

宋凤敏,张兴昌,李琛,等.城市剩余污泥在铁矿尾矿库生态修复中的试验[J].江苏农业科学,2016,44(11):453-456.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.130

城市剩余污泥在铁矿尾矿库生态修复中的试验

宋凤敏^{1,2},张兴昌^{3,4},李琛¹,王彦民¹

(1. 陕西理工学院化学与环境科学学院,陕西汉中 723001; 2 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要:针对陕西省略阳县铁尾矿库废弃地的复垦,以城市剩余污泥作为改良剂,选用4种短期生长叶类植物进行35 d盆栽试验,研究植物在以尾矿和剩余污泥按4种不同质量配比所得的盆栽基质中的生长情况。盆栽基质是以尾矿与剩余污泥按质量100:0、80:20、60:40、50:50混合而成,分别标记为T₁₀₀、T₈₀、T₆₀、T₅₀,T₀为正常土壤对照。结果表明,尾矿与剩余污泥比例为60:40的土壤改良组植物在发芽率、地面以上部分株高和鲜质量方面最高;在同一改良土壤组中,茼蒿生长高度、发芽率、地上鲜质量最高;植物地上茎叶中重金属含量随剩余污泥在混合基质中比例的升高而增长,同一土壤改良组中茼蒿茎叶重金属含量最高。

关键词:铁矿尾矿;剩余污泥;土壤改良;盆栽;生态修复

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)11-0453-04

铁尾矿别称铁尾砂,是铁矿在开采后,将矿石经粉碎、浮选、精矿后产生的固体粉末,堆存起来不但占用大量土地,也是潜在的污染源^[1-2]。据统计,我国每年产生6亿~8亿t尾矿,其中铁矿尾矿6亿余t^[3],其大多都累积堆放在尾矿库,不但占用大量的土地、破坏生态系统,尾矿中污染物随降雨淋溶渗透对周围水体、土壤造成污染^[4-6],若不能得到很好的治理甚至会影响周边人群的身体健康。我国人口众多,土地资源短缺,每年由于采矿等各种原因使土地资源不断减少,人多地少的矛盾日益突出。如果可以通过对尾矿废弃地进行有效的复垦,在一定程度上能够缓解这种矛盾,并且使尾矿库区的生态环境得以恢复。铁尾矿砂养分含量低,保水保肥能力差,影响其复垦效果,因此尾矿砂复垦的关键因素是改良尾砂土壤结构,增加尾砂养分。城市剩余污泥为一种废弃物,因其含有丰富的氮、磷、钾和大量的有机质,经矿化后易被植物吸收^[7],成为一种良好的有机肥料资源,在农林上已有一定的应用,在尾矿的生态修复改良中可作为一种有效的改良剂来

使用。国内外学者对污泥堆肥在矿山废弃地复垦中的应用也有一些报道^[8-9]。本研究针对陕西省略阳县某铁矿尾矿废弃地的复垦,选取4种短期收获的叶类植物在剩余污泥改良的尾矿中生长,利用盆栽试验方法,研究尾矿与剩余污泥不同配比对叶类植物种子发芽和生长过程的影响,寻求植物生长的城市剩余污泥对铁尾矿基质改变最佳配比,为铁尾矿废弃地复垦提供理论依据和实践经验。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

1.1.1 试验材料 供试植物为大白菜、黄秧朝天委陵菜、小叶茼蒿、大众小青菜(即白菜),这4种叶类植物均为当地夏天易生长且周期短的叶类植物。

供试尾矿砂土采自陕西省略阳县某铁矿尾矿库;城市剩余污泥采自陕西省汉中市城市污水处理厂污泥处理车间处理后的剩余污泥;自然土壤采自陕西理工学院校园花卉地。

1.1.2 盆栽方法 将尾矿与剩余污泥按不同比例(质量比)充分混合,设5个处理,即T₀(100%自然土壤)、T₅₀(50%尾矿+50%污泥)、T₆₀(60%尾矿+40%污泥)、T₈₀(80%尾矿+20%污泥)、T₁₀₀(100%尾矿砂),每个处理设3个重复。将混合好的土壤装入直径为25 cm、深为23 cm的盆钵中,放置1周备用,每盆总质量为2.5 kg。选取无虫蚀、发育良好的茼蒿、朝天委陵菜、大白菜、白菜种子经蒸馏水冲洗3次后播种

收稿日期:2015-09-01

基金项目:中国科学院西部行动计划(编号:KZCX2-XB3-13);陕西省教育厅项目(编号:94JK1136)。

作者简介:宋凤敏(1978—),女,陕西勉县人,博士研究生,副教授,主要从事环境污染治理及环境科学研究。E-mail: sfm3297@163.com。

[14] 吴良,杜兵兵,罗盛旭,等.海南苦丁茶和绿茶叶中微量元素溶出率的比较分析[J].微量元素与健康研究,2008,25(5):39-41.

