DOI ：10. 13671 zj. hjk?db. 2009. 08. 008

第29卷第8期

2009年8月

环境科学学报

Acta Scientiae Circtmstantiae

李清飞，仇荣亮，石宁，等.2009.矿山强酸性多金属污染土壤修复及麻疯树植物复垦条件研究[J.环境科学学报，29(8)： 1733- 1739

LiQ F QiuR J Shi" et aj 2009. R acedia tion of strongly acidicm he soils con tan fliated bYniultiPlemetels bY Plant reclamation wi^ JatroPha curcas b and addition of lhiestone] J. Acta Scientiae Circimstantiae29 (8)： 1733 — 1739

矿山强酸性多金属污染土壤修复及麻疯树植物复垦 条件研究

李清飞，仇荣亮\*，石宁，周小勇，SNIHHKLMAR ?黄穗虹

中山大学环境科学与工程学院，广东省环境污染控制与修复技术重点实验室，广州510275

收稿日期：2008-11-01 修回日期：2009-03-01 录用日期：2009-06-04

摘要:采用温室盆栽实验，研究了在不同剂量侦量分数分别为0.0. 10%、0. 25%、0. 5%和1. 0% )石灰石改良条件下，大宝山矿强酸性多金属 不同污染程度土壤中麻疯树的生长状况和吸收金属特征，并探讨了麻疯树在酸性土壤中生长的抑制因素和石灰石改良适宜剂量.研究表明，在 低污染酸性土壤中，C耶口 P啲高活性可能是抑制麻疯树生长的主要因素；而在高污染酸性土壤中，CdCQZ嘩金属的高活性及由强酸引起 的A毒也可能是抑制麻疯树生长的主要因素；石灰石通过提高土壤田值和降低多金属的生物有效态含量，促进了麻疯树在低污和高污土壤 中的生长，其最佳剂量分别为0. 25%和0. 5%；石灰石可以不同程度地降低麻疯树地上部和地下部的Cd Cu Pb A含量，同时随石灰石 用量的增加，其金属含量基本呈降低趋势；麻疯树地下部金属含量高于地上部，且石灰石对麻疯树地下部金属滁CM卜洽量降低幅度较地上 部大.因此，种植麻疯树与石灰石改良是联合修复大宝山矿酸性多金属污染土壤的有效措施之一.

关键词:植物复垦;石灰石；麻疯树；多金属污染;大宝山

文章编号:0253^468(2009)08-1733-07 中图分类号：&3 文献标识码：A

Ron ediatjon of strong ]y acidic m jne soils contaminated by ni u ItiP le m eta *]s* by

Plant reclamation with JatroPha curcas L and addition of Ifnestone

LIQing^i QURongliang, 田INing ZHOUXiaoyon^ SENIHIKLMAR 尸 HUANG Sujhong

School of Enviiormental Science and Eng讥eer讥g Sun Yatsen Universi学 Guangjong piovjicia] Key Lab of Envirormental pollution Contra] and Rawed iation Techno Jo罗 Guangzhou 5 ] 0275

Received] Novonber?00& received 讥 revised Qm ] March200^ accepted4 June2009

Abstract In a greenhouse pot experjnent 1he dose, response effects of Ijnestone addition( mass fractjonsQ ]%, 25%, 0. 5% 1. 0% ) 皿 1he

grew牡 perfDmance anjmetal uptake characteristics of JatroPha curcas grcwn on Jifferentmulti\_mela 1 contaminated strong]y acid soils firm Dabao Mounta m pe were smdied Factors suppressing Plant grewas well as lhe feasible Josage of Ifnespne are also discussed In 饥e soilswilh lewer levels of poUution high biQ-availabilities ofCu and Pb appeared to be prhiaiy 但ctors 讥hibit讥g tie gicwih of JatroPha curcas J, while 讥 highly Polluted soijs gicwt! inhibition of JatroPha curcas J ma^iy resulted ficm lhe high biQ-availabili^ ofCQ Cu and Zn as well as Al toxicity caused bY 1he strong acidiiy The grew^ perfomance of JatroPha curcas was jnproved boti tie Jcwer and highIX Polluted soils by be jicrease of soil FH anj decrease of biQ available metal contents( CQ Cy Pb Zn and AD achieved bY 1he addition of ltnespne The optimm dosage of lfnesipne was。. 25% Qr sops wib Javer pollution levels and。. 5% Qr soilswilh higher pollution levels The concentrations ofCQ Cy *P\)* Zn and Al the shoofe and mots

of JatroPha curcas were reduced 10 different extent bY tie linestone and basically decreased wilh Ocreas jig anount of linestone The metal

concentrations 讥 roots were higher 血 an 迥 弘 oo 芋 and be J top bimetal concentrations( except Cd) caused bY tie linestpne was higher 讥 roots 牡 an 订 shoo哼 Therefore 1he ccmb jiation of Planting JatroPha curcas L and linestone amendment is one of ^emost effective ways to ranediate acjj soils fian DabaoMountaji which are polluted wiih multiple heavy mete Is

