

试验研究

# 污泥不同处理的复混基质在矸石山复垦中的应用研究

田卉宇<sup>1</sup>, 刘荷芳<sup>2</sup>, 郁东宁<sup>2</sup>, 秦岭<sup>2</sup>, 曹庆琴<sup>2</sup>, 王建立<sup>2</sup>

(1.同煤大唐塔山煤矿有限公司,山西大同 037001;2.北京农学院,北京 102206)

**摘要:**将三种不同处理的污泥(脱水污泥、腐熟污泥和冻融污泥)分别与煤矸石、粉煤灰和土壤配制成不同复混基质用于矸石山复垦,进行了基质理化性质的分析以及沙生草草[*Agropyron desertorum* (Fisch.) Schult.]和无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss.)两种禾本科植物的种植试验。结果表明:无土复混基质 B2(腐熟污泥:煤矸石:粉煤灰配比分别为 30:60:10:0)的理化性质优于其余基质,更有利于植株生长,又能节约成本。

**关键词:**脱水污泥;腐熟污泥;冻融污泥;煤矸石;粉煤灰;复垦

中图分类号:S156.99 文献标识码:A 文章编号:1006-8759(2015)03-0021-05

## APPLICATION STUDY OF COMPOUND-MIXED SUBSTRATES THROUGH DIFFERENT SLUDGE TREATMENTS ON COAL GANGUE RECLAMATION

TIAN Hui-yu<sup>1</sup>, LIU He-fang<sup>2</sup>, YU Dong-ning<sup>2</sup>, QIN Ling<sup>2</sup>, CAO qing-qin<sup>2</sup>, WANG Jian-li<sup>2</sup>

(1.Datong coal mine group co., LTD, Datong, Shanxi 750021 China;2.College of Landscape Architecture, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206 China)

**Abstract:**Compound-mixed substrates consisted of different treated sludge (dewatered sludge, compost sludge or freeze-thaw sludge), coal gangue, fly ash and soil were used for coal gangue mountain reclamation. The physical and chemical properties were analyzed and cultivation experiment of two kinds of gramineous plants including *Agropyron desertorum* (Fisch.) Schult. and *Bromus inermis* Leyss. was implemented. The results showed that the physical and chemical properties of compound-mixed substrate B2 (the quality ratio of compost sludge, coal gangue, fly ash and soil was 30:60:10:0) were better than other substrates, and were more beneficial to the growth of plants, and saved cost.

**Key words:**Dewatered sludge;Compost sludge;Freeze-thaw sludge;Coal gangue;Fly ash;Reclamation

煤矸石是矿井开采和洗煤排放的废弃物,是矿区环境污染和恶化的主要原因之一<sup>[1]</sup>。目前我国堆存的煤矸石量约 50 亿 t,煤矸石堆积不仅大量

占压土地,使其失去利用价值,更主要是通过扬尘、自燃、雨水淋溶等方式导致严重的土地、水体、空气和景观污染<sup>[2-3]</sup>。污泥是由有机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均质体,城市污水污泥中含有植物所需的氮、磷、钾以及大量有机质,污泥施用到土地以后,可提高植物的生物量<sup>[4-5]</sup>。污泥中营养成分丰富,因此污泥的无

收稿日期:2015-02-06

资助项目:大同煤矿集团公司 2012 年科研项目“综合利用污水厂污泥实施无客土绿化种植技术的研究”(2054115086)。

第一作者简介:田卉宇(1968—),山西河曲人,工程师,主要从事环保研究。

害化利用尤为重要。我国粉煤灰年排放量达 2 亿多吨,综合利用形势十分严峻。粉煤灰粒细质轻,疏松多孔,表面能高,具有一定的活性基团和较强的吸附能力,可有效降低污泥中重金属活性<sup>[6]</sup>。

污泥、煤矸石和粉煤灰等固体废弃物是矿区环境污染的主要来源。如何变废为宝将其作为农业资源加以利用是目前研究的热点。利用污泥、煤矸石、粉煤灰进行复垦种植和园林绿化是一种有效的利用途径<sup>[7-8]</sup>。本研究通过不同复混基质理化性质的测试和两种禾本科植物种植的试验,摸索合理基质配比,为矿区矸石山生态修复提供参考。