[15] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.

[16] 曾琦斐.中药党参中微量元素与氨基酸含量的测定[J].中国医药导报,2010,7(19):65-66.

[17] 秦俊法,陈磐华.中国的中药微量元素研究I.微量元素:一切中药的基本成分[J].广东微量元素科学,2010,17(11):1-18.

[18] 秦俊法,林宣贤.中国的中药微量元素研究II.微量元素:中药有效药成分的核心组分[J].广东微量元素科学,2010,17(12):1-12.

[19] 俞年军,于娇,张伟,等. ICP-MS法测定毫菊不同部位及其土壤中微量元素[J].中药材,2014,37(12):2136-2139.

[20] 严俊,段金殿,钱大玮,等.不同产地当归及其土壤无机元素的关联分析与探讨[J].中药材,2011,34(4):512-516.

[21] 卢燕林,张强,李彩萍,等.地道党参营养特性与产地土壤特征研究[J].山西农业科学,2007,35(5):42-45.

于盆中,深0.5~1.0 cm。每盆播种15粒,每天浇自来水并自然光照,让其自然生长,同一物种在同一混合方式上设3个重复。播种后3 d观察其发芽情况,7 d对每盆进行间苗,5株以上随机间苗为5株,5株以下保留原来株数不变,对其进行跟踪测定。出芽后,记录其生长状况。测定项目为株高,每7 d测量1次。

1.2 样品处理和分析方法

1.2.1 植物样品处理 自播种后生长至第35天时,小心倒盆,将植株与基质分开用自来水清洗植株根系3次,再用蒸馏水冲洗,晾干,称量其连带茎叶和根系总鲜质量。然后在烘箱中105℃杀青30 min,80℃烘24 h,称量其干质量及粉碎供测植物体内重金属元素含量。

1.2.2 分析方法 尾矿基质基本化学性质按常规分析方法测定,其中土壤速效氮含量采用碱解扩散法测定;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提钼蓝比色法;土壤速效钾含量采用NH₄OAC浸提法;土壤有机质(OM)含量采用低温外热重铬酸钾氧化法;土壤pH值采用土液比1:2.5进行配比,pH计法测定。尾矿基质中重金属元素含量采用硝酸-氢氟酸-高氯酸高温溶解,其中Fe、Pb、Cr含量用电感耦合等离子发射光谱法ICP-AES测定,Cd含量用原子荧光分光光度法测定。

表1 改良后各土壤组别的理化性质

改良前后各组分性质	土壤营养成分含量(mg/kg)			土壤重金属总含量(g/kg)				有机质含量(%)	pH值
	速效钾	有效磷	速效氮	Fe	Pb	Cd	Cr		
剩余污泥	257.15	14.50	458.2	36.80	46.10	0.77	75.10	16.80	6.50
T ₀	167.16	12.60	375.6	28.60	—	—	—	1.78	6.70
T ₅₀	165.82	22.91	371.8	56.73	30.12	0.38	37.16	6.77	7.21
T ₆₀	212.58	15.56	287.6	63.56	25.81	0.27	30.12	6.34	7.43
T ₈₀	135.11	6.15	243.1	67.66	12.15	0.13	15.62	4.57	7.76
T ₁₀₀	118.93	3.36	130.7	73.86	—	0.08	—	0.81	7.42
土壤质量二级标准	100~150	>10	>75	无	250.00~350.00	0.30~0.60	<150	0.50~3.00	6.50~7.50