基金项目：广东省自然科学基金研究团队项目(N9 06202438)；国家高技术研究发展计划(863)项目(No2007 AA)61001 )； NFSC广东联合基 金重点项目(N9 5833004)

Supported by the Guangdong pmv讥cialNauiral Science Teamwork Foundation( No 06202438 ), tie Hi-tech Research and Devejopnent program of Chffia ( N9 2007 AA)61001) be NFSGuangdong Jo讥t Fund Key Projects( N9 U)833004)

作者简介：李清飞(1980-),男，博士研究生，E^nail yahoo cu \*通讯作者(责任作者),“a" eesqr^mail sysu edu cn

B iography LIQ讥g出(1980— )，malF Pb D candidate E-mail liqing^@ yahog cn 关 Correspond jig author E-mail eesqr^mail sysu edu

cn

Keywords Plant reclamation linestone JatroPha curcas^. multlmetel contampatiou DabaoMounta讥

**1** 引言（Jitioduction）

粤北大宝山矿（24°37, N 113°39‘ E）是中国南 部富含硫的多金属矿山，采矿过程中产生大量含有 有毒重金属元素（Cd Pb Cu Z嗨）的废弃物、尾矿 及酸性矿山废水（AMD）倜建民等，2004）进而影 响矿区周边土壤、水体质量、作物产量和品质，并严 重威胁着人类身体健康和动物生命安全（邹晓锦 等，2008 ）.因此，修复该地区酸性多金属污染土壤 是当前亟待解决的环境问题之一.

植物复垦被公认为修复矿山废弃地的最好方 法,通过它可以固定矿山废弃物，减少污染物对周 边环境的污染，美化环境并产生较高的经济效益 （Toidoff et al? 200Q Wong et aj? 2003 ）・但复垦矿 山废弃地也面临一些问题:矿山废弃地恶劣的土壤 环境（如高浓度的残留重金属、极端酸性、大量营养 元素匮乏、土质结构差和干旱等）限制了植被的成 功定植（黄铭洪等，2003 ）；适用于矿山修复的具有 多金属耐性、可产生经济效益且不进入食物链的植 物品种较少（M 2006）.因此，合理的土壤改良方法 和合适的植物品种是植物复垦成功的两个关键 因素.

本研究在石灰石改良的基础上，以非食用性的 能源油料作物——麻疯树（Jatx°Pha curas L）为植 物修复材料，探讨了麻疯树在矿山酸性多金属污染 土壤中的生长抑制因素及其对重金属的吸收情况, 并确定石灰石改良矿山酸性多金属污染土壤的适 宜剂量，以期为多金属复合污染土壤的联合修复提 供理论依据.

**2** 材料与方法（M3teri31s andme^ods）

2 1供试土壤、植物及改良剂

土壤采集于广东省翁源县大宝山矿两种不同 多金属污染程度的酸性土壤（简称低污土和高污 土）•土壤风干后，过2山1呢龙网筛，土壤和石灰石 的基本理化性质见表1 •植物为在营养土壤中生长 15 d的麻疯树实生幼苗.改良剂为石灰石，粉碎后 过100目筛备用.

表**1**两种土壤和石灰石基本理化性质

Table] Selected Physicochemical properties of wo soils anj linesione

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 材料- | 砂粒 | 粒径组成  粉粒 | 粘粒 |  | 有机质 | 总氮 | 总磷/ (mg kL ) | CEC/  (anoj 站 1) | 金属全量/（m& ） | | | | |
| Cd | Cu | Pb | Zn | Al |
| 高污土 | 2 1% | 61. *0%* | 36. 9% | 3. 13 | 0. 38% | 0. 04% | 847 | 4. 1 | 19. 85 | 722 0 | 2466. 7 | 651. 9 | 32970 |
| 低污土 | 3. 6% | 83. 1% | 13. 3% | 3. 54 | 1. 00% | 0. 09% | 971 | 2 8 | 2. 85 | 579. 5 | 50& 8 | 323. 2 | 28750 |
| 石灰石 | — | — | — | 9. 52 | 0. 67% | 7. 17% | — | a 04 | 0. 70 | 4. 7 | — | 13. 47 | 284 |

2 2实验方法

土壤分别用质量分数为0、0. 10%、0. 25%、 0. 5%、1. 0%的石灰石进行改良处理,每个处理重复 3次.麻疯树采用温室盆栽方法，盆钵上、下底直径 和高度分别为16、12和13 ™每盆装土 1殳阱施 加1旷东省农业科学院的农科牌复混肥料（15-6- 12）•土壤平衡7垢,每盆移栽1棵麻疯树幼苗，麻 疯树生长3个月后收获.收获时测量麻疯树的叶片 数、叶面积伕E炳松，2006）、茎围（E巨地面1 口处测 量）、株高、根长和生物量，并将植物分为地上部和 地下部，先用自来水清洗干净，再用去离子水冲洗 数遍后，65°C烘干后粉碎待测.同时，采集黏附在麻 疯树根系上的土壤为根际土壤（Wang et a 1? 2006^ peng et a 2007 ）.

