

聚丙烯酸盐对重金属污染矿区本地植株生长和土壤性质的影响

曲贵伟¹, Amarilis de Varennes², 宋 林¹, 黄胜君¹

(1.辽东学院, 辽宁 丹东 118003; 2. Instituto Superior de Agronomia, Technical University of Lisbon(TULisbon), Lisboa, Portugal, 1349-017)

摘 要:采用半野外试验研究了聚丙烯酸盐对自然条件下矿区重金属污染土壤性质和矿区本地植株生长的影响。研究表明,0.4%的聚丙烯酸盐明显促进了4种污染矿区本地植物的生长,总生物量在两轮生长中分别是对照处理的1.8倍和2.3倍。不同植株对不同生长季节反映不同,其中 *Briza maxima* (*B. maxima*) 在春夏季节生长好于秋冬季节,但生物量不高,无法提供大面积覆盖。而 *Chaetopogon fasciculatus* (*C. fasciculatus*) 和 *Spergularia purpurea* (*S. purpurea*) 因其在秋冬季节生长明显好于春夏季节,尽管在春夏季节由于干旱而大量死亡,仍然可以大面积覆盖土壤,所以可尝试用于矿区土壤的植被固定。聚丙烯酸盐的应用显著改善了土壤脱氢酶、磷酸酶、蔗糖苷酶、蛋白酶、脲酶以及纤维素酶的活性。研究同时发现,不同种类植株的生长与土壤 pH 及土壤酶活性存在显著的相关关系,其中,土壤 pH 和 *C. fasciculatus* 的生长与土壤中蛋白酶和纤维素酶的活性正相关($r>0.60$),而 *Briza maxima* 的生长与蔗糖酶的活性正相关($r=0.82$)。

关键词:聚丙烯酸盐;植物固定;重金属;矿区土壤;本地植物

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)03-0504-06

The Effect of Polyacrylate Polymers on the Growth of Native Plant from Mine Soil Contaminated with Heavy Metal and Soil Quality

QU Gui-wei¹, Amarilis de Varennes², SONG Lin¹, HUANG Sheng-jun¹

(1.Eastern Liaoning University, Dandong 118003, China; 2. Instituto Superior de Agronomia, Technical University of Lisbon(TULisbon), Lisboa, Portugal, 1349-017)

Abstract: The effects of 0.4% polyacrylate polymers on native plants from mine and quality of mine soil contaminated with heavy metal were studied by cylinder experiment. The results showed that the growth of four plant species were enhanced in the soil amended with 0.4% polymers and the total biomass of plant was 1.8 and 2.3 times that of control during two cycles. The growth of different plant species was different in the two cycles, *Briza maxima* (*B. maxima*) was greater in the spring-summer than autumn-winter, but its smaller biomass was not satisfied to supply sufficient covering on the soil. In spite of died in the spring-summer, *Chaetopogon fasciculatus* (*C. fasciculatus*) and *Spergularia purpurea* (*S. purpurea*) could be used in the remediation of this mine soil because of their great biomass in the autumn-winter. The soil enzymatic activities including dehydrogenase, acid-phosphatase, β -glucosidase, protease, urease and cellulose were improved in the soil amended with 0.4% polymers, which was 3.4, 2.2~2.5, 3.1~2.5, 3.6~3.0, 14.9~2.7 and 1.8~2.3 times that of control respectively. We also found that there was significant correlation between the growth of different plant species and soil pH and soil enzymatic activities, significant correlations between soil pH, *C. fasciculatus*, soil protease and cellulose ($r>0.60$) and between *B. maxima* and β -glucosidase ($r=0.82$).

