

粉煤灰、城市污泥、尾矿砂配施用于无土排岩场生态修复人工土壤的持水性能研究

张鸿龄^{1,2,3}, 孙丽娜¹, 郝 栋⁴, 孙铁珩^{1,2}

(1. 沈阳大学环境工程重点实验室, 辽宁 沈阳 110041; 2. 沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 4. 东北大学, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要:通过模拟降雨及降雨后自然条件下的土壤表面水分蒸发,对粉煤灰、城市污泥及采自于铁矿山上的尾矿砂以不同比例配施用于无土排岩场生态修复人工土壤的持水性能进行了研究。结果表明,在不同配比的人工土壤中,粉煤灰与污泥比例为 1:2 的处理(Ⅳ)蓄水能力最强,饱和含水率比对照高 11%,但持水能力较低;随着污泥配施比例的增加,人工土壤的蓄水能力和持水能力都在增强(Ⅰ<Ⅱ<Ⅲ<Ⅳ),但当污泥与粉煤灰的配比达到 2:1 时,人工土壤的持水能力却出现下降趋势;添加了尾矿砂的处理Ⅴ(粉煤灰:污泥:尾矿砂=2:1:1),蓄水能力较低,但持水能力在所有处理中却最强。从总体能力上评价,粉煤灰与污泥配比为 1:1 的处理Ⅲ的持水和蓄水能力都较平衡稳定,性能最优,其次为粉煤灰与污泥配比为 2:1 的处理Ⅱ。

关键词:粉煤灰;城市污泥;尾矿砂;持水性能;排岩场

中图分类号:X171.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)01-0160-05

Water -holding Capacity of the Artificial Soil Composed of Fly Ash, Sewage Sludge and Mine Tailing for Ecological Repairing of Mining Junkyard

ZHANG Hong-ling^{1,2,3}, SUN Li-na¹, HAO Dong⁴, SUN Tie-heng¹

(1. Key Laboratory for Environmental Engineering, Shenyang University, Shenyang 110016, China; 2. Institute of Shenyang Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110041, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. North-East University, Shenyang 110004, China)

Abstract: To study the water -holding capacities of the artificial soil composed of fly ash, sewage sludge and mine tailing, which was applied to the abandoned rock mining junkyard reclamation, experiments were designed to simulate rainfall and natural evaporation. The results indicated that among all the artificial soils, the treatment Ⅳ (the ratio of fly ash to sewage sludge was 1:2) had the highest water -saturation coefficient, 11% higher than that of the CK treatment, but had a shorter water -holding time than other artificial soils. With the ratio of sewage sludge to fly ash increasing, the water -saturation coefficient and the water -holding capacity of the artificial soil became stronger (Ⅰ<Ⅱ<Ⅲ<Ⅳ), but when the ratio came to 2:1, the water -holding capacity decreased. The water -holding capacity of the treatment with mine tailing (fly ash: sewage sludge:mine tailing=2:1:1) was the strongest. In the whole, the treatment Ⅲ (the ratio of fly ash to sewage sludge was 1:1) had the best physical characteristic because of its stable and balanceable water -holding capacity, and the next was the treatment Ⅱ (the ratio of fly ash to sewage sludge was 2:1).

Keywords: coal fly ash; municipal sewage sludge; mine tailing; water -holding capacity; mining junkyard

矿山废弃地是在采矿活动中被破坏和占用,未经一定处理而无法使用的一类土地^[1]。据测算,全国采矿

业破坏土地面积为 14~20 万 km²,并以 200 km²·a⁻¹的速度在增加。而在我国铁矿中 85%是露天开采,其产生的绝大部分废弃物被随机混合堆置在排土场,排土场占地一般为矿山用地的 40%~55%,是铁矿山土地复垦的重点^[2]。然而由于排土场特别是无土排岩场主要由大小不等的石砾和废弃的矿渣组成,层序紊乱、物质松散、地表非均匀沉降与形变剧烈、径流紊乱、水

收稿日期:2007-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(20477029);辽宁省自然科学基金项目(20062002)