注:“—”表示未检出。

2.2 不同尾矿处理对植物种子发芽的影响

播种后4 d植物种子发芽数见表2。由表2可知,4种植物的出芽数为全尾矿土壤T₁₀₀组最少,T₆₀组最多,且T₁₀₀组和T₆₀组土壤植物出芽数与其他3组土壤各组差异显著,而其他3组间(苘蒿的T₀组与T₅₀、T₁₀₀组除外)出芽数差异不明显。说明T₆₀组土壤最适合4种植物种子发芽,对种子发芽抑制最小。结合表1改良后5种土壤中营养元素和重金属含量分析,随着剩余污泥施入量的增加,混合基质中有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量不断增加,这些成分的增加使土壤中微生物新陈代谢加快,从而有利于土壤的矿化,增加植物生长过程中所需要的营养物质^[10-11]。T₁₀₀组虽然未检出重金属,但是土壤营养成分过低导致种子发芽率最低;T₅₀组土壤营养成分含量最高,最有养分,但是Pb、Cr含量也最高,致使其种子发芽率受到很大影响;T₆₀组营养元素含量均高于T₈₀组土壤,重金属含量低于T₅₀组土壤,T₈₀组重金属(除Fe外)含量、营养元素也最低,所以T₆₀组出芽率最高,其次是对照组T₀。4种叶类植物在同一种改良土壤中出芽数相差不大,T₆₀组朝天委陵菜和大白菜的平均出芽数最多,达到12株;其次是白菜,11株;最少的是苘蒿,说明朝天委陵菜和大白菜种子对改良尾矿砂的适应性好于白菜和苘蒿。

1.3 数据的处理和分析

数据用SPSS 19.0软件处理,Excel 2013作图。

2 结果与分析

2.1 不同尾矿处理基质中重金属含量和营养元素水平

有机质、有效氮、有效磷、速效钾等是植物生长所需要的营养成分。由表1可知,尾矿砂(T₁₀₀)是一种营养成分缺乏、铁含量极高、不利于植物生长的特殊基质,而剩余污泥营养成分很高,但是含有一定量的重金属。尾矿与污泥、土壤混合后可显著提高尾矿砂土中的速效氮和有效磷含量,当尾矿比重在80%以下时有效磷含量达到标准,土壤速效氮含量变化不大,没有达到自然土壤含氮量,可提高尾矿砂土中的有机质和速效钾含量,施加改良剂后土壤有机质和速效钾均达到标准;改善后尾矿pH值基本控制在弱碱性范围之中,适宜植物生长,其中尾矿比重为80%超过土壤环境质量二级标准7.5范围,但超出率不大;改良后,土样污泥中重金属Cd超出土壤质量标准,其余2种金属含量均在标准范围内,理论上不会影响植物正常生长,在盆栽结束后对植株根部和茎叶进行重金属检测分析。总之,尾矿比重小于80%的土样均比改良前各要素含量高,均达到标准含量,能够保证作物可正常生长。

表2 不同尾矿处理对植物出芽数的影响

土壤组别	植物4 d平均出芽数(个)			
	苘蒿	朝天委陵菜	大白菜	白菜
T ₀	7.00±1.00b	7.67±1.53bc	7.67±0.58b	6.67±0.58bc
T ₅₀	4.33±0.58d	6.00±1.00c	5.00±1.00c	5.33±1.53c
T ₆₀	9.33±0.58a	12.00±1.00a	12.00±1.00a	11.00±1.00a
T ₈₀	5.00±1.00cd	6.33±0.58c	5.33±0.58c	5.00±1.00c
T ₁₀₀	1.33±0.58e	2.00±0.00d	1.33±0.58d	1.00±0.00d

注:同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.3 不同尾矿处理对植物生长高度变化的影响

不同剩余污泥施入量对各种植株地上部分生长作用见图1。图1总体显示T₁₀₀的尾矿砂不适宜4种叶类植物生长,虽然生长期前20 d有缓慢的生长,但是20 d左右都停止生长且死亡,所以后面的株高为0,主要原因是尾矿砂贫营养元素缺乏,植物无法获取营养继续生长。而其余组所有植物株高持续增加,14~28 d植物株高增加明显,这4种叶类植物的生长周期基本一致,为30 d左右,14~28 d根系吸水吸肥能力增强,促使地面以上部分生长发育良好。各个改良尾砂组随着剩余污泥的加入,植物高度也呈现不同趋势,T₆₀组(剩余污泥添加量为40%处理)种植的植物在收获期株高最大,其次

是 T_0 组,最后是 T_{100} 组,另外在尾矿砂中增加一定量剩余污泥并添加黄黏土有利于提高植物在尾砂中生长,但加入剩余污泥量偏大则不利于植物生长。

不同配比混合基质对 4 种植物在生长初期和中期与不同剩余污泥施入量对生长的促进作用基本一致,说明在该阶段基质中的营养成分可以满足植物生长需求;在后期,即 28 ~ 35 d 呈现不同的趋势,植物植株已经基本不再生长,有的出