2 3分析方法

土壤重金属有效态含量采用DEV提取法

（LPdsay et a 1? 1978 i 即 2 &土壤加 0. 005

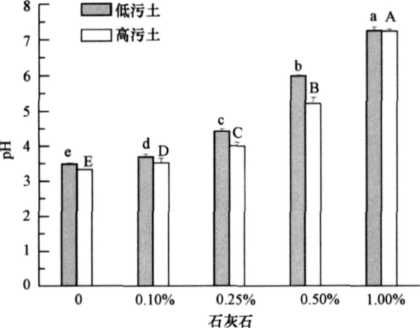
m°i I71 D1PA溶液（0. 005m°l 口 DTFA+0. 01 m°l IT1 CaC』2HCH0・ 1 mo< IT1 三乙醇胺，ffl= 7. 3）20 在150 Fm"条件下室温振摇2 b麻 疯树样品和土壤样品分别米用硝酸高氯酸（体积比 为4 1）和硝酸盐酸（3 1）消解法消解，样品金属含 量 用 EP-OES （ OPtma 5300 DY Peii^Etner

Instimien^ US^则定.以环境标准物质ESS-3红 壤和ESP—1西红柿叶（中国环境监测总站 腿行质 量控制，质控样测定均值和平行样偏差都在规定要 求范围内•以上所有数据应用SPS31. 5进行统计分 析，并用。诧瓯5软件绘图.

**3** 结果（Results）

3. 1石灰石对土壤田值的影响

图1为石灰石对两种污染土壤 田值的影响. 结果表明随着石灰石投加量的增加，低污土和高污 土的圧植显著增加（匕0. 05 ），并呈显著正相关



图**1**石灰石对两种污染土壤PH值的影响（同种土壤不同 字母表示差异性显著（乞0. 05））

Fig 1 Effect of linestpne treatnents on 田 也 wo

con tan jiated soils

（爲土 =o. 983書污土 =0. 995 ）.这说明石灰石能够 中和土壤酸度，这对改善矿山污染土壤质量起着重 要作用.

3. 2石灰石对土壤中有效态金属含量的影响

表2为石灰石对低和高污土中有效态金属含量 的影响•结果表明随着石灰石投加量的增加，两种 土壤中的Cd Cu Ph *Zr^n* A的有效态浓度基本上 呈下降趋势，并且都以1. 0%石灰石处理时的浓度 最低•同时，石灰石对不同金属的钝化效果不同，其 中，低污土中的Cd Cu Pb Z讶口 A的有效态浓度 分别比对照降低了 3. 1%〜34 4%、13. 2%〜 70. 0%、1& 9% -59. 4%、11. 8% 〜82 3%和 2 2% 〜99. 3%；高污土中它们分别比对照降低了 17. 9% 〜66. 7%、27. 0% 〜80. 0%、1. 2% 〜31. 4%、35. 7% 〜90. 2%和56. 1%〜98. 0%.相比而言，石灰石对 高污土中Cd Cu Z耶口 A的钝化效果高于低污土； 而Pb则相反，低污土的Pb＜效态含量较高污土 高，这可能与高污土的粘粒成分高（表1》Pb易于 被粘土矿物吸附有关（Kabata-Pendias et aj? 2001； Clmente et aj? 2006）.

表**2**石灰石对低和高污土中有效态金属含量的影响

Table2 Available meta] concentrations 讥]cw and hiHh level contam 讥ated soils under Ijnestone trcatnents

