

尿不湿中高吸水性聚合物对矿区土壤的修复及紫花漆姑草(*Spergularia purpurea*)生长的影响

曲贵伟¹, A D Varennes²

(1.辽东学院农业学院, 辽宁 丹东 118003; 2.里斯本技术大学农业学院, 葡萄牙 里斯本 1349-017)

摘要:采用半野外试验研究了尿不湿中高吸水性聚合物对重金属污染矿区土壤的修复作用以及对当地植株生长的影响。试验设置4个处理,分别是对照(CK),粉碎的废弃尿不湿(SD)、从尿不湿中分离出来的高吸水性聚合物(DP)以及纯聚丙烯酸盐(PC)。研究结果显示,尿不湿中高吸水性聚合物处理的土壤上植株覆盖度显著提高,56 d后就完全覆盖土壤表面,明显优于其他处理。该处理下的植株单株和累积生物量也显著增加,分别比对照提高了约2倍和4倍,而且植株体内重金属含量也明显下降。同时,与对照相比,尿不湿中高吸水性聚合物的应用使重金属污染矿区土壤的性质得到显著改善,主要表现在:明显提高了酸性土壤pH,增加了土壤水解酶的活性以及显著改善了土壤脱氢酶(DHA)和土壤基础呼吸,使微生物总体活性得到显著改善。尽管使用粉碎的尿不湿处理的各项结果明显好于对照,但其效果明显低于使用尿不湿中高吸水性聚合物和纯聚丙烯酸盐处理,这可能是由于粉碎的尿不湿中含有大量的塑料和纤维成分造成的。总体来看,使用尿不湿中高吸水性聚合物的效果与纯聚丙烯酸盐处理相似,这表明,回收的尿不湿中高吸水性聚合物可以应用于重金属污染土壤的修复。

关键词:尿不湿;高吸水性聚合物;矿区土壤;当地植株

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)07-1348-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.07.010

Effect of Hydrophilic Polymers from Diapers on Remediation of Mine Soil Contaminated with Heavy Metals and Growth of Native Plant(*Spergularia purpurea*)

QU Gui-wei¹, A D Varennes²

(1.Agricultural College of Eastern Liaoning University, Dandong City Liaoning Province, 118003; 2.Instituto Superior de Agronomia of Technical University Lisboa, 1349-017)

Abstract: A cylinder experiment was carried out to investigate the effect of hydrophilic polymers from diapers on remediation of mine soil contaminated with heavy metals and growth of local plant (*Spergularia purpurea*). Four treatments were designed as control (CK), hydrophilic polymers from diapers (DP), artificial polyacrylate polymer (PC) and Shredded diapers (SD). The results showed that using DP enhanced greatly soil cover by plant and covered all soil surface after 56 days, and was faster than other two amended treatments. As compared with CK, single and accumulated plant biomass in the amended soils increased remarkably, about 3 and 5 times that of CK, and the concentrations of metals in shoot significantly reduced about 40%~60%. The qualities of contaminated mine soil were improved significantly in the treatment with DP if compared with CK as consideration of leveled soil pH (from 4.7 to 6.6), enhanced soil hydrolytic enzyme activities and improved soil microorganisms activity shown by the means of soil DHA and soil respiration. Although the results from the treatment with SD were significantly better than that of CK, they were worse than other two amended treatments. The possible reason might be the great amount of plastics and fibres in it. Seen from all the results in this experiment, the effect of using DP is similar to PC, which means that recycling hydrophilic polymers from diapers can be applied for the remediation of contaminated soil with heavy metals.

Keywords: diaper; hydrophilic polymer; mine soil; native plant

收稿日期:2013-01-11

基金项目:辽东学院科研基金项目,葡萄牙科研基金项目(PPCDT/AMB/57586/2004)

作者简介:曲贵伟(1970—),男,博士,主要从事土壤重金属污染修复方面的研究。E-mail:guiweiqu@163.com

葡萄牙 Sao Domingos 矿区位于伊比利亚半岛黄铜矿带,靠近葡萄牙和西班牙边境,开采始于19世纪,由于资源枯竭于1966年关闭。由于该地区的尾矿没有经过任何处理而任意堆放,大面积土壤受到多种重金属的污染。长期遭受重金属污染的矿区土壤其重金属有效性较低(尤其是水溶性重金属含量),土壤条件恶劣(酸性较强,有机质和养分含量极低),而且矿区土壤,尤其是发育在尾矿上的土壤因植被覆盖差而容易受到侵蚀,从而对周边土壤产生潜在的污染威胁。

