

天然蒙脱石和沸石改良对黑麦草在铜尾矿砂上生长的影响*

郝秀珍 周东美[†] 薛艳 陈怀满

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要 通过温室盆栽试验,开展了天然蒙脱石和沸石处理对黑麦草在铜尾矿砂上生长影响的研究。结果表明:蒙脱石和沸石改良对黑麦草的地上部生物量没有显著影响,但改变了黑麦草的根重;而施用肥料促进了黑麦草生长。蒙脱石的加入使尾矿砂的有效态锌含量显著降低,但对有效态铜的含量影响不明显;而沸石的加入均显著降低了尾矿砂的有效态铜和锌的含量;另外,矿物的加入降低了尾矿砂的 pH 值,但其变化与尾矿砂重金属有效态含量变化之间无相关性。矿物的加入降低了黑麦草根中的铜锌吸收,但蒙脱石增加了第一茬黑麦草地上部铜锌吸收,对第二茬黑麦草地上部铜锌吸收无影响;而沸石对两茬黑麦草地上部铜锌含量均无显著影响。不同生长期黑麦草对铜锌吸收量有差异,第二茬黑麦草的地上部锌含量明显高于第一茬,而铜含量则变化不大。

关键词 尾矿砂; 黑麦草; 重金属; 蒙脱石; 沸石

中图分类号 S153 文献标识码 A

尾矿砂是金属矿山开采和冶炼过程中的主要副产物。由于金属尾矿砂不良的物理和化学性质,植物定植和生长均比较困难,从而限制了尾矿砂上的植被恢复和重建^[1~3]。通过基质改良的方法可降低或消除一些尾矿砂理化性质方面的限制因子,从而满足植物生长所需要的条件。不同的改良物质有其独特的作用和机制,主要包括:沉淀作用、吸附作用和颞颞作用等^[4]。我们曾开展了利用泥炭和有机物料(如稻草和有机肥)等来进行铜尾矿改良,并已取得了一定的研究进展^[5~7]。

一些矿物材料如蒙脱石和沸石具有高的吸附容量和离子交换能力。其中,蒙脱石是一种天然的层状硅酸盐无机物,具有典型的 2:1 型层状结构。蒙脱石的层间域对重金属离子具有较好的吸附能力,因此可以用来吸附固定重金属,降低被植物吸收的可能性^[8,9]。沸石的结构是由 Si、Al 和 O 三种元素组成的四面体,其中硅氧四面体和铝氧四面体间构成了具有无限扩展的三维空间架状构造。由于沸石独特的结构,其内部表面积很大,可达 355~1 000 m² g⁻¹,因此沸石对离子的吸附量很大^[9]。重要的

是,我国河北、黑龙江、辽宁、浙江等省具有丰富的沸石资源^[10],在改良材料选用方面我们将可以就近取材。另外,这些矿物材料一般还具有保水和保肥的能力,有利于土壤改良^[11]。

本试验比较了蒙脱石和沸石两种矿物对黑麦草在铜总量较高的铜陵水木冲铜尾矿砂上的生长状况及其影响因素,为矿物材料在矿区的改良应用等提供基础性研究资料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的铜尾矿砂于 2001 年 9 月采自安徽铜陵水木冲铜尾矿,碱性,将其晾干,过筛,除去大的石块和砂砾;试验所施用的改良剂矿物材料有蒙脱石和沸石,分别取自南京汤山和辽宁法库。矿砂及改良材料在进行盆栽试验之前均过 20 目筛。供试作物为黑麦草。供试矿砂以及蒙脱石和沸石的基本性质示于表 1。

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-401)和中国科学院南京土壤研究所所长基金项目资助

[†] 通讯作者

作者简介:郝秀珍(1977~),硕士,主要从事土壤环境化学与污染控制方面的研究工作

收稿日期:2004-06-14;收到修改稿日期:2004-11-12

表 1 尾矿砂和改良材料的重金属含量和 pH 值
Table 1 Copper and Zn concentrations and pHs of the Cu mine tailings and amendments

供试材料 Materials used	Cu (mg kg ⁻¹)		Zn (mg kg ⁻¹)		pH
	总量 Total	有效态 Available	总量 Total	有效态 Available	
尾矿砂 Mine tailings	2 355	20.5	267	5.18	8.32
蒙脱石 Montmorillonite	9.52	0.55	41.0	0.29	7.45
沸石 Zeolite	1.78	0.44	27.4	0.25	8.00