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土壤 | 处理 | 金属含量/（mg kri） | | | | |
| Cd | Cu | Pb | Zn | Al |
| 低污土 | 0 | o. ii +o. or | 11. 79+0. 30a | 26. 97 +1. *43a* | 5. 56 +0. 77a | 7. 01 +0. 20a |
|  | 0. 10% | o. io+o. or | 10. 24+0. 25 b | 21. 86 乜 8113 | 4. 90+0. 70a | 6. 85 +0. 28a |
|  | 0. 25% | o. io ±0. or | & 06 +0. 35c | 13. 41 +0. 91° | 2 02 ±0. 24b | 2 12+0. 04b |
|  | 0. 50% | 0. 09 ±0. 01b | 4. 50+0. 23 d | 12 95 ±2 26 ° | 1. 43 ±0. 28b | 0. 37+0. 02c |
|  | 1. 0% | 0. 07+0. 00c | 3. 54+0. 07e | 10. 95+0. 61c | 0. 98 +0. 06 b | 0. 05+0. 01d |
| 高污土 | 0 | 0. 26 ±0. 02a | 20. 21 +1. 39a | 14. 84 土 1. 15a | 18. 25 土3. 16a | 20. 36+0. 75a |
|  | 0. 10% | 0. 21 +0. 01b | 14. 72 +1. 58b | 14. 66+0. 63a | 11. 74 +1. 23 b | & 94 +1. 05 b |
|  | 0. 25% | 0. 20+0. 01b | 13. 66 土 1. 72 b | 12 64 +1. 93ab | 6. 56+1. 47c | 4. 79+0. 76c |
|  | 0. 50% | 0. 15 ±0. 01c | 6. 68 +1. 06c | 13. 20 +1. 89a | 4. 21 ±0. 32cd | 0. 93 +0. 08 d |
|  | 1. 0% | 0. 09+0. 01d | 4. 03 +0. 21d | 10. 17+1. 36b | 1. 79 +0. 38d | 0. 41 +0. 04d |

注:表中数据为平均值 堺准差（《=3）,同一列中同种土壤中的不同字母表示有显著差异（比0.05）,下同

3. 3石灰石对麻疯树生长的影响

表3为石灰石对麻疯树生长参数的影响•结果 表明与对照相比，石灰石改良改善了麻疯树的生 长•在低污土中，石灰石处理之间麻疯树生长参数 基本上没有显著性差异（卜0・05）说明施加少量 石灰石（0. 1%或0. 25% ）就能改善植物生长.但在 高污土中，除叶数外，不同石灰石处理的各参数之 间存在显著差异（比0. 05）.其中，以1. 0%处理的 叶面积、0. 25%处理的株高和0. 5%处理的麻疯树 茎围、根长、根干重和总干重最大，分别是对照的 3. 9、1. 5和1. 7、4. 5、7. 4和4. 5倍•在所有处理中， 低污土生长的麻疯树生物量都大于高污土.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 表3石灰石对麻疯树生长参数的影响  Table3 Effect of linestone treatnents on grew旺 parameters of J curcas | | | | | | | | |
| 土壤 | 处理 | 叶数/ 株T | 叶面积/ cn? | 茎围/  mm | 根长/  mm | 株高/  mm | 根干重/  （&株一1） | 总干重/ （g 株 T ） |
| 低污土 | 0 | 5. 3 +0. 6a | 8& 5+27. 8b | 23. 7+1. 5C | 37. 2 ±11. 7b | 97. 3 +4. 6b | 0. 05 ±0. 02b | 0. 71 +0. 22b |
|  | 0. 10% | 6. 7+0. 6a | 237. 2 +5. 5a | 40. 0+2 7ab | 134. 0+18. 5a | 126. 7+2 9a | 0. 35 +0. 09a | 3. 14 +0. 17a |
|  | 0. 25% | 6. 0+1. 7a | 251. 4+16. 6a | 46. 7+2 9a | 130. 3 +26. 4a | 116. 7+5. 8a | 0. 41 +0. 09a | 3. 43 +0. 55a |
|  | 0. 5% | 7. 0+1. 0a | 267. 5 +37. 0a | 43. 3 +4. 2ab | 142 3 ±11. 2a | 120. 0+10. 0a | 0. 39 ±0. 28a | 3. 74+0. 67a |
|  | 1. 0% | 6. 7+0. 6a | 253. 4+54. 8a | 35. 7 ±3. 1b | 132 3 +2. 5a | 125. 7+20. 0a | 0. 21 ±0. 01ab | 2 98+0. 47a |
| 高污土 | 0 | 3. 7+0. 6b | 67. 5 七4. 3 ° | 19. 7+2 5b | 30. 0+3. 5d | 105. 0±10. 0c | 0. 05 +0. 00d | 0. 47zt0. 04d |
|  | 0. 10% | 7. 0+1. 0a | 160. 6+45. 3b | 27. 0+2 7ab | 55. 3 ±13. 7cd | 126. 0+8. 7b | 0. 11 dzO. 04cd | 1. 22 +0. 23 c |
|  | 0. 25% | & 3 ±2 r | 230. 9+67. 8ab | 33. 0+9. 6a | 101. 7士1& 5ab | 153. 3 +10. 4a | 0. 26 ±0. 07b | 2 52+0. 69 b |
|  | 0. 5% | 7. 31 +0. 6a | 224. 8+11. 4ab | 34. 3 +6. 0a | 136. 3 +49. 0a | 124. 0+5. 3b | 0. 37+0. 02a | 3. 34+0. 18a |
|  | 1. 0% | 7. 7+0. 6a | 264. 2+29. 4a | 27. 0+2 7ab | 87. 0+3. 5bc | 143. 3 土7. 6 \* | 0. 20 ±0. 09bc | 2 30+0. 49 b |