## 1 试验区概况

试验区位于山西省大同市南郊区的同煤大唐塔山煤矿,矿区存在大量由煤矸石堆积而成的煤矸石山。该区属大陆性季风气候,四季分明,冬长夏短,无霜期 150.9 d 左右,气候干旱多风,盛行西北季风。夏季平均气温为 19~21.8 °C,冬季平均气温为-12.8~-6.3 °C,季温和昼夜温差显著。年平均相对湿度 46~52%;年平均降水量 394.6 mm,多集中在 7、8、9 月;年平均蒸发量为 1 885.1~2 386.3 mm,为降水量的 4~5 倍<sup>[9]</sup>。

## 2 试验材料

### 2.1 供试植物

试验选取沙生冰草 [Agropyron desertorum (Fisch.) Schult.] 和无芒雀麦 (Bromus inermis Leyss.) 作为供试植物。沙生冰草是多年生禾本科植物,耐旱能力较强,不仅各种牲畜喜食,而且在改良沙地草场、建植人工草地方面是一种有价值的优良牧草。无芒雀麦也是多年生禾本科植物,根系发达,再生性强,耐践踏,是优良的放牧型牧草。沙生冰草和无芒雀麦可作为该地区退化生态系统修复的先锋植物。沙生冰草和无芒雀麦种子从北京中畜东方草业科技有限责任公司购买,纯净度分别为

95%和 98%,发芽率均为 85%。

### 2.2 供试基质

供试基质选用矿区常见的几种固体废弃物:脱水污泥取自同煤生活污水处理厂;腐熟污泥为经过堆肥处理的污泥;冻融污泥为经过冬季低温冻融处理的污泥;煤矸石取自同煤塔山煤矿;粉煤灰取自同煤塔山电厂;土壤取自煤矸石场附近的山坡。不同供试基质的重金属含量和基本理化性质见表 1 和表 2。

表 1 不同供试基质的重金属含量

供试基质	砷	镉	铬	铜	汞	镍	铅
脱水污泥	16.28	0.39	153.75	64.64	<0.01	22.52	19.35
腐熟污泥	<0.01	0.33	55.23	40.82	<0.01	18.60	15.35
冻融污泥	<0.01	0.37	28.17	47.10	<0.01	8.39	10.89
煤矸石	2.41	0.01	26.72	11.27	0.08	6.75	14.92
粉煤灰	<0.01	0.04	20.57	31.86	0.04	13.24	52.52
土壤	18.55	<0.01	38.79	12.86	<0.01	22.33	9.60
标准 1	75	20	1000	1500	15	200	1000
标准 2	75	20	1000	1500	15	200	1000
标准 3	75	10	500	500	-	300	500

注:①以上表中单位均为:mg/kg<sup>-1</sup>。②标准 1 指《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》(GB/T24600-2009)对中性及碱性土壤的相应限值;标准 2 指《城镇污水处理厂污泥处置土地改良用泥质》(CJ/T291-2008)对中性及碱性土壤的相应限值;标准 3 指《农用粉煤灰中污染物控制标准》(GB 8173-87 1988)对中性及碱性土壤的最高允许含量。

本研究所采用的污泥均为生活污水污泥,根据表 1 可知,试验选用的脱水污泥、腐熟污泥和冻融污泥中相关重金属含量均远低于《城镇污水厂污泥处置土地改良用泥质》(GB/T24600-2009)和《城镇污水处理厂污泥处置土地改良用泥质》(CJ/T291-2008)的限值。粉煤灰中的重金属含量远低于《农用粉煤灰中污染物控制标准》(GB 8173-87 1988)对中性及碱性土壤的最高允许含量。

表 2 不同供试基质的理化性质

供试基质	含水率/%	pH 值	EC 值/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}$ )	有机质/%	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	碱解氮/(mg·kg)	速效磷/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)
脱水污泥	75.71	7.65	3130	56.11	27.93	21.42	2590	806.11	1837
腐熟污泥	9.32	7.12	2087	46.02	26.75	21.83	2844	810.75	1852
冻融污泥	48.28	7.08	3645	41.36	23.58	19.97	2537	775.23	1791
煤矸石	3.04	8.73	89.01	12.73	1.24	1.21	21	8.66	126
粉煤灰	15.27	10.67	178.09	1.90	0.41	2.94	14	134.55	38
土壤	8.04	8.77	123	2.3	0.22	0.47	28	18.34	69.5