现黄叶,倒伏卷叶等现象。出现这种现象与 2 个方面有关:一方面是试验用的尾矿和剩余污泥加土壤混合,基质相比正常土壤还是较少,在试验后期营养成分不足以维持植物的生长;另一方面是由于活性氧在植物体内积累导致膜质过度氧化而破坏膜结构^[12],细胞内离子可能存在的重金属离子大量外渗使植物合成叶绿素的预制能力下降^[13],导致供给植物生长的能量和物质减少,植物叶片出现黄叶。

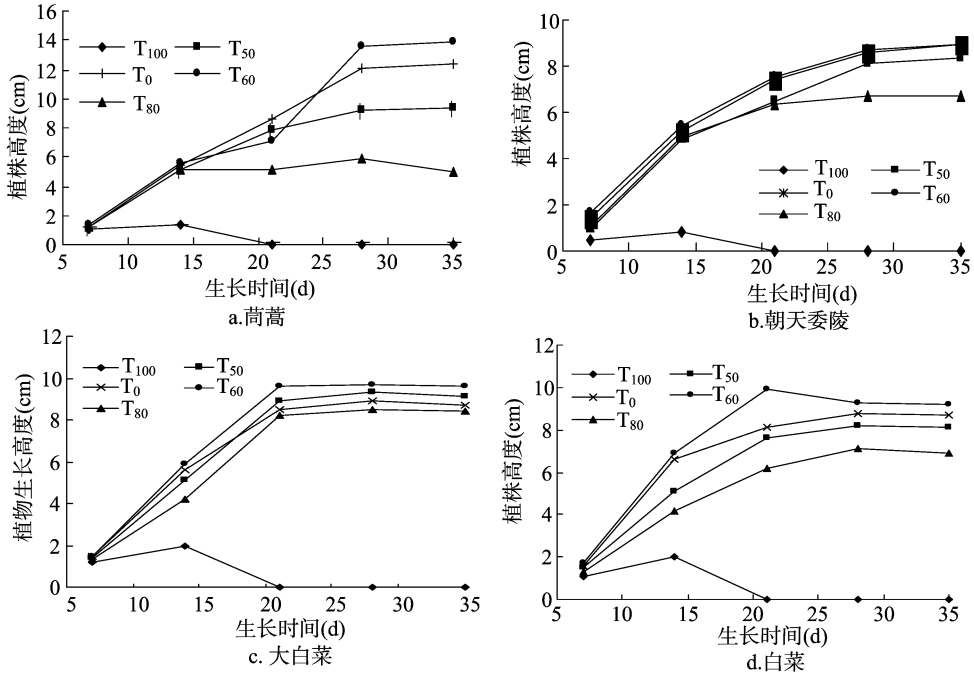


图1 不同尾矿处理对植物生长高度变化的影响

2.4 不同尾矿处理对植物生长量的影响

4 种植类植物在 5 种土壤单株平均生物量见表 3。由表 3 可知,生长 35 d 时,每种供试植物单株平均生物量在铁尾矿与剩余污泥混合的 4 种基质之间差异显著,仅 T_{50} 、 T_{80} 组朝天委陵菜与 T_{50} 、 T_{80} 组白菜 2 组无明显差异,与其他组存在明显差异。对于同一种改良组而言,4 种供试叶类植物中茼蒿与其他 3 种植物差异明显,朝天委陵菜、大白菜和白菜基本没有差异,这与植物的品种有关。在 4 种改良基质中,4 种植物的平均鲜质量均以 T_{60} 组最高,其次是正常土壤,除了茼蒿 T_{50} 组的鲜质量是 T_{80} 组鲜质量的近 2 倍外,其他 2 种植物 T_{50} 组与 T_{80} 组鲜质量差别不大,大白菜 T_{50} 与 T_{80} 组差异显著, T_{100} 组由于出芽后不久就停止生长,所以鲜质量最低。这个规律与基质对于植物种子发芽的影响和生长高度基本一致。

表 3 不同尾矿处理对植物地上部分生物量的影响

土壤组别	植物收获后每种植株平均鲜质量(g)			
	茼蒿	朝天委陵菜	大白菜	白菜
T_0	7.33 ± 0.21bA	5.13 ± 0.15bB	5.03 ± 0.06bB	5.70 ± 0.20bB
T_{50}	5.47 ± 0.21cA	3.83 ± 0.15cC	3.73 ± 0.06cC	4.60 ± 0.17cB
T_{60}	8.60 ± 0.10aA	6.13 ± 0.25aB	6.00 ± 0.10aB	6.63 ± 0.25aB
T_{80}	2.97 ± 0.21dC	3.53 ± 0.21cB	3.43 ± 0.06dB	4.43 ± 0.05cA
T_{100}	1.07 ± 0.25eA	0.77 ± 0.38dB	0.63 ± 0.15eB	1.10 ± 0.17dA