土壤重金属污染修复目前已成为全球研究的热点,当重金属污染面积较大时,原位修复技术因为成本低,对土壤结构和功能影响小,容易操作而被广泛应用。近年来,原位化学固定技术和植物修复技术研究较多,其中化学固定技术是通过使用各种修复材料如石灰^[1]、富含有机质的物质(如农家肥、城市垃圾堆肥等)^[2-3]、磷酸盐^[4]等固定或降低土壤重金属的有效性,减少植物吸收或降低对植物生长以及土壤性质的危害,从而达到修复土壤的目的。然而,这些修复物质都存在着一些缺点或局限性,如石灰只能用于酸性土壤,有机质容易分解,而磷酸盐容易造成磷矿资源的浪费和环境富营养化等。植物修复技术由于成本低和能够改善环境景观等优点而备受青睐^[5-6],对于重金属污染土壤来说,植物修复是一项经济且实用的技术^[7]。目前,将这两项技术结合起来修复重金属污染土壤已经受到广泛关注。

研究表明在溶液中,高分子量不溶性的聚丙烯酸盐(钾盐和铵盐)可以吸附多种重金属离子,吸附能力与EDTA相似^[8],应用该聚丙烯酸盐可以改善污染土壤上植株生长和土壤的理化性质如土壤的持水能力^[9-10]、土壤的酸碱度和土壤微生物及酶的活性,还可以为土壤提供植株生长所需的养分^[11]。在重金属污染的土壤上,聚丙烯酸盐可以降低土壤中重金属离子的有效性,同时还可以为污染土壤上的植株根系和根际微生物提供一个重金属含量低、水分丰富的微环境,从而促进植株生长和微生物活性的提高^[7]。但是此前试验所用的高分子量聚丙烯酸盐均属于工业产品,价格较高(每公斤为25~30元人民币),因此不适合大面积使用。

一次性尿不湿主要是由外层塑料薄膜防漏层、纤维素纸浆和高吸水性物质组成的吸收层以及最贴近皮肤的绵纸层组成,其中高吸水性物质一般为聚丙烯酸钠。据估计,每年大约有130 Gg的聚丙烯酸盐用于

生产尿不湿和女性卫生用品^[12]。废弃尿不湿占城市固体垃圾的4%,数量较大^[13]。目前还没有关于废弃尿不湿回收利用方面的研究,如果废弃尿不湿可以用于土壤重金属污染修复,将为其回收利用提供新的途径。

对于环境条件比较恶劣的废弃矿区重金属污染土壤,选择适当的修复技术比较困难,在这样的地区恢复植被覆盖,减少次生污染应是首要解决的问题,而筛选和利用当地耐受植株是实现这一目的的一个快捷有效的途径。Mendez等研究证明在铅锌污染的土壤上选用当地植株对于表土固定效果显著^[14]。

本研究的主要目的:①尿不湿中的高吸水性聚合物是否可以用于土壤重金属污染修复;②其对土壤性质的影响(土壤中重金属含量、土壤酶活性以及土壤微生物活性等);③对本地植株 *Spergularia Purpurea* 生长及植株覆盖度的影响。

1 材料和方法

1.1 试验设计

土壤采自 Sao Domingos 矿区(37°40'N, 7°30'W),这里曾是世界上最重要的大型硫酸盐成矿区。52%的土壤是由大于2 mm的粗粒组成,土壤的基本性质见表1。土壤全量重金属由 Actlabs(Canada)分析测定。12个栽培池(50 cm高,直径60 cm),埋于土中45 cm,处于网室中。在栽培池填入约60 kg的供试土壤。试验设置4个处理:空白(CK)、0.3%尿不湿中高吸水性聚合物(DP)、0.3%纯聚丙烯酸盐(分子量为4000万)(PC)、25个尿不湿的碎片(相当于0.3%尿不湿聚丙烯酸盐)(SD),均设3次重复,所有处理采用随机分布。尿不湿中含有约20%的高吸水性物质,其性质(Na^+ 含量、重金属吸附数量和吸水能力)与纯聚丙烯酸盐相似(表2)。为模拟废弃尿不湿,每个处理分别添加2 L的人工尿液(组成见表3),加盖平衡2周后,每个处理每周分别添加10 L水,以上组成用0.02 mol·L⁻¹ HCl溶液配制成1 L溶液。一个月后,播入120粒采自矿区的紫花漆姑草[*Spergularia purpurea*(Persoon) G. Don fil.]种子,这种植株属于一年或两年生双子叶植株,为馨香石竹科,常生长于地中海地区贫瘠的土壤上,在摩洛哥还被用作药材^[15-16]。