1.2 盆栽试验

应用天然蒙脱石和沸石作为尾矿砂的改良剂进行种植黑麦草的盆栽试验, 试验共设 12 个处理(见表 2), 每个处理重复 4 次。每盆装 2 kg 尾矿砂, 添加肥料(F)的用量均为: 2.0 g (NH₄)₂SO₄ + 2.0 g KH₂PO₄。

试验于 2001 年 10 月 24 日装盆, 10 月 29 日开始播种, 每盆黑麦草的播种量为 0.8 g。2002 年 3 月 11 日收割黑麦草地上部第一茬, 并同时采集尾矿砂样品。4 月 19 日在所有的处理中每盆添加相同的肥料, 其用量均为开始用量的 1/2, 并于 5 月 20 日收割地上部第二茬, 同时采集尾矿砂样品, 并将盆中尾矿砂敲碎, 分别取出每盆黑麦草的根。尾矿砂样品室内风干后分析, 植株洗净后于 70℃ 烘干, 称重, 磨碎分析。

表 2 盆栽试验处理
Table 2 Treatments of pot experiments

处理代号	Treatment code 加入物质 ¹⁾ Materials added
CK	尾矿砂 ^①
F	尾矿砂+ F ²⁾
FM20	尾矿砂+ 1.0% 蒙脱石 ^② + F
FM50	尾矿砂+ 2.5% 蒙脱石+ F
FM100	尾矿砂+ 5.0% 蒙脱石+ F
FM150	尾矿砂+ 7.5% 蒙脱石+ F
FM200	尾矿砂+ 10% 蒙脱石+ F
FZ20	尾矿砂+ 1.0% 沸石 ^③ + F
FZ50	尾矿砂+ 2.5% 沸石+ F
FZ100	尾矿砂+ 5.0% 沸石+ F
FZ150	尾矿砂+ 7.5% 沸石+ F
FZ200	尾矿砂+ 10% 沸石+ F

1) 质量百分比 Mass percentage; 2) 每盆肥料用量为 2.0 g (NH₄)₂SO₄ + 2.0 g KH₂PO₄ Fertilizer application rate at 2.0 g (NH₄)₂SO₄ + 2.0 g KH₂PO₄ each pot; ① Mine tailings; ② Montmorillonite; ③ Zeolite

1.3 酸度对 Cu²⁺ 或 Zn²⁺ 在天然蒙脱石和沸石吸附的影响

称取 1.000 ± 0.001 g 矿物材料于 50 ml 离心管中, 加入浓度均为 150 mg L⁻¹ Cu²⁺ 或 Zn²⁺ 溶液(以 CuCl₂ 或 ZnCl₂ 形式), 另向溶液中分别加入适量 0.1 mol L⁻¹ 的 NaOH 或 HCl 溶液调节 pH 值, 使溶液的最后 pH 值呈梯度分异(在 2.0~ 8.0 之间)。溶液最终体积为 25 ml, 支持电解质 CaCl₂ 溶液的浓度为 0.05 mol L⁻¹。振荡 2 h 后, 离心, 测定上清液中的 Cu²⁺ 或 Zn²⁺ 浓度, 同时测定溶液的 pH 值。根据加入矿物材料前后溶液中 Cu²⁺ 或 Zn²⁺ 浓度的变化, 计算 Cu²⁺ 或 Zn²⁺ 在天然蒙脱石和沸石上吸附百分比 - pH 的关系图。

1.4 样品分析

土壤样品分析采用常规分析方法。其中, 土壤 pH 采用 1: 2.5 的土水比, 并用 pH 玻璃电极进行测定; 土壤重金属的有效态采用 0.005 mol L⁻¹ DTPA 提取, 植株中的重金属待测液采用 HNO₃-HClO₄ 消煮法制备, 用原子吸收分光光度计测定土壤和植株中的重金属含量。

1.5 数据处理

采用 SPSS 统计分析软件, 用 Duncan's 法进行多重比较。

2 结果与讨论

2.1 天然蒙脱石和沸石处理对黑麦草生物量的影响

表 3 显示了天然蒙脱石和沸石对黑麦草生长的影响。从第一茬情况来看, 黑麦草经过 130 d 的生长, 在纯矿砂处理(CK)的生物量最低, 其他处理之间无显著差异, 表明尾矿砂中肥料的缺乏是限制其生长的重要因素。类似的结果在我们早期的研究中也曾观察到^[6], 这主要是因为尾矿砂所包含的养分含量非常低; 而施用肥料后, 黑麦草在一个相对较长时间的生长过程中, 天然蒙脱石和沸石的加入并不