作者简介:张鸿龄(1979—),女,博士,主要研究方向为环境污染学。
E-mail:zh119792002@163.com

土流失严重,极易形成滑坡、泥石流等地质灾害^[3]。因此对于排岩场的生态修复意义重大,但是由于这类排岩场少土甚至无土,而碎岩、矿渣的风化时间又特别长,营养贫乏,生存环境恶劣,一般需要采取覆土的工程措施,即要覆盖大量粘土,然后种植植物覆盖边坡,使其稳定^[4]。我国大部分排岩场建在山区,土源本来就很少,多年采矿后取土也越来越困难,不少矿区已无土可取,他们甚至花费巨资购买耕地取土^[5]。但这种做法既解决不了矿山长期使用土源问题,又破坏我国宝贵的耕地资源,因此解决矿山修复中廉价而长期的土源问题是当务之急。

城市污泥是在污水处理过程中产生的固体废弃物,含有丰富的 N、P、K 和有机质,从养分含量方面看其可以用做良好的有机肥料^[6]。而粉煤灰中又含有大量 Ca、Si、B 等微量营养元素^[7],且物理性质诸如透气性、持水性和保温性良好。目前,我国年产粉煤灰约 11 535.66 万 t,占地 4 万 hm²^[8],城市污泥约 1 762.78 万 t,因此将城市污泥、粉煤灰、尾矿砂按照合理的比例配制成人工土壤,不但可以解决矿山修复中一直困扰着人们的土源问题,同时也实现了废物利用、变废为宝。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本实验所用对照土壤为采自中国科学院沈阳生态试验站(北纬 41°31',东经 123°241')的棕壤;粉煤灰(CFA)(CFA-coal fly ash)采自鞍山钢铁电力二厂储灰池,城市污泥(SS)(SS-sewage sludge)为采自鞍山北部污水处理厂的生化污泥,尾矿砂(OT)(OT-ore tailing)采自鞍山大孤山尾矿库。粉煤灰、城市污泥、尾

矿砂的基本理化性质见表 1;人工土壤为添加不同比例的粉煤灰、城市污泥和尾矿砂(不添加任何土壤)用于无土排岩场植物种植的配制土壤。

从实际应用出发,考虑到污泥的脱水风干过程不但耗费时间,而且在堆置过程中还会带来一系列环境问题,因此本试验选用污泥是经过短期放置而未风干的污泥(使其含水量保持在一定比例),然后与粉煤灰、尾矿砂按照表 2 中的比例(重量比)进行混合。

1.2 实验装置

实验所用的是一套自制组装的模拟自然降雨设备(图 1),主要由铁架台、木架、滴定管、塑料杯等组成,其中滴定管主要用于模拟降雨时向待测样品中均匀的加水。塑料杯选用直径为 8.5 cm 的硬质塑料杯,滴定管选用 50 mL 酸式滴定管,事先将其固定于特制的木架中,采用 6 支同时均匀向杯中滴水。在实验开始前首先在塑料杯底部均匀的扎出一些小孔,将待测样品放入塑料杯中,同时为防止泥土粘附在滤纸上,先在样品表面平铺一层大小适中的塑料纱网,然后在

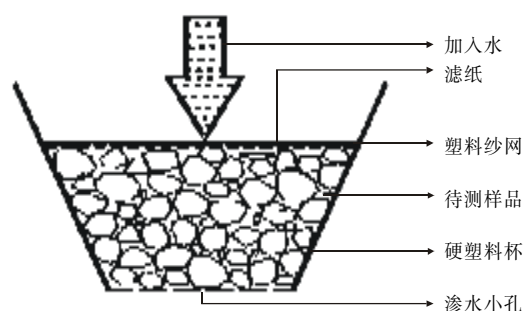


图 1 持水性能试验装置

Figure 1 The sketch of artificial soil water-holding capacity experiment

表 1 配比成份基本理化性质

Table 1 The basic physicochemical properties of the compositions

配比成分	有机质/%	碱解 N/mg · kg ⁻¹	速效 P/mg · kg ⁻¹	速效 K/mg · kg ⁻¹	含水量/%	pH	全 Cd/mg · kg ⁻¹	全 Pb/mg · kg ⁻¹	全 Ni/mg · kg ⁻¹
粉煤灰	2.66	3.15	75.47	169.49	7.54	10.88	0.66	38.36	281.64
城市污泥	36.69	216.71	129.10	1 531.43	81.01	7.65	3.71	362.84	206.35
尾矿砂	0.54	0.55	62.85	312.24	3.95	8.71	—	—	3.24