每个栽培池分别在2009年5月19日和26日、6月2日、9日、16日和23日进行拍照,采用网格法测定图片中土壤表面覆盖的百分比,用于比较不同处理的覆盖程度(覆盖率=绿色植被网格数/栽培池网格总数×100%)。试验期间的最低气温为2009年4月的

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Characteristics of the soil used in the experiment

项目	测定结果
质地	砂质
有机碳/g·kg ⁻¹	1.0
土壤 pH(1:2.5)	4.1
土壤全 Cu/mg·kg ⁻¹	91
土壤全 Zn/mg·kg ⁻¹	47
土壤全 Mn/mg·kg ⁻¹	17
土壤全 As/mg·kg ⁻¹	2730
土壤全 Pb/mg·kg ⁻¹	6200

表 2 供试聚丙烯酸盐和尿不湿中高吸水性聚合物性质

Table 2 The properties of polyacrylate polymer and polymer from diaper

聚丙烯酸盐类型	持水量/ %	Na ⁺ 含量/ mg·g ⁻¹	吸附 Cu ²⁺ / mg·g ⁻¹
纯聚丙烯酸盐	43.8±4.1	102±22.7	300±29.4
尿不湿中高吸水性聚合物	53.0±7.6	136±19.2	320±15.1

表 3 供试用人工合成尿液组成

Table 3 The composition of the synthetic urine

含盐种类	浓度
NaCl	14.1 g·L ⁻¹
KCl	2.8 g·L ⁻¹
Urea	17.3 g·L ⁻¹
NH ₃ H ₂ O(25%)	1.9 mL·L ⁻¹
CaCl ₂	0.6 g·L ⁻¹
MgSO ₄	0.43 g·L ⁻¹

14.7℃,而最高为6月的21.6℃。降雨量在4、5、6月分别为33、48、38mm,潜在蒸发量约为395mm。为维持植株生长,当连续5d没有降雨时实施灌溉,灌水量约为35mm。

1.2 样本分析

植株收获于6月24日,经去离子水清洗后,在65℃下烘干称重粉碎。植株中的矿物质分析采用常规分析方法^[17]。

新鲜的土壤样本分成2份,一份新鲜土壤用于测定土壤脱氢酶活性和土壤基础呼吸(用于标定土壤微生物活性),一份放置冰箱冷冻,用于测定土壤酶活性。根据Tabatabai^[18]和Hope和Burns^[19]所述方法分别测定土壤脱氢酶活性和纤维素酶活性;而酸性磷酸酶活性和葡萄糖苷酶活性则根据Eivazi和Tabatabai所述方法测定^[20-21];采用Ladd和Butler所述方法测定蛋白酶活性^[22],其他风干土样用于测定土壤pH和土壤

中有效重金属的含量。

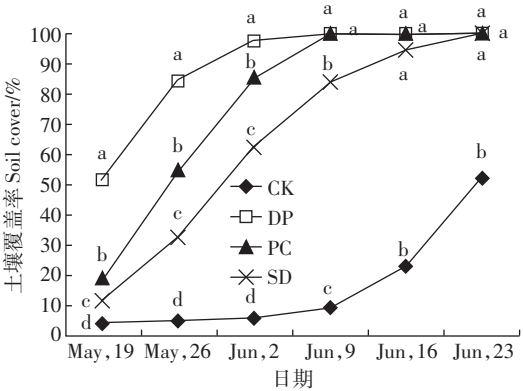
1.3 数据分析

所有数据间差异比较均采用通用线性模式,平均值显著性分析在 $P<0.05$ 下采用Newman-Keuls法。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤覆盖率和植株生长的影响