显著影响其生物量。

表3 天然蒙脱石和沸石处理对黑麦草生物量的影响

Table 3 Effects of montmorillonite and zeolite on ryegrass biomass growing in mine tailings

处理代号 Treatment code	地上部干重 Dry weight of aerial part (g)		根重 Root weight (g)
	第一茬 1st harvest	第二茬 2nd harvest	
	CK	1.34b ¹⁾	
F	27.0a	9.34ab	12.8ab
FM20	22.5a	9.76ab	7.90cd
FM50	24.7a	9.54ab	11.6abc
FM100	22.0a	9.67ab	8.91bcd
FM150	22.4a	9.04ab	8.17cd
FM200	25.5a	8.72b	6.60d
FZ20	22.2a	9.47ab	7.67cd
FZ50	24.5a	9.92ab	15.5a
FZ100	25.0a	9.20ab	8.06cd
FZ150	25.3a	9.29ab	11.7abc
FZ200	24.9a	10.2a	8.65bcd

1) 对于表格的同一列来说,字母相同表示处理间无显著性差异,字母不同表示有显著性差异($p \leq 0.05$) The same letter in the same column means no significant difference at $p \leq 0.05$

第二茬黑麦草生长时间要比第一茬短,仅为70 d,其对应的生物量也较第一茬小,但处理之间无显著性差异(除CK外)。而早期研究表明^[5],在较短生长期(28 d)时,矿物加入由于其一定的保肥作用,黑麦草生物量随矿物加入量增加而增加,说明当黑麦草生长在较长时间时,由于其根系对养分的充分吸收,差异并不显著。

对于根重来说,纯矿砂处理(CK)的根重最小,仅为 0.69 g pot^{-1} 。单纯加入肥料的处理F、蒙脱石处理FM50和沸石处理FZ50以及FZ150的根重较

大,均超过 10 g pot^{-1} ,说明矿物的加入也有一个最佳施入量的问题。若用量过高可能使矿砂造成滞水缺氧的现象,不能满足根系生长的需要,阻碍根系的正常伸展。

2.2 天然蒙脱石和沸石处理对尾矿砂pH和重金属有效态含量的影响

土壤中重金属形态决定了它的生物有效性和对生态环境的危害程度^[12, 13]。而在铜矿尾矿砂中加入一些改良剂的作用是降低重金属的水溶性、扩散性和生物有效性,从而降低它们进入植物体、微生物体和水体的能力,减轻其对生态环境的危害^[14]。因此可以通过测定尾矿砂重金属有效态含量来评价所加入物质的改良效果。

表4显示了天然蒙脱石和沸石处理对尾矿砂pH和重金属有效态含量的影响。从表中可以看出,两次采样,添加天然蒙脱石和沸石处理的有效态锌含量都有随着施入量的增加而明显降低的趋势。但第一次采样,加入蒙脱石处理尾矿砂有效态铜含量没有显著变化,而加入沸石处理尾矿砂有效态铜含量降低;而第二次采样时,蒙脱石处理(FM100和FM200)以及沸石处理(FZ150和FZ200)均显著降低了尾矿砂中铜的有效态含量。尾矿砂有效态铜锌含量降低可能是因为矿物对铜锌的强吸附作用。

第一次采样,加入肥料、蒙脱石和沸石使尾矿砂的pH值降低1个单位左右。经过黑麦草的生长以及加入相同肥料之后,第二次尾矿砂采样的pH值与第一次相比略有降低,但将尾矿砂中铜锌有效态含量与pH进行相关分析时,没有表现出好的相关性,也说明尾矿砂铜锌有效态含量变化不是由于pH变化引起的。

表4 不同处理对矿砂中重金属有效态和pH值的影响

Table 4 Concentrations of available Zn and Cu and pHs of Cu mine tailings different in treatments