### 3 试验方法

#### 3.1 试验设计

本试验共有 7 种基质,见表 3,其中土壤为对照(CK)。每个种植小区长 2 m,宽 1.3 m,面积为 2.6 m<sup>2</sup>。将各复混基质覆于平整好的煤矸石山梯田上,基质厚度为 40 cm。2013 年 7 月 4 日,采用条播方式播种。7 种基质均种植沙生冰草和无芒雀麦两种禾本科植物,共 14 个处理,重复 3 次。种植前对基质的容重、总孔隙度、田间持水量、pH 值、电导率以及有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量进行测定。植物出苗后开始记录出苗情况并计算田间出苗率;两个月后测定植物的株高和根长。

表 3 不同复混基质的质量配比

复混基质	土壤	煤矸石	粉煤灰	污泥		
				脱水污泥	腐熟污泥	冻融污泥
CK	100	-	-	-	-	-
A1	30	30	10	30	-	-
A2	30	30	10	-	30	-
A3	30	30	10	-	-	30
B1	-	60	10	30	-	-
B2	-	60	10	-	30	-
B3	-	60	10	-	-	30

注:以上表中单位均为:%。

#### 3.2 测定方法

基质 pH 值采用电位法;EC 值采用电导法;含水率和田间持水量采用烘干法;容重和总孔隙度采用环刀法;有机质采用重铬酸钾法;全氮采用凯氏定氮法;碱解氮用碱解扩散法;全磷和速效磷采用钼锑抗比色法;速效钾采用火焰光度计法;重金属采用电感耦合等离子体发射光谱法<sup>[10]</sup>。

#### 3.3 数据处理

本试验采用 Microsoft Excel 2007 和 Microsoft Word 2007 处理数据并制作图表,采用 SPSS17.0 进行方差分析。

### 4 结果与分析

#### 4.1 不同复混基质的理化性质分析

土壤容重会对土壤有效水分、导热率、气体比例等造成影响,最终影响植物的产量<sup>[11,12]</sup>。不同复混基质的田间持水量、容重和总孔隙度测定结果见表 4。从表 4 可以看出:各复混基质的容重和总

孔隙度差异不显著,但容重均显著低于对照 CK,总孔隙度均显著高于对照 CK。可见,复混基质在容重和总孔隙度方面都优于对照土壤,这主要是由于煤矸石的添加提供给复混基质较多的孔隙和裂缝,增加了孔隙度。从田间持水量来看,A 类有土复混基质的田间持水量都比对照 CK 高。其中,脱水污泥的基质 A1 最高,与对照 CK 差异显著。脱水污泥与腐熟污泥和冻融污泥相比具有更强的保水性。B 类无土复混基质的田间持水量都比对照 CK 低,这是复混基质所含煤矸石的比例较大并且无土所致。

表 4 不同复混基质的物理性质

复混基质	容重/(g/cm <sup>3</sup> )	总孔隙度/%	田间持水量/%
CK	1.51±0.03a	43.14±0.95b	20.61±0.82bc
A1	1.27±0.04b	52.15±1.43a	23.45±0.03a
A2	1.26±0.03b	52.41±1.00a	21.77±0.13ab
A3	1.28±0.01b	51.61±0.03a	22.12±0.05ab
B1	1.20±0.02b	54.56±0.79a	19.54±0.19cd
B2	1.17±0.01b	55.73±0.04a	18.40±0.48d
B3	1.26±0.09b	52.52±3.38a	19.33±0.95cd

注:数据为平均值±标准误(n=3),同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05),下同。

不同复混基质的化学性质见表 5。从表 5 可以看出:由于污泥有机质及氮、磷、钾含量高,各复混基质的营养元素和有机质含量均高于对照 CK。B 类无土基质的有机质、速效钾含量高于 A 类有土基质。在 A 类有土基质中,氮、磷、钾、有机质含量排序基本为 A1>A3>A2。在 B 类无土基质中,氮、磷、钾、有机质含量排序与 A 类基质基本相似,顺序为 B1>B3>B2。