试验结果显示,聚丙烯酸盐的应用显著改善了紫花漆姑草(*Spergularia purpurea*)生长和对土壤的覆盖率。应用0.3%尿不湿中高吸水性聚合物处理的植株生长最快,56d后植株就覆盖全部的土壤。应用纯聚丙烯酸盐的处理略差,但优于应用粉碎尿不湿的处理,70d后覆盖全部的土壤,在试验的后期,这3个处理均覆盖全部的土壤,而此时,对照处理中的植株仅覆盖约一半的土壤(图1)。同时,应用尿不湿中高吸水性聚合物和纯聚丙烯酸盐的处理显著促进了植株的生长,获得最大的植株生物量 $[(1.82\pm0.41)\text{g}]$ 和 $[(1.81\pm0.23)\text{g}]$,约为对照的3倍,累积生物量则是对照处理的4~5倍(表4)。虽然使用粉碎尿不湿的处理植株生物量受到一定影响,但仍明显高于对照。与对照相比,修复后的土壤上植株中的重金属含量均显著下降,其中Zn、Cu分别下降了23%~27%和36%~45%;Pb下降了46%~56%;而Mn和As则分别下降了54%~58%和50%~62%。除Zn和Cu外,其他重金属降幅均在50%左右。但是不同修复处理之间的差异不显著(表5)。



图中在相同日期,不同处理数值上字母相同表示经Newman-keuls检验差异不显著($P>0.05$)。

图 1 不同处理在不同时期对土壤覆盖率的影响

Figure 1 The effect of different treatments on soil cover

2.2 不同处理对土壤性质的影响

2.2.1 对土壤 pH 的影响

与对照相比,尿不湿和纯聚丙烯酸盐的应用极大

表 4 不同处理对植株生物量的影响

Table 4 The effect of different treatments on shoot biomass

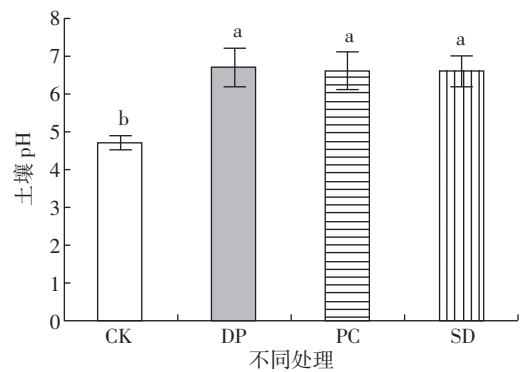
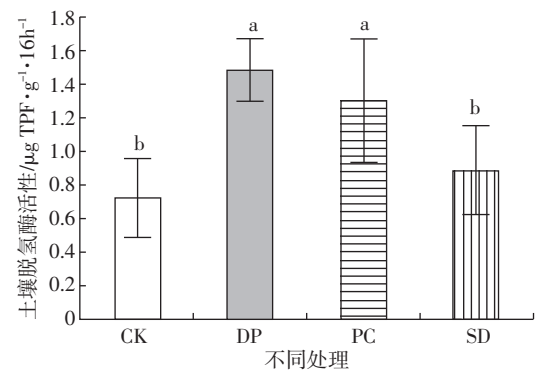
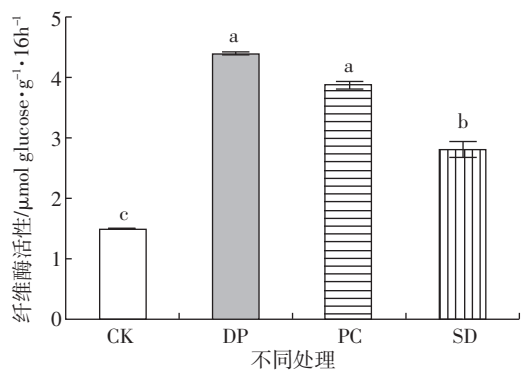
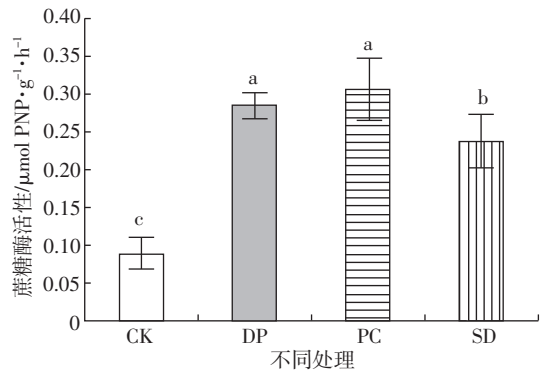
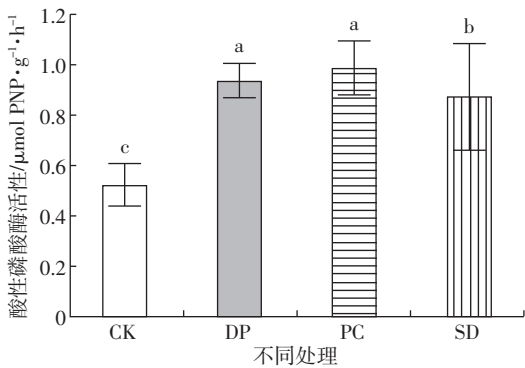
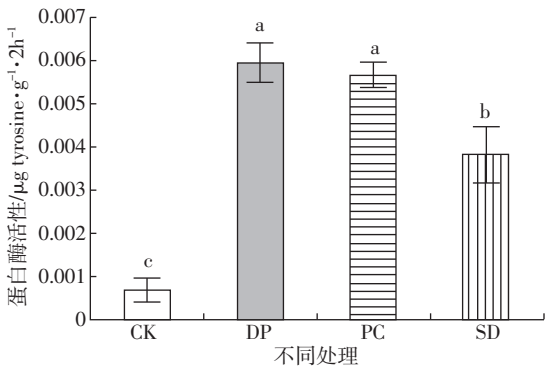
处理	植株生物量(每株)/g	植株生物量(每栽培池)/g
CK	0.67±0.04c	20±2.0c
PC	1.81±0.23a	110±11.8a
DP	1.82±0.41a	102±15.4a
SD	1.47±0.27b	75±10.0b