Keywords: polyacrylate polymers; phytostabilisation; heavy metal; mine soil; native plants

土壤重金属污染由于对环境和生物的严重危害已经引起全球关注,采矿活动是人为造成土壤重金属

污染的主要原因。在废弃矿区周围的尾矿堆积中含有大量的容易流失或淋失的重金属,从而对周边环境产生严重影响^[1]。

收稿日期:2011-08-09

基金项目:辽东学院科研基金

作者简介:曲贵伟(1970—),男,辽宁丹东人,博士,主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:guiweiq@163.com

葡萄牙 S.Domingo 矿区位于伊伯利亚半岛黄铁矿带,处于葡萄牙与西班牙南部边境,是葡萄牙最古老的金矿区,于19世纪60年代因资源耗竭而停产,

废弃后形成近 200 hm² 的尾矿堆积,其中 Cu、Pb、Zn、As 等含量严重超标。

土壤重金属污染会对植物和土壤微生物产生毒害,因此通过使用各种修复物降低土壤中重金属的有效性势在必行。常见的修复物有石灰^[2]、富含有机质的物质^[3]以及不溶性聚丙烯酸盐^[4-6]等。

聚丙烯酸盐由丙烯酸聚合而成,其结构链上规律分布着羧基,在应用的产品中常用 K⁺、Na⁺、NH₄⁺ 等离子来中和。大分子量的聚丙烯酸盐可以吸附其自身重量几百倍的水分。它们主要应用在尿不湿、卫生纸等产品中,据估计每年在这些产品中消耗 130 Gg 的聚丙烯酸盐^[7]。与其他修复物相比,聚丙烯酸盐具有以下几个方面的优势:①高分子聚丙烯酸盐具有较强的吸水能力,可提高土壤的保水和供水性能^[5,8],对于保水能力较差的尾矿堆积体的植被的恢复有十分重要的意义;②在溶液培养试验中,聚丙烯酸盐对多种重金属具有较强的吸附作用,吸附强度与 EDTA 相似,适用于重金属复合污染的土壤^[9];③聚丙烯酸盐上携带的阳离子如 NH₄⁺、K⁺等可提高土壤中养分容量及有效性^[10];④聚丙烯酸盐在土壤中相对稳定,几乎不被微生物分解^[11],就目前的研究来看,其在土壤中至少可以保留 2 a 以上(未发表的数据)。

用于评价土壤质量的指标有很多^[12-14]。本文主要衡量聚丙烯酸盐对植株生物量、植株体内和土壤溶液中重金属含量以及土壤水解酶的活性等方面的作用来评价聚丙烯酸盐的修复作用。土壤脱氢酶是用于衡量土壤微生物整体活性的一种胞内酶^[15]。纤维素酶主要参与土壤中纤维素的分解;蔗糖酶主要参与糖的释放,为微生物生活提供能源;蛋白酶和脲酶主要参与无机氮的释放;磷酸酶则主要参与土壤中无机 P 的释放。这些酶通常用于评价土壤质量^[16],它们的活性可以综合反映由于土壤管理措施所带来的累积变化。

之前的盆栽试验研究表明,在严重重金属污染的矿区土壤上应用聚丙烯酸盐可以促进果园草生长,改善土壤质量(降低土壤中重金属含量、增加土壤微生物数量和改善酶活性)^[5-6],其中 0.4% 聚丙烯酸盐效果最为突出。但这个盆栽试验所用土壤经过 0.2 mm 筛,与含有大量的石砾实际矿区土壤有明显差异,同时试验温度和水分都得到明显的控制,与矿区实际情况差异很大。因此,聚丙烯酸盐对自然条件下矿区土壤的修复作用还需要进一步的研究和验证。此外,对于矿区土壤的修复应以恢复地表植被、控制表土流失,以减少对周边环境的次生污染,由于

外来植株一般较难适应于矿区污染(如在盆栽试验中,果园草几乎不生长),而未经修复的矿区本地的植物生长矮小,生物量较低,尚无法提供大面积的覆盖。同时对于适用于该矿区土壤修复的植物筛选方面的研究还是空白。

在本试验中,采用半野外试验研究聚丙烯酸盐在自然条件下对矿区土壤的修复作用及对几种矿区植物生长的影响,其中包括:研究自然条件下,聚丙烯酸盐对不同植物生物量影响,为筛选适合该土壤修复的植物提供理论依据;通过衡量土壤酶的活性来评价聚丙烯酸盐对矿区原状土壤质量的修复作用。

1 材料和方法

1.1 供试聚丙烯酸盐

分子量 4 千万,分别为聚丙烯酸铵(含 N 100 mg·kg⁻¹)和聚丙烯酸钾(含 K 210 mg·kg⁻¹),各占 50%。

1.2 供试土壤

采自 S.Domingos 矿区的砂质土壤。为酸性土壤,有机质和养分贫乏且含有大量的 Pb,属于严重 Pb 污染土壤,土壤基本性质见表 1。与之前的盆栽试验不同的是,该土壤中 Cu 和 Zn 的含量均在正常范围。