表 2 不同配比的人工土壤

Table 2 Artificial soil with different proportions of coal fly ash, sewage sludge and ore tailing

配比成分	处 理				
	I	II	III	IV	V
粉煤灰	3	2	1	1	2
城市污泥	1	1	1	2	1
尾矿砂	0	0	0	0	1

纱网上平铺一层滤纸(这样可以保证滴管滴下的水能先渗入滤纸后再均匀地渗入土壤中)。将塑料杯放入木架框中,当供试样品吸水饱和时,水便从杯底的小孔中渗出,此时立即停止滴水,待底部的小孔停止渗水时称重,然后将样品放在室内让其在自然条件下蒸发。

1.3 实验方法

1.3.1 蓄水性能测试方法

以模拟自然降雨及降雨后自然条件下的土壤表面水分蒸发来考察粉煤灰、城市污泥等城市固体废弃物用于矿山修复中无土排岩场人工土壤的持水性能。分别称取 40.00 g 粉煤灰(CFA)、城市污泥(SS)、尾矿砂(OT)、对照土壤(CK)和人工土壤,每一处理均取 3 次重复,按照 1.2 的方法加水至饱和时称重,同时计算土壤样品的饱和含水量及饱和含水率。模拟降雨强度为中雨 $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.3.2 持水性能试验

按照 1.2 方法待样品加水饱和后,将样品放于自然条件下蒸发,通过统计不同时间测试样品的质量来考察样品的持水能力。

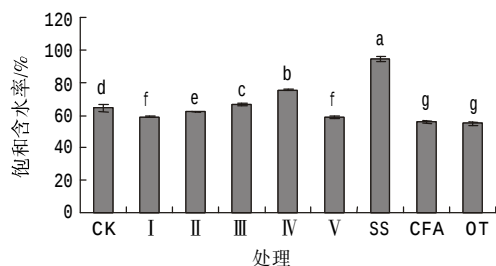
1.3.3 验证实验方法

为了进一步验证上述实验结果的准确性,同时设计了另外一组实验,即模拟等量水分蒸发实验。为了确保试验样品具有相同的蒸发面积和含水量,本文取了同样体积的待测样品(50 mL),加入等质量的水(10 g,各个样品持水量均未饱和),各处理均取 3 次重复,然后考察其水分的蒸发情况。

2 结果与分析

2.1 不同配比人工土壤的蓄水性能

图 2 显示了不同样品的饱和含水率,从图中可以看出,污泥的饱和含水率最高,为 94.48%。而粉煤灰与尾矿砂的饱和含水率都较低,且差异不显著。在不



注:字母不同表示差异达 0.05 显著水平。

图 2 不同配比人工土壤的饱和含水率

Figure 2 The water-saturation coefficients of artificial soils

同比例配比的人工土壤样品中,处理Ⅳ的饱和含水率最高,其次是Ⅲ,都高于对照。处理Ⅰ、Ⅱ和Ⅴ的饱和含水率低于对照,做差异显著性分析发现各配比人工土壤间差异极显著($P < 0.05$)。同时发现随着污泥施加比例的减少,人工土壤的饱和含水率也在降低($IV > III > II > I$),并且在所有配比土壤中添加 25%尾矿砂的处理Ⅴ的饱和含水率最低。处理Ⅱ和Ⅲ的蓄水性能较接近对照土壤。将所有处理的饱和含水率与其有机质含量做相关性分析发现,二者之间达到了极显著的线性正相关关系,相关系数为 0.917^{**} ($n=10$) (图 3)。