注:表中竖排数值后字母相同的表示经 Newman-Keuls 检验差异不显著($P>0.05$)。下同。

表 5 不同处理对植株中重金属含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 The effect of different treatments on the mineral

concentration in shoot($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)					
处理	Zn	Mn	Cu	Pb	As
CK	91±5.5a	121±11.0a	11±2.7a	97±7.0a	42±8.0a
PC	70±13.2b	56±7.9b	7±1.6b	46±9.9b	16±0.3b
DP	70±9.2b	51±10.0b	6±0.9b	52±4.9b	21±6.8b
SD	66±8.5b	54±9.1b	7±1.1b	43±7.2b	16±3.0b



PNP-对硝基苯酚(p-Nitrophenol);TPF-三苯甲磺;图中彩色柱上字母相同的表示经 Neaman-Keuls 检验差异不显著($P>0.05$)

图 2 不同处理对土壤酶活性的影响

Figure 2 The effect of different treatments on soil enzymatic activities

地提高了土壤 pH(图 2),均比对照高出约 2.0,差异显著,但不同修复处理之间差异不显著。

2.2.2 对土壤微生物活性和土壤酶活性的影响
与对照相比,尿不湿中高吸水性聚合物和纯聚丙烯

烯酸盐的应用显著提高了土壤水解酶的活性(图2)。其中土壤中酸性磷酸酶、蔗糖酶、蛋白酶和纤维素酶的活性在这两个处理中最高,而应用粉碎尿不湿的处理则处于中间,对照处理最低。虽然应用粉碎尿不湿的处理中土壤水解酶的活性明显受到抑制,但仍显著高于对照处理。

尿不湿中高吸水性聚合物和纯聚丙烯酸盐的应用显著改善了土壤微生物的总体活性,主要表现在土壤脱氢酶活性和不同底物诱导下的土壤基础呼吸均得到显著提高(图3)。其中使用尿不湿中高吸水性聚合物的处理其土壤基础呼吸数值最高,在以海藻糖、半胱氨酸、氨基丁酸、半乳糖、抗坏血酸为底物的土壤基础呼吸数值上则明显高于纯聚丙烯酸盐的处理。而土壤脱氢酶活性在这两个处理间差异不显著。与之相比,使用粉碎尿不湿则明显限制了土壤脱氢酶活性和土壤微生物基础呼吸,虽然高于对照处理,但差异不显著。