处理代号 Treatment code	Zn (mg kg^{-1})		Cu (mg kg^{-1})		pH	
	第一茬 1st harvest	第二茬 2nd harvest	第一茬 1st harvest	第二茬 2nd harvest	第一茬 1st harvest	第二茬 2nd harvest
	CK	18.87b ¹⁾	26.59a	31.23a	31.04a	8.38a
F	17.75cd	22.32bcd	22.70cd	21.70cd	7.41bc	7.11b
FM20	18.36bc	22.41bc	22.36cd	21.73cd	7.21de	7.06bc
FM50	18.25bc	21.07cd	22.70cd	20.71de	7.29bcd	7.04bcd
FM100	17.17de	19.02ef	23.03c	19.93e	7.32bc	6.87ef
FM150	16.22e	18.53fg	23.24c	20.94cde	7.45b	6.99cd

续表

处理代号 Treatment code	Zn (mg kg ⁻¹)		Cu (mg kg ⁻¹)		pH	
	第一茬	第二茬	第一茬	第二茬	第一茬	第二茬
	1st harvest	2nd harvest	1st harvest	2nd harvest	1st harvest	2nd harvest
FM200	15.15f	17.41fg	22.93cd	20.48e	7.34bc	6.97cde
FZ20	20.44a	23.37b	24.48b	23.42b	7.46b	6.86f
FZ50	18.16bcd	20.92cd	22.73cd	22.11c	7.20cde	6.75g
FZ100	18.66bc	20.51de	23.50bc	20.95cde	7.28bcd	6.87ef
FZ150	16.42e	17.04g	21.61de	18.78f	7.12de	6.94def
FZ200	16.26e	16.85g	20.83e	18.05f	7.08e	6.87f

1) 对于表格的同一列来说,字母相同表示处理间无显著性差异,字母不同表示有显著性差异($p \leq 0.05$)。The same letter in the same column means no significant difference at $p \leq 0.05$

为了说明矿物对铜锌形态影响的作用机理,分别研究了两种矿物对铜锌吸附与溶液 pH 之间的关系,见图 1。由图可见,蒙脱石对 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的吸附百分比与 pH 值的关系整体上均呈 S 曲线,但吸附突跃范围不同。蒙脱石对 Cu^{2+} 吸附的突跃范围在 pH 4.0~5.0 区域,而沸石对 Cu^{2+} 吸附在 pH 5.0~5.5 之间有一个突变的区域;沸石较蒙脱石对铜吸附突跃范围的 pH 较高;对于锌来说,蒙脱石对 Zn^{2+} 的吸附突跃区域为 pH 5.0~6.0,而沸石对 Zn^{2+} 的吸附突跃范围为 pH 6.0~7.0。可见,两种矿物对铜锌离子均有较强的吸附作用,而且在矿物对尾矿砂改良过程中,尾矿砂的 pH 值也均落在矿物对铜锌发生强吸附的区域。

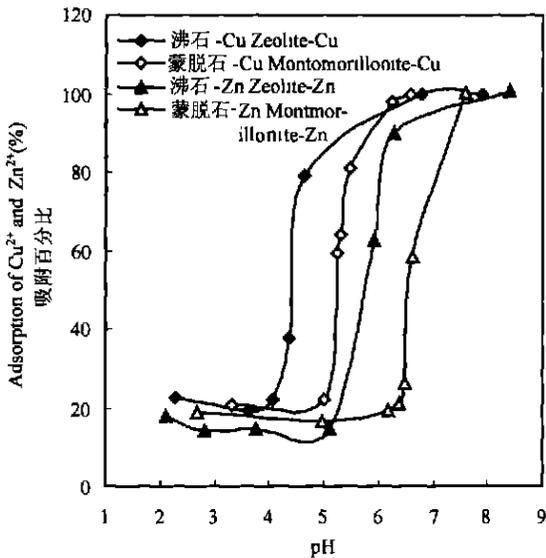


图 1 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 在蒙脱石和沸石中的吸附百分比与 pH 值关系

Fig 1 Adsorption rate of Cu^{2+} and Zn^{2+} in montmorillonite and zeolite as affected by solution pH

2.3 天然蒙脱石和沸石处理对黑麦草吸收重金属的影响

从表 5 可以看出,第一茬黑麦草地上部锌含量以纯矿砂的处理(CK)最高,而仅加入肥料的处理 F 含锌量最低。对于第一茬黑麦草地上部铜锌的吸收来说,不同含量蒙脱石处理之间无显著性差异(FM200 除外),但有随蒙脱石添加量增加而增加的趋势;而添加沸石各处理之间的黑麦草地上部含锌和含铜量均没有显著变化(FZ20 除外)。重金属吸收量的增加可能与尾矿砂 pH 在矿物作用下降低有关。对于第二茬黑麦草地上部来说,无论铜还是锌皆以纯矿砂处理的含量最高,其余处理均无差异。