注:同列数据后小写字母、同行数据后大写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

整个生长过程,发现植物发芽后有少量植株倒伏和黄叶情况。 T_{60} 组生长情况最好,倒伏和叶黄现象较少,比较健壮,结合理化性质可知,当土壤钾供应较充足时,作物能有效地利用水分,并保持在体内,减少水分的蒸腾作用;钾的另一特点是有助于作物的抗逆性,增强细胞对环境条件的调节作用,增强植物对各种不良状况的忍受能力,如干旱、低温、含盐量、病虫害、倒伏等^[14-16]。 T_{60} 组营养物质含量适中,较适宜作物正常生长。 T_0 组生长情况较好,但少量在试验过程中倒伏和死亡,且伴有黄叶。 T_{50} 组和 T_{80} 组倒伏和死亡状况更胜于 T_0 组, T_{100} 组生长较差,生长极其缓慢,说明当尾矿砂含量超过 80% 时作物基本难以成活。

2.5 不同尾矿处理对植物重金属含量的影响

栽种 35 d 后 4 种植物地上部分重金属含量见表 4。由表 4 可知,全尾矿砂 T_{100} 组植物生长时间短,收获量很小,所测重金属均未检出,其他各组土壤栽种的 4 种植物中能够检出重金属,4 种植物在各改良组间有一定的差异,其中 T_{50} 组 4 种植物中 Pb、Cr、Cd 含量最高, T_{80} 组 Fe 含量最高,这与改良土壤中重金属含量高低一致,土壤中重金属总含量越高,植物体内重金属含量也越高^[17]。同一改良土壤中,茼蒿体内 4 种重金属含量略高于其他 3 种植物,而其余 3 种植物体内重金属在同一改良土壤中差别不大。GB 2762—2012《食品安全国家标准食品中污染物限量》要求 Pb 含量 ≤ 0.3 mg/kg、Cr 含量 ≤ 0.5 mg/kg、Cd 含量 ≤ 0.1 mg/kg, T_{50} 组茼蒿体内的 Pb 含

由于在整个盆栽过程中并没有外源添加任何肥料,观察

量超标 1 倍,Cr 含量超标 0.5 倍,Cd 含量超标 0.5 倍;其余 3 种植物 Cd 含量均低于标准限值,Pb 含量超标 0.6~0.83 倍,Cr 含量超标 0.2~0.3 倍。T₆₀组茼蒿体内的 Pb 含量超标 0.57 倍,Cd 含量超标 0.2 倍,Cr 含量接近限值未超标;其余 3 种植物仅 Pb 含量超标 0.3~0.4 倍,Cd 未检出,Cr 未超标。T₈₀组除了茼蒿体内 Pb 含量超标外,其余均在限值以内。各

组 Fe 元素含量适合植物营养的范围,Fe 为矿质元素是植物体内合成各种化合物的物质基础,其含量直接影响植物的生长、发育及其他代谢过程^[18],利用铁尾矿中含铁量明显高于一般土壤,如果植物能够吸收,在一定范围内的 Fe 对植物的生长具有促进作用。

表 4 不同尾矿处理对植物地上部分重金属含量

土壤组别	各种植物中重金属含量(mg/kg)															
	茼蒿				朝天委陵菜				大白菜				白菜			
	Fe	Cd	Cr	Pb	Fe	Cd	Cr	Pb	Fe	Cd	Cr	Pb	Fe	Cd	Cr	Pb
T ₀	34.29	—	—	—	23.11	—	—	—	22.07	—	—	—	29.32	—	—	—
T ₅₀	56.71	0.15	0.75	0.59	45.43	0.07	0.65	0.50	45.15	0.07	0.60	0.51	46.35	0.08	0.62	0.55
T ₆₀	62.18	0.12	0.46	0.47	57.20	—	0.40	0.42	57.61	—	0.41	0.39	58.19	—	0.43	0.41
T ₈₀	75.43	—	0.31	0.32	64.28	—	0.21	0.24	62.41	—	0.26	0.21	66.43	—	0.29	0.23
T ₁₀₀	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注:“—”表示未检出。