3 讨论

3.1 不同处理对植株生长的影响

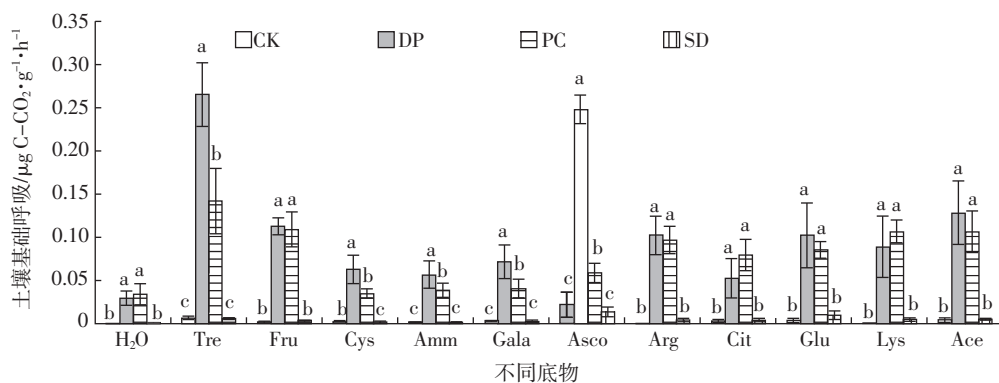
Sao Domingos 矿区的土壤酸性较强,有机质和养分含量低,土壤重金属含量高(尤其是 As 和 Pb),这是严重限制植株生长的主要因素^[13,23-25]。考虑到多年生植株在该土壤上生长较慢,本试验选择了矿区当地一年生植物紫花漆姑草(*Spergularia purpurea*),这种植株对该地区土壤中各种限制因素具备一定的抗性。试验表明,在经过修复的土壤上植株生物量得到显著提高,生长得到极大改善,同时植株体内重金属含量显著下降。这主要是因为尿不湿中高吸水性聚合物或

者聚丙烯酸盐的使用增加了土壤的保水性能,改善了植株生长所需的水分条件,尤其在春夏季节,也能维持植株的正常生长,而对照处理则在后期的干旱季节里最先死亡。在本试验中,尽管植株生长没有受到严重的水分胁迫,但在夏季长时间的缺水对植株的生长还是起到了一定的限制作用(如对照处理)。因此,使用尿不湿或纯聚丙烯酸盐对土壤保水能力的提高进而改善植株生长必然起到了一定的促进作用。研究表明应用聚丙烯酸盐等高吸水性物质提高土壤持水能力是保证植株生长的主要因素之一^[12-13]。此外,尿不湿中高吸水性物质或聚丙烯酸盐对重金属的吸附,有效降低了土壤重金属的活性(特别是在根际范围),从而使植株体内重金属含量显著下降(表5),这也是促进植株生长改善的一个重要因素。在该污染土壤上,植株生物量的提高应主要归功于土壤根际微环境的显著改善,比如在重金属污染土壤的植物根际营造一个水分、养分充足,适宜的 pH 值以及重金属含量显著降低的微环境,能够促进植株的生长^[13,26]。

值得说明的是,尽管紫花漆姑草在夏秋季节(8—10月)会因为严重的干旱而干枯死亡,但该植株仍会保持对土壤的覆盖和对根系周围土壤的固持,实际上在葡萄牙夏季连续4个月的时间内降雨很少或没有,且风力较低,这样的覆盖和对土壤的固持已经足以防止土壤侵蚀。

3.2 不同处理对土壤 pH 以及土壤微生物活性的影响

土壤酸度是控制土壤中金属离子溶解度和吸附解吸过程的重要因素之一^[23]。经过修复处理的土壤 pH 比对照明显提高,可能是由于高吸水性聚合物或纯聚丙烯酸盐上吸附的 Na^+ (表2)与土壤中的酸性离



H₂O-去离子水;Tre-海藻糖;Fru-果糖;Cys-半胱氨酸;Amm-氨基丁酸;Gala-半乳糖;Asco-抗坏血酸;Arg-精氨酸;Cit-柠檬酸;Glu-葡萄糖;Lys-赖氨酸;Ace-乙酰基氨基葡萄糖。图中不同色柱上字母相同的表示经 Neaman-Keuls 检验差异不显著($P>0.05$)

图3 不同处理、不同底物诱导对土壤基础呼吸的影响

Figure 3 The effect of different treatment on microbial basal and substrate-induced respiration

子之间(如 H^+)的相互交换,从而降低了土壤溶液中的 H^+ 浓度,这与之前的试验结果一致^[13]。在这个酸性的污染土壤上,这种改善也会对植株生长和土壤酶活性起到一定的促进作用,同时也有利于降低土壤重金属的活性^[13,26]。