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 The characteristics of soils used in the experiment

指标	含量
土壤 pH(in water, 1:2.5)	4.10
有机质(Organic matter)/%	0.19
全氮(Total N)/%	0.03
NO ₃ -N/mg·kg ⁻¹	1.35
NH ₄ -N/mg·kg ⁻¹	2.01
全磷(Total P)/%	0.044
全钾(Total K)/%	0.31
全铜(Total Cu)/mg·kg ⁻¹	91
全锌(Total Zn)/mg·kg ⁻¹	47
全铅(Total Pb)/%	0.62
全镉(Total Cd)/mg·kg ⁻¹	<0.3

1.3 供试植物

试验选用 4 种植株的种子,其中 *Briza maxima* L. 和 *Chaetopogon fasciculatus* (Link) Hayek 为一年生禾本科草本植物,而 *Spergularia purpurea* (Persoon) G. Don fil. 是一年生或多年生双子叶石竹科植物, *Andryala integrifolia* L. 则是一年生到多年生紫菀科植物。它们常生长于地中海地区贫瘠的土壤上,而且 *Briza maxima* L. 有时也可以作为观赏植物,而 *Spergularia pur-*

purea (Persoon) G. Don fil. 在摩洛哥还是一种药材。这4种植株常见于矿区污染土壤。

1.4 试验设计

试验采用两个处理,分别是对照处理和0.4%聚丙烯酸盐处理,3次重复。试验设置在网室中,6个柱状容器(直径600 mm,高400 mm)中填装65 kg混合或未混合聚丙烯酸盐的矿区原状土壤(约22 cm)。所有处理的土壤均施入P(过磷酸钙)125 mg·kg⁻¹和Mg(硫酸镁)25 mg·kg⁻¹作底肥。对照处理补充与聚丙烯酸盐中数量一致的N(硝酸铵)和K(硫酸钾)。每种植株50颗共计200颗种子于2007年4月27日混合播种于土壤中,4个月后收获。于2007年10月27日第2次播种,4个月后收获。每次收获的植株要用去离子水清洗,在65℃下烘干称重。每次收获后,采集土壤样本并过2 mm筛,样本分成4份,分别用于测定土壤基本性质和土壤酶活性。为尽量模拟矿区实际水分情况,在整个试验过程中,除了在春夏季节(主要7—8月,气温较高),当连续1周没有降雨时,为防止植株死亡进行必要的挽救性灌水。

1.5 样本分析

植物样本经烘干后,采用微波消煮,消煮液用于植株体内重金属含量分析。所有土壤样本过2 mm筛,新鲜土壤用于脱氢酶的测定(根据Tabatabai所述方法^[17])。风干土壤用于测定土壤pH(1:2.5土/水)和土壤有效Cd[应用50 mL的0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂振荡浸提2 h,过滤后使用原子吸收仪测定(Unicam Solaar M)]。其他的土壤样本冷冻保存用于土壤酶活性的测定,其中纤维素酶活性根据Hope和Burns所述方法^[18],酸性磷酸酶活性和蔗糖酶活性根据文献[19–20]所述方法,脲酶活性根据Kandeler和Gerber所述方法^[21],蛋白酶活性根据Ladd和Butler所述方法^[22]。

1.6 数据分析

所有数据的差异采用通用线性模式分析,平均值

显著性比较使用Newman-Keuls在 $P \leq 0.05$ 下检验。

2 结果与分析

2.1 聚丙烯酸盐对植株生长的影响

在两轮的培养过程中,植株的生长随着聚丙烯酸盐的应用得到显著改善(表2)。总生物量分别比没有聚丙烯酸盐的处理高1.8(春夏季节)倍和2.1(秋冬季节)倍。*Andryala integrifolia*在春夏季节的试验中没有萌芽,且在秋冬季节的生物量也很低。*Briza maxima*在春夏季节的聚丙烯酸盐处理中生长较好,但在秋冬季节却生长很差。而*Spergularia purpurea*在聚丙烯酸盐处理的春夏季节的生长与没有聚丙烯酸盐的处理相差不大,但在秋冬季节的生长却显著提高。*C. fasciculatus*同样在秋冬季节的生长好于春夏季节,且始终在聚丙烯酸盐的处理中表现较好。