3 结论与讨论

剩余污泥作为土壤改良剂添加在铁尾矿中,改良后土壤理化性质符合土壤质量二级标准,可以种植植物。由盆栽试验可知,施加剩余污泥后的铁尾矿土壤均可以满足种子发芽的基本要求,4 种植物均能在 5 种土壤中发芽。其中 T₆₀组中的 4 种植物的出芽数均最高,而茼蒿的出芽率在 4 种植物中最高,达 57.33%,全部是尾矿的土壤 T₁₀₀组出芽率最低,仅朝天委陵菜达到 13.3%,其余 3 种植物都在 6.67%。整个生长周期中植物植株高度以及收获后植物的鲜质量以 T₆₀组最高,在同一土壤组中 4 种供试植物中茼蒿的植株高度和鲜质量最大。对收获后的各组植物地上部分进行重金属含量分析,发现改良土壤中重金属能从土壤中向植株中迁移,使得供试植物体内重金属在各个土壤改良组都有超标。其中,T₅₀组超标最严重,4 种植物 Pb、Cr 含量均超标;T₆₀组茼蒿体内 Pb、Cd 含量均超标,其余 3 种植物仅 Pb 含量超标;T₈₀组仅有茼蒿 Pb 含量超标,其余 3 种植物金属含量未超标。说明剩余污泥直接用于尾矿土壤改良使用会使植物残留重金属尤其是种植叶类蔬菜,如果要达到食用标准,还须对污泥进行处理降低污泥中重金属有效态含量,阻止其向植物中迁移。由于试验改良土壤中未外加肥料,导致植物生长后期未达到植物生长最佳要求,植物生长过程中除了 T₁₀₀组所有植物仅存活 20 d 以外,其他 4 组土壤组植物都能存活到收获期 35 d,其中 T₀、T₅₀、T₈₀组有部分植物黄叶、死亡情况。

参考文献:

[1] Lee S. Geochemistry and partitioning of trace metals in paddy soils affected by metal mine tailings in Korea[J]. Geoderma, 2006, 135: 26-37.
[2] Rodriguez L, Ruiz E, Alonso - Azcúrate J, et al. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb - Zn mine in Spain[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (2): 1106-1116.

[3] 常前发. 我国矿山尾矿综合利用和减排的新进展[J]. 金属矿山, 2010, 39(3): 1-5.
[4] 张国平, 刘从强, 杨元根, 等. 贵州省几个典型金属矿区周围河水的重金属分布特征[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 82-85.
[5] 苗莉, 徐瑞松, 朱照宇, 等. 河台金矿矿山土壤-植物系统微量元素地球化学和生物地球化学特征[J]. 地球与环境, 2008, 36(1): 64-71.
[6] 李艺. 有色多金属矿山砷污染对生态环境的影响及其治理分析[J]. 地球与环境, 2008, 36(3): 256-260.
[7] 陆欣. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
[8] 莫测辉, 蔡全英, 王江海, 等. 城市污泥在矿山废弃地复垦的应用探讨[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 44-47.
[9] 孙永明, 郭衡焕, 孙辉明, 等. 城市污泥在矿区废弃地复垦中应用的可行性研究[J]. 环境科学与技术. 2008, 31(6): 22-25.
[10] 刘美英, 高永, 汪季, 等. 污泥堆肥对矿区复垦土壤栽培基质保水能力的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 102-104.
[11] 罗根华, 饶猛刚, 王帅, 等. 煤矸石-土壤混合基质对小白菜生长的影响及 Pb 迁移规律[J]. 地球与环境, 2015, 43(1): 14-18.
[12] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
[13] 宋勤飞, 樊卫国. 铅胁迫对番茄生长及叶片生理指标的影响[J]. 山地农业生物科学, 2004, 23(2): 134-138
[14] 郭焕茹, 于海秋, 蒋春姬, 等. 低钾下不同耐性玉米苗期根形态及钾效率的差异[J]. 作物杂志, 2009(2): 62-65.
[15] Lu Y X, Li C J, Zhang F S. Transpiration, potassium uptake and flow in tobacco as affected by nitrogen forms and nutrient levels[J]. Annals of Botany, 2005, 95(6): 991-998.
[16] Li X T, Cao P, Wang X G, et al. Comparison of gas exchange and chlorophyll fluorescence of low potassium tolerant and sensitive soybean[*Glycine max* (L.) Merr.] cultivars under low potassium stress condition[J]. Photo synthetica, 2011, 49(4): 633-636.
[17] 戴树桂. 环境化学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
[18] 张文君. 矿质营养对矮牵牛生长开花的影响与推荐施肥研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.