3. 4石灰石对麻疯树吸收金属（以干重计）的影响 图2为石灰石对低污和高污土上的麻疯树吸收 金属的影响•结果表明麻疯树地下部金属含量高于 地上部，两种土壤施加石灰石后都不同程度地降低

石灰石质量分数

石灰石质量分数

**2400**

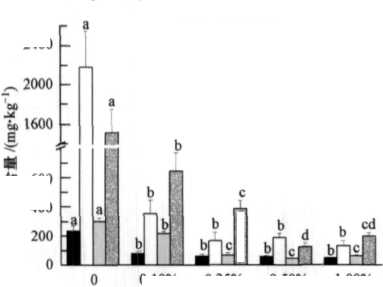
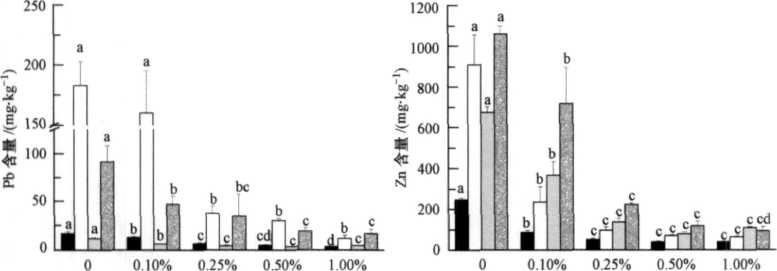
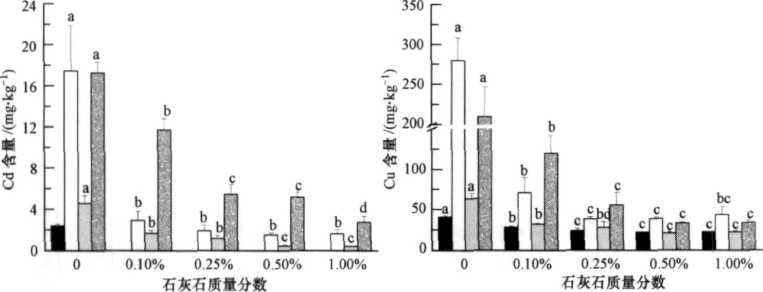
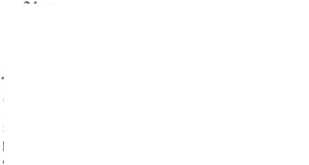
**0.10% 0.25% 0.50% 1.00%**

石灰石质量分数

**600**

**400**

■低污地上部 匸□低污地下部 匚二I高污地上部 口高污地下部



图**2**石灰石对低和高污土上的麻疯树吸收金属的影响（同种土壤上的麻疯树相同部位的不同字母表示差异性显著（匕0. 05））

Fig 2 Effect of linestone treatnents on 出eme坦 1 concentrations 讥 J curcas gicwn on 飪e ]cw and high meta] soils

了麻疯树地下部和地上部的Cd Cu Pb Z讶口 A含 量，并基本上呈随石灰石用量增加而减少的趋势， 其中以0. 5%或1. 0%石灰石处理时麻疯树各部位 的金属含量最低•对低污土而言，施加0.25%石灰 石时麻疯树各部位的Cd Cu Pb Z耶口 A含量明显 降低•其中，地上部Cd未检出，其它金属分别比对 照降低了 41. 4%、60. 3%、79. 2%和 72 7%,地下部 金属含量分别比对照降低了 8& 9%、86. 3%、 79.2%、89. 5%和92 4%.而对高污土而言，施加 0.5%石灰石时麻疯树的各部位金属含量与1. 0% 处理的差异性不显著餘高污土地下部的Cd＞量 外）（？＞0. 05）.其中，0.5%处理时的地上部Cd

CQ Pb Zn和Alt量分别比对照降低了 89. 9%、 67. 2%、68. 2%、88. 5%和84. 3%,地下部金属含量 分别比对照降低了 84. 0%、7& 6%、89. 0% 和 91. 8%.

除C矽卜,石灰石对麻疯树地下部金属含量降 低幅度大于地上部•其中，在0. 5%或1. 0%石灰石 处理时，植物地下部Cu Pb Z讶口 A含量的最大降 幅达81. 3% -93. 9%,而植物地上部的最大降幅达 45. 8% 〜8& 5%.