2.2 聚丙烯酸盐对土壤性质的影响

聚丙烯酸盐的应用显著提高了土壤pH,在春夏季节为5.6,而在秋冬季节为5.9(数据没有列表显示)。这个结果与之前的盆栽试验的结果类似。

本试验结果显示,土壤脲酶、纤维素酶、磷酸酶和蔗糖酶的活性因聚丙烯酸盐的应用而得到改善,分别是对照处理的3.4、2.2~2.5、3.1~2.5、3.6~3.0、14.9~2.7倍和1.8~2.3倍(图1)。在连续两轮的试验中,对照土壤中磷酸酶、纤维素和蔗糖酶的活性差别不大。而在聚丙烯酸盐修复的土壤中,第2轮土壤脲酶和蔗糖酶的活性比第1轮明显下降,而纤维素酶和蛋白酶则相反。脱氢酶的活性在第1阶段中两个处理之间的差异不明显,而在第2阶段,尽管与第1阶段相比有所下降,聚丙烯酸盐修复的土壤比没有修复的土壤显著增高。

土壤pH和*C. fasciculatus*的生长与土壤中蛋白酶和纤维素酶的活性正相关($r > 0.60$),而*B. maxima*的生长与蔗糖酶的活性正相关($r = 0.82$)。

2.3 主成分分析

主成分分析表明,本试验中80%的参数变异可以

表2 不同处理对不同污染土壤当地植株生物量的影响(g·cylinder⁻¹)

Table 2 The effects of different treatments on shoot biomass of native species(g·cylinder⁻¹)

轮数 Cycle	聚丙烯酸盐 Polymer	<i>Andryala integrifolia</i>	<i>Briza maxima</i>	<i>Chaeropogon fasciculatus</i>	<i>Spergularia purpurea</i>	Total biomass
1	-	nd	1.6±0.5b	1.4±0.2c	11.6±1.0b	14.6±1.4d
1	+	nd	12.7±1.9a	6.0±0.9b	7.9±1.9b	26.6±3.2b
2	-	0.7±0.2b	0.2±0.1c	7.9±1.1b	11.4±2.7b	20.2±4.6c
2	+	1.1±0.2a	0.7±0.02bc	25.3±7.7a	20.5±4.0a	47.6±3.7a

注:表中每列平均值后字母相同的表示经过Newman-Keuls在 $P < 0.05$ 下检验不显著。

Note: Values in a column followed by the same letter are not significantly different as estimated by Newman-Keuls test at $P < 0.05$.

用两个主要成分解释。没有聚丙烯酸盐的处理各重复均十分接近,处于第1和第2主成分的负值区。而聚丙烯酸盐的处理在春夏季节结果均处于第1主成分的正区,而秋冬季节则处于第2主成分的正区(图2)。土壤脱氢酶的活性在两个主成分轴均载荷很小,而其他参数分别在两个主成分上有较高的载荷(表3)。

3 讨论

众所周知,在特定污染区域上选择适当的修复方法是不容易的。在矿区尾矿上形成的土壤上,污染表土的水土流失和风蚀,容易对周边环境形成潜在的威胁,因此建立植被覆盖是十分必要的。之前的试验均是在温室进行的盆栽试验,选用的植株主要是对污染土壤反应比较敏感的果园草和黑麦草,其生长快,对修复的效果反应也很明显。而在本试验中采用的植株