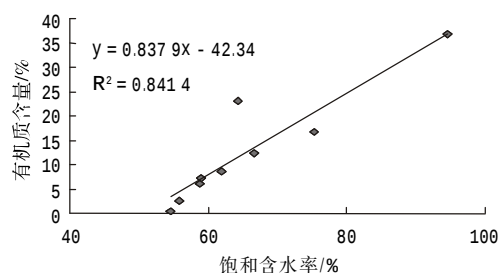


图 3 人工土壤饱和含水率与土壤有机质相关性分析

Figure 3 The relationship between water-saturation coefficients and the content of organic C

2.2 不同配比人工土壤水分的蒸发

水分是树木成活和生长最重要的限制性因子之一,要想在无土的排岩场上获得较佳的植物修复效果,使用和回填的人工土壤就必须具有良好的持水和保水性能。持水性能是土壤重要的物理性状,直接影响土壤持水性能的因素是土面蒸发,即土壤水以水气状态经土壤表面扩散到大气中而消失的过程,它是自然界水循环的重要一环^[9,10]。如果土壤水分蒸发较快,则易导致土壤水分的快速损失,造成地面干旱,影响植物的生长和成活。

从表 3 和图 4 中可以看出,各个样品间的持水能力和持水时间都差异较大。其中尾矿砂的水分蒸发最快,试验第 2 d 时水分蒸发了 64.31%,到第 3 d 时已经达到了 95.03%,水分基本蒸发殆尽,图 4 也表明尾矿砂的持水时间最短。污泥和粉煤灰的持水能力都较强,特别是污泥,在所有样品中其水分蒸发最慢(表 2),第 1 d 水分蒸发仅为 19.36%。不同配比的人工土壤中,处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ中随着污泥施用比例的增加,水分蒸发速度变缓,持水能力也呈上升趋势(表 3)。但是,当污泥与粉煤灰比例为 2:1 时,人工土壤Ⅳ的水分蒸发反而变强(表 3),持水时间也变短(图 4)。添加了尾矿砂的处理Ⅴ,其水分蒸发速率较缓,第 1 d 蒸发率为 25.65%,最接近于对照土壤的 22.94%。其他

表 3 等质量不同配比人工土壤的水分蒸发百分比

Table 3 The percentage of water evaporation in different artificial soils in equal quality

天数/d	CK	I	II	III	IV	V	SS	CFA	OT
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	22.94	42.73	34.24	26.17	26.64	25.65	19.36	41.28	64.31
3	37.89	65.46	53.54	41.20	41.30	41.60	20.98	70.30	95.03
4	44.89	73.95	60.58	47.30	48.42	47.03	32.27	79.84	95.58
5	48.14	79.31	64.30	52.79	52.62	50.08	38.43	84.33	95.89
9	65.01	93.97	80.89	70.47	72.71	59.40	40.88	86.31	97.60
10	68.29	99.29	82.35	75.11	78.74	59.85	42.16	86.38	100
12	70.98	99.74	82.96	81.17	87.85	60.11	43.12	86.51	
14	71.79	100	83.16	84.84	96.10	60.28	50.03	86.58	
15	72.00		83.21	85.63	100	60.36	56.78	86.65	
16	100		99.45	89.66		63.91	64.89	96.19	
18			100	98.59		78.28	71.69	96.80	
21				100		95.61	82.66	97.82	
22						100	94.06	100	
23							100		

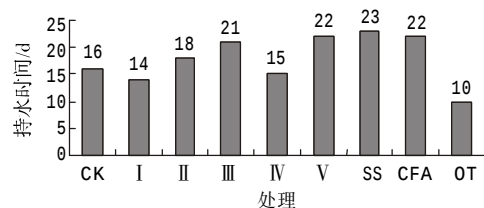


图 4 等质量不同配比人工土壤持水时间

Figure 4 Water-holding time of the artificial soil in equal quality

处理第 1 d 水分蒸发速度表现为 OT>I>FA>II>IV>III>CK>SS。

2.3 不同配比人工土壤持水时间

图 4 显示了不同配比人工土壤的持水时间,从图中可以看出污泥与粉煤灰的持水时间都很长,其中污泥的持水时间为 23 d,粉煤灰为 22 d。然而将二者按照一定比例配比后,所有配比土壤的持水时间都低于二者。与对照土壤相比,处理 I、IV 的持水时间低于 CK,而 II、III、V 的持水时间长于 CK,其中尤以处理 V 的时间最长,为 22 d,而处理 IV 最接近于 CK。