3. 5麻疯树中金属含量与土壤金属有效态含量的 相关性分析

表4为麻疯树中金属含量与土壤金属有效态含 量的相关性分析结果•由表4可知，除高污土的Pb 有效态含量与麻疯树地上部和地下部的P昭量之 间相关性不显著外，其余的土壤中有效态金属与麻 疯树各部位的重金属含量都呈显著正相关•这说明 土壤中金属有效态含量是影响麻疯树吸收金属的 一个重要因素.

表**4**麻疯树中金属含量与土壤金属有效态含量的相关性（—15）

Tab 1^4 COITelation coefficients between available metal concentrations

ji soil anj metal concentrations jn J curcas

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 金属 | 低污土 | | 高污土 | |
| 地上部 | 地下部 | 地上部 | 地下部 |
| Cd | - | 0. 532\* | 0. 829\*\* | 0. 879\*\* |
| Cu | 0. 819\*\* | 0. 704\*\* | 0. 821\*\* | 0. 833\*\* |
| Pb | 0. 956\*\* | 0. 968\*\* | 0. 511 | 0. 514 |
| Zn | 0. 804\*\* | 0. 779\*\* | 0. 934\*\* | 0. 942\*\* |
| Al | 0. 690\*\* | 0. 666\*\* | 0. 944\*\* | 0. 976\*\* |

注：\*和\* \*分别表示在0. 05和0. 01水平上相关性显著.

**4** 讨论（Discussion）

在多金属污染的酸性土壤中，A及其它重金属

元素（Cd cu z嗎）是抑制植物生长的主要

因素之一（K3&仕PendiQsetd」，2001 ）.在 吐5・0 的酸性土壤中，A生要以毒性A^O）「或A片的 形式存在（Kinraide 1993）；而在 田5・0~6.2之间 主要以非毒性的瓮基ai（ai（oh）+. A1（OH）2+、 A1（OH）；）的形式存在（Khrajde 1997）.同时，Cd CQ卩坏口 Z舞重金属元素的迁移性和生物有效性 也较高（Kaba^Pendias et aj? 2001 X在本研究中， 两种对照土壤中麻疯树生长受到严重抑制（表3》 施加石灰石能显著提高土壤田并促进麻疯树的生 长彼3 ）・对低污土和高污土来说，施加低剂量 （0. 1% ）石灰石能使其田分别增加到3. 71和3. 53 （ffl 均明显地改善了麻疯树的生长•但对低污土 而言，施加0. 1%石灰石时，Cd Zn A的生物有效 态含量与对照土壤相比均没有显著性差异（!＞ 0.05》而P啲生物有效含量则明显降低確 2）由此推断金属C耶口 P啲高活性可能是低污土 中抑制麻疯树生长的主要因素；对高污土而言，施 加o. 1%石灰石时，金属e p垃卜准物有效态含量 对照土壤相比均明显降低e 2）由此推断cd cu w a的高活性可能是高污土中抑制麻疯树生长 的主要因素.

另外，施加石灰石中和了污染土壤中的酸度使 土壤 田显著增加（图1》从而诱导了土壤表面负 电荷的增加（Bolan etal? 2003 ）并提高了土壤颗 粒对多金属的吸附（Naidu et al? 1997 ）. 土壤 田 为4. 0〜7. 7时，田每增加1个单位而土壤吸附能 力增加约3倍（K3&缸Pendias et a 1? 2000同时 金属以碳酸盐的形式沉淀（ChQPecka eg」，19% McBride et 3丄 1997. K^bs et aj? i998》降低了金 属有效态含量，因而提高了麻疯树对多金属 耐性.

石灰石通过固定土壤中的金属，降低金属有效 态含量仕Pendias et a 1? 2001 ）和增加土壤溶 液中C汕浓度来抑制植物吸收污染土壤中金属.在 运输机理方面，C計能够取代Cd+被转运到植物体 内，因而过量的C汕能够抑制植物对Cd+的吸收 （Kabata-Pendias etal? 2001 ）；同时，C計与 C姑、 Z計、PB+和A节之间也存在“拮抗效应”现象 （Voigt et al? 200$ Kaba^Pendias et 3丄 2001 ）从 而抑制植物对它们的吸收•因此，在低污土中施加 0. 25%石灰石和高污土中施加0. 5%石灰石就可显 著降低麻疯树地上部和地下部的多金属含量•对于 两种污染土壤来说，并非石灰石施加量越多越好， 过量的石灰石降低了土壤营养元素的可利用性并 增加了土壤盐度(Chen etaj? 2006 进而影响麻 疯树的生长•就低污土而言，虽然0. 5%石灰石处理 的麻疯树生物量最大，但与0. 10%和0. 25%石灰石 的处理相比没有显著差异(5>0・05》并且0. 25% 石灰石处理的根部生物量最大，而且金属含量也达 到较低水平，故选0. 25%石灰石剂量为较佳剂量； 在高污土中0. 5%石灰石处理的生物量最大、金属 含量较低，选0. 5%石灰石为较佳剂量.