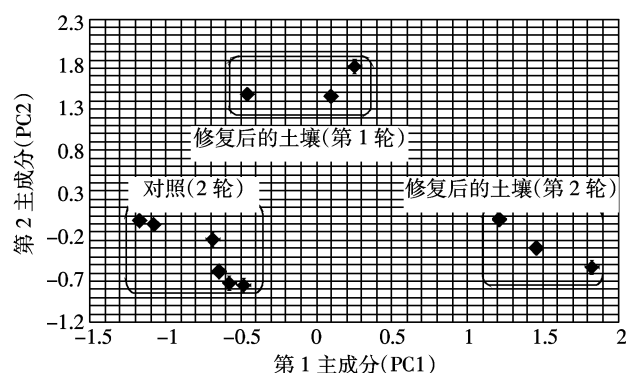


图2 主成分分析图

Figure 2 Principal Component Analysis

选自重金属污染矿区,在未修复的土壤上生物量较低,且对当地的污染环境和气候条件具有一定的耐性和适应性。如果聚丙烯酸盐可以改善他们在污染土壤上的生长,对于改善当地土壤植被覆盖和防止表土流

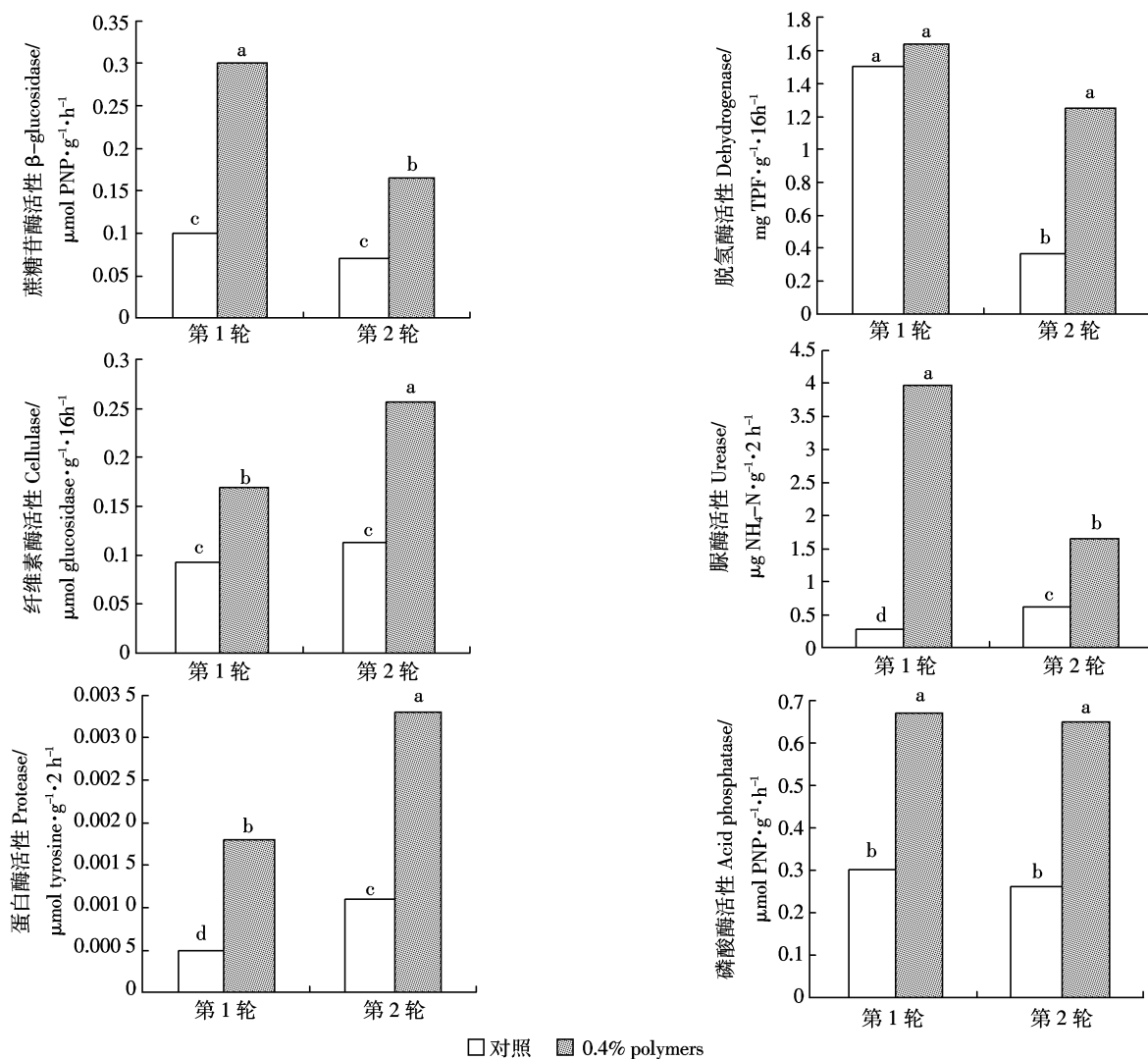


图1 不同处理对土壤酶活性的影响

Figure 1 The effect of different treatments on soil enzymatic activities

表 3 供试参数在第 1 和第 2 主成分上的载荷

Table 3 The loadings on the PC1 and PC2

参数 Parameter	第 1 主成分 PC1	第 2 主成分 PC2
土壤 pH(soil pH)	0.822*	0.512
脱氢酶(Dehydrogenase)	-0.086	0.564
脲酶(Urease)	0.209	0.844*
蛋白酶(Protease)	0.914*	0.213
磷酸酶(Phosphatase)	0.682	0.719*
纤维素酶(Cellulase)	0.914*	0.271
蔗糖酶(β -glucosidase)	0.180	0.970*
<i>Briza maxima</i>	-0.055	0.799*
<i>Chaetopogon fasciculatus</i>	0.902*	-0.203
<i>Spergularia purpurea</i>	0.738*	-0.332

注:* 表示相关性显著(相关系数>0.7)。

Note:Correlations marked with * are significant at correlation coefficient>0.7.

失具有积极意义。已有研究表明使用当地植株可以固定 Pb 和 Zn 尾矿^[23]。