由于土壤水解酶主要来源于土壤微生物^[27],通常用作土壤质量改善的评价指标^[28],土壤基础呼吸和脱氢酶活性通常用来评价土壤微生物的总体活性。在本试验中,与其他处理相比,尿不湿中高吸水性聚合物和纯聚丙烯酸盐处理显著改善了各种水解酶、脱氢酶以及土壤基础呼吸,这主要是因为土壤植被覆盖和植物生物量的提高,增加了土壤中植物根系分泌物的含量,为微生物提供更多的能量物质(碳水化合物),从而促进了微生物的整体活性。Xie 等研究表明,在污染土壤上,根系分泌物对土壤微生物活性起到了明显的改善作用^[32]。大多数土壤酶活性在重金属含量高时会受到明显抑制^[29-31]。本试验所采用的土壤中 Pb 和 As 的含量很高,这应是造成对照土壤水解酶活性和土壤基础呼吸明显低于其他处理的主要限制因素。之前的研究已经证明聚丙烯酸盐的应用可以显著降低土壤中重金属的有效性^[13],因此尿不湿中高吸水性聚合物的应用,必然降低了土壤中重金属的有效性,这一点可以从植株中的重金属含量得到验证。此外,结合其对土壤水分的调节以及土壤 pH 的改善方面的作用,以及为微生物生长旺盛的根际微环境营造了良好的条件(适宜的水分和 pH 以及较低的重金属含量),由此认为这可能是土壤中各种酶活性和微生物活性改善的另一个主要原因。

综合以上结果,在本试验中尿不湿中的高吸水性聚合物的表现优于或者与纯聚丙烯酸盐相似,完全可以替代纯聚丙烯酸盐。然而粉碎的尿不湿处理则在植株生长、土壤脱氢酶和基础呼吸的改善上明显低于其他两个处理,这可能是由于尿不湿中较多的塑料和纤维对微生物的活性产生一定的影响而造成的。从这个结果来看,土壤微生物对尿不湿中的辅助材料(塑料和纤维)敏感性比土壤水解酶要高,直接使用粉碎的尿不湿可能会影响土壤微生物的活性。因此,废弃尿不湿直接在重金属污染土壤修复上的应用还需长期观察和慎重考虑。但是如果能够回收利用废弃尿不湿中高吸水性聚合物,则对于降低使用聚丙烯酸盐的修复成本有着重大意义,这也将是我们进一步研究的新课题。同时尿不湿中高吸水性聚合物在污染土壤中的稳定性是决定其应用效果和有效期限的重要依据,研

究表明土壤中只有极少的细菌可以分解高分子量不溶性的聚丙烯酸盐^[33]。根据此前几年的试验观察,聚丙烯酸盐在 3~4 年内还可在土壤中稳定存在,还保持保水和对重金属的吸持能力。本试验中尿不湿中的聚合物与纯聚丙烯酸盐的性质相似,其在稳定性方面也可能类似于高分子量的聚丙烯酸盐,但这方面还有待于进一步的研究证明。此外,从本试验结束后采样的难易程度可以看出,使用聚合物修复的土壤比较疏松,而对照处理土壤则比较紧实。这说明聚合物的使用对土壤物理性质起到了改善作用,值得进一步研究探讨。

3 结论

应用尿不湿中的高吸水性物质显著改善了污染矿区表土的植株的生长,促进了植物对表土的固定,其效果等同或高于纯聚丙烯酸盐,而且土壤性质如土壤酶活性和土壤微生物活性也得到显著改善。因此,可以用于重金属污染矿区促进土壤植被的恢复,并可显著降低修复成本。尿不湿中的塑料和大量纤维对土壤微生物总体活性(用土壤脱氢酶活性评价)具有一定的阻抗作用,在直接使用粉碎的尿不湿时,尚需慎重考虑。

参考文献:

- [1] Hale B, Evans L, Lambert R. Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field-contaminated and aged soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 199: 119-127.
- [2] Liu L, Chen H, Cai P, et al. Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(2): 563-567.
- [3] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge[J]. *Environment International*, 2009, 35: 142-156.
- [4] Silvano M, Alessia C, Vincenzo F. Evaluation of the effectiveness of phosphate treatment for the remediation of mine waste soils contaminated with Cd, Cu, Pb, and Zn[J]. *Chemosphere*, 2012, 86: 354-360.
- [5] Suchkova N, Darakas E, Ganoulis J. Phytoremediation as a prospective method for rehabilitation of areas contaminated by long-term sewage sludge storage: A Ukrainian-Greek case study [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 373-378.
- [6] Agamuthu P, Abioye O P, Abdul Aziz A. Phytoremediation of soil contaminated with used lubricating oil using *Jatropha curcas*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179: 891-894.
- [7] Lone M I, Zhen L H, Stoffella P J, et al. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives[J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2008, 9(3): 210-220.
- [8] 曲贵伟, 依艳丽. 聚丙烯酸铵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, 34(20):5331-5333, 5335.
- QU Gui-wei, YI Yan-li. Effect of polyacrylate polymers on the absorption of heavy metal and remediation of artificially polluted soil with cadmium [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2006, 34 (20):5331-5333, 5335.
- [9] Martin E. Environmental impact studies of the disposal of polyacrylate polymers used in consumer products[J]. *Science of the Total Environment*, 1996, 19:225-234.
- [10] Ojeda-Benítez S, Armijo-de Vega C, Marquez-Montenegro M Y. Household solid waste characterization by family socioeconomic profile as unit of analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52: 992-999.
- [11] Al-Humaid A I, Moftah A E. Effects of hydrophilic polymers on the survival of buttonwood seedlings grown under drought stress.[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2007, 30:53-66.
- [12] de Varennes A, Torres M O. Soil remediation with insoluble polyacrylate polymers: An review[J]. *Revista de Ciências Agrárias*, 2000, 23 (2):13-22.
- [13] Qu G W, de Varennes A, Cunha-Queda C. Remediation of a mine soil with insoluble polyacrylate polymers enhances soil quality and plant growth[J]. *Soil Use and Management*, 2008, 24(4):350-356.
- [14] Mendez M O, Glenn E P, Maier R M. Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: Growth, metal accumulation, and microbial community changes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36:245-253.
- [15] Jouad H, Lacaille-Dubois M A, Eddouks M. Chronic diuretic effect of the water extract of *Spergularia purpurea* in normal rats[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2001, 75:219-223.
- [16] Eddouksa M, Jouad H, Maghrania M, et al. Inhibition of endogenous glucose production accounts for hypoglycemic effect of *Spergularia purpurea* in streptozotocin mice[J]. *Phytomedicine*, 2003, 10:594-599.
- [17] A. O. A. C. Association of official agricultural chemist, official methods of analysis[M]. Washington, D. C. , USA, 1990.
- [18] Tabatabai M A. Soil enzymes[M]//Mickelson S H, Bigham J M. Methods of Soil Analysis; Part 2, Madison, Wisconsin, USA; Soil Science Society of America, 1994:775-833.
- [19] Hope C F A, Burns R G. Activity, origins and location of cellulase in a silt loam soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1987, 5:164-170.
- [20] Eivazi F, Tabatabai M A. Phosphatases in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1977, 9:167-172.
- [21] Eivazi F, Tabatabai M A. Glucosidases and galactosidases in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20:601-606.
- [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 Biology & Biochemistry*, 1972, 4:19-30.
- [23] Walker D J, Clemente R, Bernal M P. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste[J]. *Chemosphere*, 2004, 57:215-224.
- [24] Clemente R, Almela C, Bernal M P. A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143:397-406.
- [25] Pérez-de Mora A P, Ortega-Calvo J J, Cabrera F, et al. Changes in enzyme activities and microbial biomass after "in situ" remediation of a heavy metal contaminated soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28:125-137.
- [26] Qu G, de Varennes A, Cunha-Queda C. Use of insoluble polyacrylate polymers to aid phytostabilization of mine soils: Effects on plant growth and soil characteristics[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39 (1):168-175.
- [27] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9:105-109.
- CAO H, SUN H, YANG H. A review: Soil enzyme activity and its indication for soil quality[J]. *Journal of Applied & Environmental Biology*, 2003, 9:105-109.
- [28] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2005, 37:877-887.
- [29] Belén-Hinojosa M, Garcia Ruiz R, Venegla B, et al. Microbiological rates and enzyme activities as indicators of functionality in soils affected by the Aznalcollar toxic spill[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36:1637-1644.
- [30] Lee S H, Kim E Y, Hyun S H, et al. Metal availability in heavy metal-contaminated open burning and open detonation soil: Assessment using soil enzymes, earthworms, and chemical extractions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170:382-388.
- [31] Li Q S, Cai S S, Mo C H, et al. Toxic effects of heavy metals and their accumulation in vegetables grown in a saline soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73:84-88.
- [32] Xie X M, Liao M, Yang J, et al. Influence of root-exudates concentration on pyrene degradation and soil microbial characteristics in pyrene contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 88:1190-1195.
- [33] Al Harbi A R. Efficacy of a hydrophilic polymer declines with time in greenhouse experiments[J]. *Hort Science*, 1999, 34(2):223-224.