周后种植紫茎泽兰。投加重金属浓度如下表1:

[0022] 表1. 重金属锌、铅和铜的试验处理浓度。

[0023]

处理水平	锌 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铅 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铜 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	0	0	0
T1	400	100	100
T2	1200	600	600
T3	2500	1200	1200
T4	4000	1800	1800

[0024] 试验结果如下：

[0025] 表 2 为不同锌、铅和铜浓度处理条件下紫茎泽兰地上部生物量。经统计分析表明：

[0026] 表 2. 紫茎泽兰在不同浓度重金属锌、铅和铜胁迫下株高、根长和生物量

金属	处理	株高(cm)	根长(cm)	根生物量 ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)	茎生物量 ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)	叶生物量 ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)
锌	CK	89.78	17.11	5.16	24.27	9.06
	T1	90.44	17.78	5.04	25.65	9.96
	T2	106.11	18.22	4.59	26.79	11.28
	T3	88.56	18.22	3.78	18.51	9.06
	T4	65.89	16.56	1.98	7.32	4.08
铅	CK	55.67	15.75	2.70	9.39	6.33
	T1	59.83	16.17	3.09	12.06	9.03
	T2	55.58	16.17	3.06	9.54	7.17
	T3	49.50	16.25	2.52	6.06	5.52
	T4	37.25	13.44	1.41	4.08	2.91
铜	CK	89.30	12.79	1.17	14.01	6.15
	T1	86.60	15.56	1.41	18.57	7.02
	T2	81.8c	21.95	1.89	23.85	7.26
	T3	75.00	15.93	1.47	10.05	2.79
	T4	59.20	14.43	0.93	5.61	0.75

[0027] [0028] (1) 不同锌浓度处理对紫茎泽兰的生长有低促高抑的作用。其株高、根长、茎生物量和叶生物量均随锌处理浓度增加先升高后降低，且在锌处理浓度为 $1200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大，是对照的 1.18-1.25 倍；在锌处理浓度 $\geq 2500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时明显低于于对照，降低幅度在 3.21-69.86% 之间。由此可见，较低浓度锌处理能促进紫茎泽兰的生长，而高浓度锌处理对紫茎泽兰的生长有一定的抑制作用，且紫茎泽兰在锌处理为 $4000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时仍能正常生长，说明紫茎泽兰对锌胁迫有很强的耐性。

[0029] (2) 不同铅浓度处理对紫茎泽兰的生长也有低促高抑的作用，其株高、根长、根生物量、茎生物量和叶生物量均随铅处理浓度增加先升高后降低，且在铅处理浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大，是对照的 1.02-1.42 倍；而在铅处理浓度 $\geq 1200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时明显低于于对照，降低幅度在 14.67-56.55% 之间。由此可见，紫茎泽兰对铅胁迫有很强的耐性，但当铅浓度高达一定限度时，其生长会受到一定的抑制。

[0030] (3) 不同铜浓度处理下，紫茎泽兰表现出一定的耐性。其株高随铜处理浓度增加逐渐下降，相对对照下降幅度为 16.05-33.68%。其根长和根生物量、茎生物量和叶生物量均随

铜处理浓度增加先上升后下降,根、茎、叶生物量在铜处理为 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最大,是对照的 1.36–2.08 倍。说明铜胁迫对紫茎泽兰的生长有低促高抑的作用,紫茎泽兰对铜胁迫有较强耐性。

[0031] 植物体内锌、铅和铜累积量测定结果见下述表 3:

[0032] 表 3. 不同处理浓度下紫茎泽兰对锌、铅和铜的富集特征

[0033]

元素	处理水平	根累积量	茎累积量	叶累积量	地上部累积量	TF	BCF
		($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)		
锌	CK	0.05	0.34	0.14	0.49	1.58	0.24
	T1	0.39	2.01	1.35	3.36	1.28	0.22
	T2	1.43	8.44	4.74	13.19	1.31	0.28
	T3	3.90	15.83	12.81	28.64	1.05	0.42
	T4	2.97	15.52	8.95	24.47	0.98	0.53
铅	CK	0.05	0.18	0.07	0.25	0.94	1.77
	T1	0.26	0.34	0.22	0.56	0.32	0.34
	T2	0.72	0.46	0.59	1.04	0.27	0.38
	T3	1.86	1.13	0.67	1.81	0.22	0.69
	T4	1.42	1.70	0.75	2.45	0.22	0.79
铜	CK	0.02	0.02	0.02	0.04	0.51	0.38
	T1	0.03	0.01	0.01	0.02	0.57	0.11
	T2	0.04	0.12	0.07	0.20	0.62	0.04
	T3	0.04	0.03	0.02	0.05	0.67	0.02
	T4	0.03	0.02	0.01	0.02	0.70	0.02