本研究中，麻疯树能够在矿山多金属污染的酸 性土壤中存活e 2)但其生长会受到抑制•通过增 施适量的石灰石可缓解金属Cd Cu Pb Z讶口 A的 毒性，提高麻疯树对多金属的耐性，并且金属主要 富集在植物地下部(ffl 2)减少对地上部的毒害.

**5** 结论(Conclusions)

1在低污土中，C岬P暗金属的高活性可能是 抑制麻疯树生长的主要因素;而在高污土中，Cd Cu Z辱较高的金属活性及由强酸而导致的A毒可能 是抑制麻疯树生长的主要因素.

2用灰石通过提高土壤田值降低低污土和高 污土中的金属有效态含量，促进麻疯树在强酸性多金 属污染土壤中的生长;在低污和高污土中生长的最佳 石灰石剂量分别为0. 25%和0. 5%.

3石灰石可不同程度地降低麻疯树中各部位的 Cd Cu Pb *Zr^n* A的含量，并基本上呈现随石灰石 用量增加而减少的趋势;麻疯树地下部的金属含量高 于地上部，并且石灰石对麻疯树地下部金属含量< C矽卜释低的幅度大于地上部.

4芹中植麻疯树与增施适宜剂量的石灰石是联合 修复大宝山矿多金属污染酸性土壤的有效措施之一.

责任作者简介：仇荣亮(1967-),男，教授，博士生导师；现 任广东省环境污染控制与修复技术重点实验室主任.近年来 主要从事重金属污染土壤生物修复等方向的研究工作.

参考文献(References)：

Bolan N g Adriano D C Mani P A et a.l 2003. Inmobilization and

Phytoavaliability of cadtnitm 讥 variable chaige soils 口 Effect of line addition[ Plant and Sojl 25(2)： 187— 198

Chen Q Wong JW C 2006. Gm 血 of ASiopyron elongatum in a sjnulated nickel con tarn jiated soil witi line stabilization〔 j . Science of ihe Total Environment 366 (2 -3 )： 448— 455

ChloPecka Bacon J耳 W ilsonM J et aj 199^ Foms of cadmitm

[eaQ zjic 讥 conwm jiatej soils frtm Souiiwest Poland [ |.

Journal of Enviiormental Quality 25 (1 )： 69— 79

Clanente耳 AtnelaQ BemalM 2006. A ranediation strategy based on active Phypranejiation QlJcwed bY nauiral attenuation 讥 a soil contemplated bY PYrite waste [ Enviiormental pollution [43 (3 )： 397- 406

黄铭洪，骆永明.2003.矿区土地修复与生态恢复[土壤学报，

40 (2 )： 161— 169

WongM 耳 LuoYM 2003. Land ranediation and ecological restoration ofm讥ed land] j. ActPedojogica S^ica 40(2)： 161— 169 (讥 Cheese)

Kaba直Pendias *片* PendiasH 2001. Trace E lanents 讥 Soils and Plants (bird ed )[网.Boca Ra网 CRC Press

KffiraideT 1993. AKm讥曲 enhancsnent of Plant grcwti 讥 acid root jig media A case of reciprocal alleviation of toxicity bY wo toxic cations[ J. Physiologia Plants叫 88(4)： 619—625

Kffiiaide T £ 1997. Reconsider jig ihizotoxici 级 of hYdiox^l

sujphate and fluoride ccmPlexes of ajum jiium〔 j. Journal of Experinental Botany 48(5). 1115—1124

Krebs 耳 GuPtaS 耳 Furrer Q et a 1 199& S。Mb ilia and Plant uptake of metals with and wi^out ljn^ig of sJudge.anenjed soils〔 j . journal of EnviiormentalQuali^ 27 (1 )： 18— 23

Li M S 2006. Ecological restoration of m 讥eland witi Particular reference t) metalliferous m jne wasteland Ch讥Q A review of

research anj practice [ j. Science of Total Envirorment 357 (1-3 )： 38—53

L讥dsayw » NorvellW A 197& Development of a DPIA so" test Qr zjic iron manganese and copper〔 j. S°il Science Socie® of America Journal 42(3 ). 421- 428

McBride NJ Sauve g Hendershot^ 1997. Solubility control of Cy Zn Cd and Pb 讥 contemplated soils〔 J European Journal of Soil Science 48(1)： 337- 346