从供试的 4 种植株的生长状况来看,在聚丙烯酸盐修复的土壤上,*S. purpurea* 和 *C. fasciculatus* 在降雨比较集中,土壤淋失比较严重的秋冬季节生物量显著提高,因此比其他两种植株更适合用于该污染土壤的表土固定。尽管它们可能在夏季死亡,但它们已经为表土提供了近 8 个月的覆盖,已经可以满足对表土固定的要求,而且在矿区土壤多年生植被正在发育和生长的过程中,选择能够快速生长的一年生植物无疑是改善土壤覆盖的良好方法。

土壤 pH 的提高主要是因为聚丙烯酸盐在膨胀吸水的过程中,自身所携带的离子(NH_4^+ 和 K^+)与土壤中的酸性离子相互交换的结果^[5]。

研究表明,大多数土壤酶在重金属含量高的情况下会受到明显抑制^[24-26]。

土壤中对植物和微生物毒害最大的是土壤溶液中的重金属含量,之前的研究表明,聚丙烯酸盐可以显著降低土壤中水溶性重金属的含量,从而显著提高了土壤微生物数量和活性并改善了植株生长^[4-5],此外,在此酸性矿区砂质土壤上,土壤 pH 的提高和土壤水分含量的增加^[5],为植物、土壤微生物和酶创造了良好的生存环境,而植物生长的改善,使根系分泌物增加,为土壤微生物和酶提供更多的碳源,因此土壤中各种酶的活性均得到明显提高。

聚丙烯酸盐对土壤中各个参数的作用可以用主成分分析来加以说明。未修复的对照处理始终处于 PC1 和 PC2 的负值区,这意味着植株生长和土壤酶活性均较差。与之相反,聚丙烯酸盐修复的处理的第 1

轮和第 2 轮的结果分别位于图的上端和右端,这可能是因为两个不同时间段里的温度、土壤 pH 以及不同植株群落的差异造成的。0.4%水平的聚丙烯酸盐对土壤 pH 产生了显著影响,在第 2 轮结束后,土壤 pH 几乎增加了 1 个单位。土壤 pH 与土壤蛋白酶和纤维素酶活性显著正相关,且第 2 轮的活性明显比第 1 轮活性高。Perez-de Mora 等研究表明重金属污染土壤应用 sugarbeet lime 后,土壤 pH 的提高增强了土壤脱氢酶、蔗糖酶和芳香基硫酸酯酶的活性^[12]。