纯矿砂处理黑麦草根中的铜和锌含量仍然最高。添加蒙脱石的各个处理间铜、锌含量无显著性差异;而随添加沸石量的增加黑麦草根中含锌量有显著降低的趋势,而含铜量无显著差异,说明蒙脱石和沸石之间的结构差异影响了它们的改良效果。

与第一茬黑麦草相比,第二茬黑麦草生长时间缩短,生物量比第一茬小,铜、锌的含量比第一茬高,尤其是锌元素,约为第一茬的 4 倍,这个结果值得关注。早期结果^[6]也表明,后茬在 1 个月生长期的黑麦草地上部锌含量也有约 100 mg kg^{-1} 。

黑麦草整个植株重金属含量的规律为:地下部 >> 地上部。在植株的不同部位吸收不同重金属的程度也有差别:地上部锌 > 铜;地下部锌 < 铜。由此可见,Zn 较 Cu 的迁移能力强,更容易由根部向地上部转移。

表 5 天然蒙脱石和沸石处理后黑麦草植株中重金属含量变化

Table 5 Zinc and Cu concentrations of ryegrass growing in Cu mine tailings amended by montmorillonite and zeolite

处理代号 Treatment code	Zn (mg kg ⁻¹)			Cu (mg kg ⁻¹)		
	第一茬 1st harvest	第二茬 2nd harvest	根部 Root	第一茬 1st harvest	第二茬 2nd harvest	根部 Root
CK	63.9a ¹⁾	240a	573a	9.37abc	26.0a	654a
F	27.3d	140b	204c	9.31abc	10.5b	473bc
FM20	29.3cd	143b	222c	8.57abc	10.6b	433bc
FM50	31.0bcd	147b	215c	8.60abc	9.98b	476b
FM100	33.3bcd	141b	192cde	9.11abc	10.3b	450bc
FM150	36.3bc	149b	172cde	9.06abc	11.2b	408bc
FM200	39.5b	142b	191cde	10.2a	11.8b	400bc
FZ20	39.3b	130b	317b	9.83ab	10.5b	481b
FZ50	32.0bcd	143b	201cd	7.52c	9.89b	408bc
FZ100	38.0b	158b	195cd	7.91c	10.9b	457bc
FZ150	34.7bcd	138b	122e	8.18bc	10.5b	404bc
FZ200	35.4bcd	159b	129de	8.70abc	11.7b	358c

1) 对于表格的同一列来说,字母相同表示处理间无显著性差异,字母不同表示有显著性差异($p \leq 0.05$)。The same letter in the same column means no significant difference at $p \leq 0.05$

3 小 结

因为黑麦草在较长生长期对尾矿砂中养分的耗竭作用,蒙脱石和沸石的施入对黑麦草地上部生长没有显著影响,但因为其对矿砂性质的改变而影响了其根的生物量。矿砂由于严重缺肥,所以肥料是影响黑麦草生长的严重限制因子,施用肥料对于尾矿砂植被重建必不可少。

Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 在蒙脱石和沸石中的吸附量均较大,特别是在高 pH 值范围,这影响了尾矿砂中铜锌的有效态。蒙脱石和沸石的加入降低了黑麦草根中 Cu、Zn 的浓度,但地上部变化较少且有增加的趋势,可能与尾矿砂 pH 值降低有关。