3 讨论

目前,对于城市固体废弃物用于矿山修复和土地复垦方面的研究在不断增多,然而这些研究往往都集中在废弃物的重金属污染和养分含量状况方面^[4,8,11-13],而对于其物理性质的研究较少,特别是对于废弃物配制成的人工土壤的持水性能可行性研究还尚未见报道。本文旨在以物理性质较优的草甸棕壤为

对照,通过模拟降雨和土面自然蒸发来比较研究人工土壤的持水性能。

结果表明,污泥的饱和含水率最高和持水时间最长,而且在人工土壤中随着污泥比例的提高,土壤的饱和含水率也在提高,而粉煤灰和尾矿砂的饱和含水率较低。这可能与污泥、粉煤灰和尾矿砂本身的成分及物理性质有关。粉煤灰是煤炭在 1 500℃ 以上燃烧时形成的固态产物,其主要成分为氧化硅和氧化钙,有机质含量较低(本实验所用粉煤灰有机质含量为 2.655%)。尾矿砂是矿石经粉碎并浮选中矿、精矿后余下的微粒状固体粉末^[7,14],有机质含量极低,仅有 0.535%,因此尾矿砂的饱和含水率在所有处理中也最低。而城市污泥中有机质含量较高(据本试验所测污泥有机质含量为 36.69%),大部分呈胶态,有机胶体具有较强的持水性能。做相关性分析发现,土壤的饱和含水率与有机质含量呈显著正相关(图 3)。

污泥中的水分蒸发最慢,并且随着污泥比例的增加,人工土壤的持水时间也在增长。可能是因为富含有机质的土壤蒸发失水需做较多的功,这显而有效抑制了土壤水分的蒸发。其次,还由于污泥粘度大、易结块,当污泥表面水分蒸发完后,顶层污泥便结成结实的硬块,阻止了下层土壤中的水分蒸发^[6,9,15]。因此,当污泥所占比例增加时,土壤中水分的蒸发变缓。然而当污泥与粉煤灰比例增加到 2:1 时,土面水分蒸发反而加快,持水时间也变短。这说明土壤的持水能力不仅与土壤成分有关,还与土壤的空隙度和结构有关。

粉煤灰中的碳和碳氢化合物在燃烧时受热生成大量气体,冲击其内部,使产生的硅酸盐与其他化合物一起呈现网状,在各粒子间形成孔隙,这些孔隙相互联结,形成无数条羊肠小道和星罗棋布的交通网。粉煤灰的组成以微细玻璃为主,细砂约占 80%,为球形或微珠的集合体,直径 1~100 μm , 具有较大的比表面积^[16]。城市污泥是一种质地较细的沉淀物,有效孔隙数量少,在粉煤灰中加入一定比例的污泥后,改善了粉煤灰的孔隙率和结构组合^[17,18],形成性能较佳的人工土壤孔隙结构。但是当污泥施加比例超过一定范围后,污泥中的 2:1 型层状粘土矿物与粉煤灰中的硅酸盐网状结构结合,紧密穿插于其中,使得粉煤灰中 Si-O-Si 键被包围,与水作用时,由于要克服这些矿物的阻挡,形成羟基的能力减弱,土壤的持水性能下降^[19],苏德纯等^[20]的研究结果也表明适量、适当比例的粉煤灰和钝化污泥能使土壤的饱和含水量和饱和导水率提高。