Naidu 耳 KookanaR $ S^nerM £ et aj 1997. Cadmium soiption and transport 讥 variable chaige soilp a review〔 j. Journal of EnviionmentalQuali^ 26(3)： 602- 607

PengH 丫 Yang X E 2007. Ef杷ct of Elsholtzia SPlendens Soil 如nendnen芋 and Soil Managenents on *Qu* Zn and Cd

Fractionation and Solubilization 也 Soil under Field Conditions〔 j . Bullets of Enviiormental ContamRation and Toxicojo彎 73(5). 384—389

TordoffGM BakerA JNJ W illisA J 2000. Current approaches to revegetation and reclamation of metallifeious m jie wastes〔 j . ChanosPhere 41(—2)： 219-228

Voigt 4 Hendershot W 耳 Sunahara G J 2006. Rhizotoxicity of cadtnitm and copper 讥 soil extracts j. Envirormental Toxicology and Chan ist? 25 (5 )： 692- 701

Wang A Angle J $ Chaney R et aj 2006. Soil EH ef^cts on uptake of Cd and Zn bY Thia雪i caemlescms|- j . Plant and Sojl 281 (1-2)： 325—337

WongM H 2003. Ecological restoration ofm讥e degraded soi]s wilh onPhasis on metal contam jiated soil [ j . Ch®^osPhere 5。(6 ).

775— 780

郑炳松.2006.现代植物生理生化研究技术[M].北京：气象出 版社

Zheng B S 2006. Research Techniques 讥 Conmporaiy Plant Physiology and Biochsnistiy [ M]. Eeij讥罗 Chpa Meteorological Press( Cheese)

周建民，党志，司徒粤，等.2004.大宝山矿区周围土壤重金属污染 分布特征研究[J.农业环境科学学报，23(6)： 1172-1176

Zhou JM Dangg Si^Y et a 1 2004. Distribution and characteristics of heavy meials contam Rations 讥 soils firm Dabaoshan M 讥e Area 〔J. journal of Agio-Enviiorm ent Science 23 (6)： 1172— 1176 ( in Cheese)

邹晓锦，仇荣亮，周小勇，等.200&大宝山矿区重金属污染对人体 健康风险的研究[J.环境科学学报，28(7)： 1406- 1412

ZouXJ QiuRb Zhou X X et a.l 2008. Heavy metal con tan Ration and healti risk assessnent Dabao Mounta讥 Ch讥a〔 . Ac母

Scientiae Circunstantiae 28 (7 )： 1406— 1412 (讥 Cheese)

环境岩土工程国际学术研讨会（BG5009）2号通知

环境岩土工程国际学术研讨会暨2009年度浙江大学曾国熙讲座将于2009年9月8〜10日在杭州 召开。

主办单位

国际土协环境土工技术委员会（EMGdG）

承办单位

浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会（CEWGE）

国际土工合成材料学会中国委员会（CCISS）

本研讨会围绕 “ Reclamation of past and Tcwaid a Sus^pable Geoenviiomient 偕土环境修复与可持 续发展 滋一主题，将就环境土工的基本理论、环境土工的测试和监测、固体废弃物和填埋场工程、污泥和疏 浚、工业废料的岩土工程再利用、矿山、尾矿坝和污泥塘、放射性废弃物处置的工程屏障、污染土壤及修复技 术、土工合成材料在环境岩土工程中的应用、环境岩土工程风险评价、管理和可持续性、生态技术和工程案 例、环境土工的工程实践与规范等展开讨论。

本研讨会论文集录用国内外作者的120余篇学术论文，由SPringe^浙江大学出版社共同出版，由EIF 收录。

本研讨会特设2009年度浙江大学曾国熙讲座，邀请国际土力学与岩土工程学会（3GE）主席Pedio Secoepjnt（教授和加拿大工程院院士、2005年郎肯讲座人R KerryRov^r授担任讲座人。

此外，组委会还邀请到十多位环境岩土工程领域的国际知名专家和学者担任特邀报告人，包括Bmno Bussiere（加 拿大）、Jinchun C&i（日本）、DeMn F\*dlund（J[]拿大）、SWhan ie Q lend inning （英国）、Ulrich HenkeaMellies国）、StePhan Jef休is（英 国）、Takeshi Katsuni（日本）、MMhiia MMhav （印度）、Mario Manassero^g；大利）、David Richards^ 国）、Jiio Takmura（日本）、Themes（英 国）、Albert Yeung（香 港）、AigenZh叫美国帶。

联系人:唐晓武教授 渐江省杭州市浙江大学岩土工程研究所安中建工大楼 场12室，邮编：310058）；电 话：+86-571-88208791；传真：+86—571—8820879$ 电邮：^5009® ZW edy c?

网站：h® //www ssgeo zju edu cn/ EGE^009. hm

EGE^009组委会 2009年6月30日