[0034] TF 为转移系数, BCF 为富集系数

[0035] 表 3 结果表明,紫茎泽兰体内锌、铅和铜累积量基本都随投加浓度增高先升高后降低。在 T3 处理下,紫茎泽兰地上部锌、铅和铜累积量分别为 $28.64 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ 、 $1.81 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$,分别是对照的 58.45、9.80 和 1.25 倍,且紫茎泽兰地上部累积量占整个植株累积量的 33.33–96.71%。说明紫茎泽兰对重金属锌、铅和铜有很强的吸收累积能力,尤其是对锌,且其吸收的重金属大部分累积在地上部分。

[0036] 不同锌处理浓度下,紫茎泽兰地上部迁移系数基本都大于 1,说明紫茎泽兰对锌有很强的迁移能力,能将根吸收的锌大量的迁移至地上部分;而紫茎泽兰在不同铅和铜浓度处理下,其地上部迁移系数和富集系数均小于 1,但在高浓度处理(T4)时仍能正常生长,说明紫茎泽兰对铅和铜有很强的耐性,但是吸收富集能力相对较弱。

[0037] 不同锌和铅浓度处理下紫茎泽兰根际和非根际土壤中重金属全量和有效量测定结果见下述表 4:

[0038] 表 4 不同锌和铅浓度处理下紫茎泽兰根际和非根际土壤中锌和铅全量和有效量

[0039]

金属	处理	根际土壤锌全量(mg·kg ⁻¹)	非根际土壤锌全量(mg·kg ⁻¹)	根际土壤锌有效量(mg·kg ⁻¹)	非根际土壤锌有效量(mg·kg ⁻¹)
锌	CK	60.08	66.60	3.46	3.94
	T1	436.32	455.29	24.95	31.27
	T2	1261.70	1398.25	82.67	109.53
	T3	2488.30	2671.84	249.50	271.17
	T4	4089.21	4142.19	480.50	543.17
铅	CK	7.52	19.27	0.27	1.03
	T1	78.16	303.14	24.83	71.43
	T2	162.60	1034.37	99.98	598.38
	T3	224.19	1650.68	129.70	1044.75
	T4	447.32	2463.48	138.90	1428.50

[0040] (1) 由表 4 可得, 土壤根际锌全量、非根际锌全量、根际锌有效量和非根际锌有效量都随锌处理浓度增加而显著上升。各处理水平下, 根际土壤锌全量和有效量均小于非根际的, 是非根际的 90.23–98.72% 和 75.47–92.00%, 且根际土壤锌有效量占全量的比例均小于非根际的。这说明紫茎泽兰根系通过自身的解毒机制降低了根际土壤锌有效性和毒性, 且这一机制随根际环境中锌含量增加而逐渐增强, 从而保护自身免受伤害。

[0041] (2) 由表 4 可得, 紫茎泽兰铅处理与锌处理相似, 其根际土壤铅全量和有效量均小于非根际, 是非根际的 13.58–25.78% 和 9.72–34.76%。这说明紫茎泽兰根系通过自身的解毒机制降低了根际土壤铅毒性, 并通过某种途径将根际土壤中的铅向非根际土壤中转移, 从而保护自身免受伤害。

[0042] 综合紫茎泽兰对锌、铅和铜的耐性和富集特征来看, 紫茎泽兰为锌、铅和铜的强耐性和有较强富集能力的植物, 并且有较强的自身解毒能力, 从而保护自身不受较高浓度重金属伤害, 正常生长。因此, 紫茎泽兰对已有该植物广泛分布的锌、铅和铜污染土壤具有较强的修复能力。