4 结论

(1)在所有人工土壤中,粉煤灰与城市污泥比例为 1:2 处理(Ⅳ)的饱和含水率最高,但是水分蒸发也最快,持水时间最短。

(2)随着污泥配施比例的增加,人工土壤的蓄水能力和持水能力都在增强(Ⅰ<Ⅱ<Ⅲ<Ⅳ),但当污泥与粉煤灰的配比达到 2:1 时,人工土壤的持水能力却出现下降趋势。

(3)尽管尾矿砂的饱和含水率和持水能力都是最低,但人工土壤中配施了尾矿砂后,其持水时间却在所有处理中最长。

(4)从总体趋势看,粉煤灰与污泥比例为 1:1 时(处理Ⅲ)的蓄水能力和持水能力都较强,且较平衡稳定,因此其持水性能最优,其次为粉煤灰与污泥比例 2:1 的Ⅱ号人工土壤。

参考文献:

- [1] 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].生态学报,2001,20(2):44-47.
- [2] Li M S. Ecological restoration of mine land with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice[J]. Sciences of the Total Environment, 2006, 357:38-53.
- [3] 范军富,李忠伟.露天煤矿排土场土地复垦及其生态学原理[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(3):313-315.
- [4] Bradshaw A D. The use of natural processes in reclamation-advantages and difficulties[J]. Landsc Urban Plan, 2000, 51:89-100.
- [5] 代宏文,周连碧.尾矿库边坡植被生态稳定技术研究[J].矿冶,2002,11:257-260.
- [6] 莫测辉,吴启堂,周友平,等.城市污泥对作物种子发芽及幼苗生长影响的初步研究[J].应用生态学报,1997,8(6):645-649.
- [7] 吴家华,董云中,刘宝山.粉煤灰中有害元素对土壤、粮食影响的初步评价[J].土壤学报,1995,32(2):194-201.
- [8] 周学武,孙岱生,房建国,等.利用矿山固体废弃物(粉煤灰、淤泥及污泥)改良矿山退化土地及种植实验[J].资源·开发,2005,7(3):61-64.
- [9] 霍晓君,李 祯,李胜荣,等.粉煤灰和城市污泥配施改良荒漠土壤的持水性影响研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(6):168-172.
- [10] Masumi Mitsuno, Kazue Tazaki, Fyfe W S, et al. Influence of coal ash on microorganisms and applicability of coal ash to remediate desertified land in Inner Mongolia of China [J]. Clay Science, 2001,11:503-515.
- [11] Abbott D E, Essington M E, Mullen M D, et al. Fly ash and lime-stabilized biosolid mixture in mine spoil reclamation: simulated weathering [J]. J Environ Qual, 2001,30:616.
- [12] 陈萍丽,赵秀兰.城市污泥及其资源化利用[J].微量元素与健康研究,2006,23(1):54-56.
- [13] 郝秀珍,周东美.金属尾矿砂的改良和植被重建研究进展[J].土壤,2005,37(1):13-19.
- [14] Jackson B P, Miller W P. Soil solution chemistry of a fly ash-, poultry litter-, and sewage sludge-amended soil[J]. J Environ Qual, 2000, 29:430-436.
- [15] 陈 玲,赵建夫,李宇庆,等.城市污水厂污泥快速好氧堆肥技术研究[J].环境科学,2005,26(5):192-195.
- [16] Navas A, Bermudez F, Machin J. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols [J]. Geoderma, 1998,87(1/2):123-135.
- [17] 陈同斌,高 定,李新波.城市污泥堆肥对栽培基质保水能力和有效养分的影响[J].生态学报,2002,22(6):802-807.
- [18] Martens D A, Frankenberger W T Jr. Modification of infiltration rates in an organic-amended irrigated soil [J]. Agron J, 1992,84(4):707-717.
- [19] 张鼎华,翟明善,贾黎明,等.沙地土壤种植杨树-刺槐混交林后持水特性变化的研究[J].应用生态学报,2002,13(8):971-974.
- [20] 苏德纯,张福锁, Wong J W C. 粉煤灰钝化污泥对土壤理化性质及玉米重金属累积的影响[J].中国环境科学,1997,17(4):322-325.