参 考 文 献

- [1] 黄铭洪, 骆永明. 矿区土地修复与生态恢复. 土壤学报, 2003, 40(2): 161~169. Wong M H, Luo Y M. Land remediation and ecological restoration of mined land (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 161~169
- [2] Ye Z H, Wong J W C, Wong M H, et al. Lime and pig manure as ameliorants for revegetating lead/zinc mine tailings: A greenhouse study. Bioresource Technology, 1999, 69: 35~43
- [3] 周东美, 王玉军, 郝秀珍, 等. 铜矿区重金属污染分异规律初步研究. 农业环境保护, 2002, 21(3): 225~227. Zhou D M, Wang Y J, Hao X Z, et al. Primary study of distribution of heavy metals in copper mines (In Chinese). Agro-environmental Protection, 2002, 21(3): 225~227
- [4] 周东美, 郝秀珍, 薛艳, 等. 污染土壤修复技术的研究进展. 生态环境, 2004, 13(2): 234~242. Zhou D M, Hao X Z, Xue Y, et al. Advances in remediation technologies of contaminated soils (In Chinese). Ecology and Environment, 2004, 13(2): 234~242
- [5] 郝秀珍, 周东美, 王玉军, 等. 泥炭和化学肥料处理对黑麦草在铜矿尾矿砂上生长影响的研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 645~648. Hao X Z, Zhou D M, Wang Y J, et al. Study of ryegrass growth in copper mine tailing treated with peat and chemical fertilizer (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 645~648
- [6] Hao X Z, Zhou D M, Wang Y J, et al. Amendment of copper mine tailing and its effect on metal availability to ryegrass. Pedosphere, 2003, 13(4): 299~308
- [7] Hao X Z, Zhou D M, Si Y B. Revegetation of copper mine tailings with ryegrass and willow. Pedosphere, 2004, 14(3): 283~288
- [8] Zorpas A A, Constantinides T, Vlyssides A G, et al. Heavy metal uptake by natural zeolite and metals partitioning in sewage sludge compost. Bioresource Technology, 2004, 72: 113~119
- [9] 李增新, 张启军. 天然沸石及其在农业中的应用. 农业环境保护, 1995, 14(1): 41~42. Li Z X, Zhang Q J. Natural zeolite and its application in agriculture (In Chinese). Agro-environmental Protection, 1995, 14(1): 41~42
- [10] 李红阳, 牛树银, 王宝德. 矿物材料与环境污染治理——以粘土矿物和发沸石为例. 北京地质, 2001, 13(4): 8~12. Li H Y, Niu S Y, Wang B D. Mineral material and its applications to environmental pollution disposal: The case of clay minerals and zeolite (In Chinese). Beijing Geology, 2001, 13(4): 8~12

- [11] 郝秀珍, 周东美. 沸石作为土壤改良剂的研究进展. 土壤, 2003, 35(2): 103~ 106. Hao X Z, Zhou D M. Zeolite application as soil amendment (In Chinese). Soils, 2003, 35(2): 103~ 106
- [12] Xian X. Effects of chemical forma of cadmium, zinc and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants. Plant and Soil, 1989, 113(2): 257~ 264
- [13] Sroerbeck D R, Hein A. The nickel uptake from different soils and its prediction by chemical extractants. Water, Air and Soil Pollution, 1991, 57/58(1/4): 861~ 871
- [14] 李永涛, 吴启堂. 土壤污染治理方法研究. 农业环境保护, 1997, 16(3): 118~ 122. Li Y T, Wu Q T. Study of remedial methods for soil contamination (In Chinese). Agror environmental Protection, 1997, 16(3): 118~ 122

RYEGRASS GROWTH IN Cu MINE TAILINGS AMENDED WITH NATURAL MONTMORILLONITE AND ZEOLITE

Hao Xiuzhen Zhou Dongmei[†] Xue Yan Chen Huaiman

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract In metal mining areas, mine tailings, as an accessory product, are usually stored in a big tailings dump, destroying original vegetations and seriously damaging ecological systems. To restore vegetations over metal mine tailings is very difficult because they are often high in heavy metal concentration, low in nutrient content and small in water retention capacity. Pot experiments were conducted to investigate effects of application of natural montmorillonite and zeolite as amendments to mine tailings on ryegrass growth and uptake of Cu and Zn in this paper. The results indicate that the biomass of the ground part of ryegrass did not change much but its root weight changed with the application of the two days, respectively. Chemical fertilizer was extremely necessary for ryegrass growth in the mine tailings. Application of montmorillonite decreased available Zn in the mine tailings, but did not affect much available Cu; application of zeolite significantly decreased both available Cu and Zn in the mine tailings. The pHs of the mine tailings decreased with the application, but did not correlate with the change in available Cu and Zn in the mine tailings. Copper and Zn concentrations in ryegrass root decreased with the application of the clays. However, application of montmorillonite increased Cu uptake but did not affect Zn uptake of the ground part of ryegrass in the first and the second harvest. Application of zeolite did not change the Cu and Zn concentrations in the ground part of ryegrass, either.

Key words Mine tailings; Ryegrass; Heavy metal; Montmorillonite; Zeolite