C. fasciculatus 的生长与土壤 pH 以及蛋白酶和纤维素酶的活性正相关(r 分别为 0.61、0.74、0.71),表明这个生物量最高的植株对两种酶活性的作用。*B. maxima* 的生长与土壤磷酸酶的活性正相关,其在第 2 轮生长中生物量急剧下降也影响了磷酸酶的活性。总之,聚丙烯酸盐对土壤酶活性的改善应该与其对土壤 pH 的提高和植株组成的变化密切相关。

Rosario 等提出在矿区尾矿上,植物覆盖是导致土壤微生物群落发生变化的主要因素^[27]。在本试验中,采用土壤脱氢酶活性来评价土壤微生物整体活性,结果表明不同处理在第 1 轮差异不显著,但在第 2 轮差异显著,而且聚丙烯酸盐的处理第 1 轮和第 2 轮差异不显著,这个结果与其他土壤酶活性的表现不一样,这表明不同阶段不同植株种类生长的变化对土壤微生物群落产生一定的影响,值得深入研究。

本试验中应用的聚丙烯酸盐的价格约为 2 欧元· kg^{-1} ,如果使用水平为 0.4%,每吨土壤约需要 8 欧元,这种价格虽然比工程修复方法低很多(每吨约 40 欧元)^[28],但在田间实际应用上还应考虑如何进一步降低成本,例如,尿不湿中含有大量的聚丙烯酸盐,回收和利用废弃尿不湿中的聚丙烯酸盐可以极大地降低土壤的修复成本。此外,应用城市垃圾修复矿区土壤也是一个十分普遍的方法,但城市垃圾中常含有大量的重金属,容易随着有机质的分解而释放出来^[29]。因此,尝试研究聚丙烯酸盐和城市垃圾的混合使用,不仅可以降低修复成本,而且可以利用聚丙烯酸盐的高吸附性来增加城市垃圾中重金属的稳定性。

4 结论

通过半野外试验研究表明,聚丙烯酸盐的应用显著改善了矿区本地植株的生长,其中 *Chaetopogon fasciculatus* 与 *Spergularia purpurea* 在秋冬季节生长良好,尽管会在春夏季节由于高温和干旱而死亡,但仍然为矿区土壤提供了近 8 个月的覆盖,因此可以用于

矿区土壤修复。同时,聚丙烯酸盐的应用显著改善了矿区土壤的酶活性,这可能与土壤中重金属含量的下降^[5-6]、土壤水分含量的提高^[5]、pH 的提高及植株生长得到改善密切相关。

参考文献:

- [1] Mlayah A, Ferreira da Silva E, Rocha F, et al. The Oued Mellègue: Mining activity, stream sediments and dispersion of base metals in natural environments, North-western Tunisia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 102: 27–36.
- [2] Geebelen W, et al. Selected bioavailability assays to test the efficacy of amendment-induced immobilization of lead in soil[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249: 217–228.
- [3] Farfel M R, et al. Biosolids compost amendment for reducing soil lead hazards: a pilot study of organic amendment and grass seeding in urban yards[J]. *The Science of the Total Environment*, 2005, 340: 81–95.
- [4] 曲贵伟, 依艳丽, 郭德金. 聚丙烯酸盐对外源复合重金属污染的土壤修复效果的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 20: 5331–5333, 5335. QU Gui-wei, YI Yan-li, GUO De-jin. Study on remediation effect of ammonium polyacrylate on soil polluted by exogenous compound heavy metals[J]. *Journal of Anhui Agro Sci*, 2007, 20: 5331–5333, 5335.
- [5] 曲贵伟, Amarilis de Varennes, 依艳丽. 聚丙烯酸盐对长期重金属污染的矿区土壤的修复研究: I 对土壤保水能力、果园草生长和土壤 pH 以及土壤水溶性重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1592–1598. QU Gui-wei, Amarilis de Varennes, YI Yan-li. Effect of insoluble polyacrylate polymers on plant growth and soil quality in a long term heavy metal contaminated mine soil: I. Water retention capacity, plant growth, soil pH and water extractable heavy metal[J]. *Journal of Agro-Environment Sci*, 2008, 27(4): 1592–1598.
- [6] 曲贵伟, Amarilis de Varennes, 依艳丽. 聚丙烯酸盐对长期重金属污染的矿区土壤的修复研究(II): 对土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 653–657. QU Gui-wei, Amarilis de Varennes, YI Yan-li. Effect of insoluble polyacrylate polymers on plant growth and soil quality in a long term heavy metal contaminated mine soil: II. The number of microbial and soil enzymatic activity [J]. *Journal of Agro-Environment Sci*, 2009, 28(4): 653–657.
- [7] Martin E. Environmental impact studies of the disposal of polyacrylate polymers used in consumer products[J]. *Sci Total Environ*, 1996, 19: 225–234.
- [8] de Varennes A, Torres M O. Soil remediation with insoluble polyacrylate polymers: An review[J]. *Revista de Ciências Agrárias*, 2000, 23(2): 13–22.
- [9] 曲贵伟, 依艳丽. 聚丙烯酸盐对重金属离子的吸附效应及在土壤修复上的应用[J]. 安徽农业科学, 2006, 20: 6211–6212, 6215. QU Gui-wei, YI Yan-li. Effect of polyacrylate polymers on the absorption of heavy metal and remediation of artificially polluted soil with cadmium. CHN[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2006, 20: 6211–6212, 6215.
- [10] 孙富强, 崔英德. 高吸水性树脂保肥作用的研究[J]. 化工技术开, 2004, 33(6): 12–14. SUN F Q, CUI Y D. Study on fertilizer retention of super absorbent resin[J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2004, 33(6): 12–14.
- [11] Cameron M D, Aust S D. Degradation of chemicals by reactive radicals produced by cellobiose dehydrogenase from *Phanerochaete chrysosporium*[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1999, 367: 115–121.
- [12] Perez-de Mora A P, et al. Changes in enzyme activities and microbial biomass after “in situ” remediation of a heavy metal-contaminated soil [J]. *Appl Soil Ecol*, 2005, 28: 125–137.
- [13] de Varennes A, Queda C. Application of an insoluble polyacrylate polymer to copper-contaminated soil enhances plant growth and soil quality [J]. *Soil Use and Management*, 2005, 21: 410–414.
- [14] Hernández-Allica J, et al. Assessment of the efficiency of a metal phytoextraction process with biological indicators of soil health[J]. *Plant Soil*, 2006, 281: 147–158.
- [15] Nannipieri P, et al. Microbial diversity and soil functions[J]. *Eur J Soil Sci*, 2003, 54: 655–670.
- [16] Gil-Sotres F, et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 877–887.
- [17] Tabatabai M A. Soil enzymes [M]//Mickelson S H, Bigham J M. Methods of Soil Analysis, Part 2, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 1994: 775–833.
- [18] Hope C F A, Burns R G. Activity, origins and location of cellulase in a silt loam soil[J]. *Biol Fert Soils*, 1987, 5: 164–170.
- [19] Eivazi F, Tabatabai M A. Phosphatases in soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 1977, 9: 167–172.
- [20] Eivazi F, Tabatabai M A. Glucosidases and galactosidases in soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 1988, 20: 601–606.
- [21] Kandeler E, Gerber H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium [J]. *Biol Fert Soils*, 1988, 6: 68–72.
- [22] Ladd J N, Butler J H A. Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates[J]. *Soil Biol Biochem*, 1972, 4: 19–30.
- [23] Mendez M O, et al. Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: Growth, metal accumulation, and microbial community changes[J]. *J Environ Qual*, 2007, 36: 245–253.
- [24] Kandeler E, et al. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities[J]. *Biol Fert Soils*, 1997, 23: 299–306.
- [25] Huang Q, Shindo H. Effects of copper on the activity and kinetics of free and immobilized acid phosphatase[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32: 1885–1892.
- [26] Belén-Hinojosa M, et al. Microbiological rates and enzyme activities as indicators of functionality in soils affected by the Aznalcollar toxic spill [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, 36: 1637–1644.
- [27] Rosario K, et al. Bacterial community changes during plant establishment at the San Pedro River Mine tailings site[J]. *J Environ Qual*, 2007, 36: 1249–1259.
- [28] Cunningham S D, Ow D W. Promises and prospects of phytoremediation[J]. *Plant Physiol*, 1996, 110: 715–719.
- [29] Clemente R, et al. Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphide contamination following the mine spillage at Aznalcollar (Spain)[J]. *Bioletradiol*, 2003, 14: 199–205.