EC 值是反映土壤中可溶性盐类浓度,高浓度的可溶性盐类会使植物受到损伤或造成植株根系的死亡。各复混基质的 EC 值均高于对照 CK。B 类无土基质中 B1、B3 的 EC 值均高于 A 类有土基质。除对照土壤外,添加腐熟污泥的无土基质 B2 的 EC 值最低。据报道,当 EC 值高于 0.5 mS/cm<sup>-1</sup> 时标志着土壤盐分开始超标<sup>[13]</sup>。本研究中各基质的 EC 值与对照土壤相比有所增加,但均小于 0.5 mS/cm<sup>-1</sup>,说明盐分浓度在一定程度上控制在安全水平内。

从表 5 还可以看出,对照 CK 的 pH 值达到 8.63,抑制植物的生长,其它基质的 pH 和对照相

表 5 不同复混基质的化学性质

复混基质	pH 值	EC 值/( $\mu$ S/cm)	有机质/%	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	碱解氮/(mg/kg)	速效磷/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)
CK	8.63±0.01a	123.00±0.12f	2.30±0.06e	0.28±0.01f	1.05±0.02d	27.82±0.01e	193.00±2.28f	69.50±0.87f
A1	7.98±0.04d	357.00±0.58b	10.73±0.08c	2.69±0.01c	1.24±0.04c	202.55±4.26b	466.30±10.06b	388.50±0.29c
A2	8.12±0.05c	235.50±1.44d	8.52±0.12d	1.39±0.01e	1.11±0.03d	90.53±4.18d	195.37±3.07f	318.50±0.87e
A3	8.27±0.02b	242.00±1.73d	11.00±1.47±0.01e	1.47±0.01e	1.24±0.04c	97.46±0.09d	208.69±5.82e	320.50±0.87e
B1	7.85±0.01f	375.50±12.41a	16.67±0.29a	3.62±0.01a	2.12±0.01a	327.56±11.95a	603.42±1.09a	464.50±0.87a
B2	8.20±0.04bc	211.50±1.44e	15.91±0.16b	2.52±0.12d	1.13±0.03d	132.18±4.01c	247.57±5.04d	369.50±1.44d
B3	8.24±0.02b	263.00±2.89c	16.57±0.06a	3.09±0.07b	1.43±0.03b	228.10±3.63b	397.31±1.99c	457.00±1.15b

比均有所降低,其中添加脱水污泥的 B1 和 A1 最低,其次是添加腐熟污泥的 A2 和 B2,添加冻融污泥的 A3 和 B3 也与对照差异显著。说明污泥的添加有效降低了基质的 pH 值,有利于植物的生长。

#### 4.2 不同复混基质对植物田间出苗率的影响

不同复混基质对无芒雀麦和沙生冰草出苗率的影响情况见表 6。由表 6 可知,无芒雀麦和沙生冰草在不同复混基质中的出苗率差异显著。无芒雀麦在七种基质中的出苗率按从大到小排序为 CK>A2>B2>B1>A1>B3>A3;沙生冰草在七种基质中的出苗率按从大到小排序为 CK>A2>B2>A1>B1>B3>A3。

表 6 不同复混基质对两种植物田间出苗率的影响

复混基质	无芒雀麦	沙生冰草
CK	74.46±0.43a	62.81±1.2a
A1	56.9±0.91c	41.79±2.8c
A2	64.48±1.15b	51.05±2.5b
A3	29.23±1.17e	26.49±0.76d
B1	57.83±2.3c	41.57±1.81c
B2	62.39±1.89b	48.23±2.43b
B3	38.2±1.36d	28.41±2.25d

结果表明,两种植物对照处理的出苗率显著高于其它处理,这是由于对照 CK 基质保水效果好,EC 值低。添加腐熟污泥的复混基质 A2 和 B2 的出苗率高于添加脱水污泥和冻融污泥的复混基质,腐熟污泥对种子萌发的影响最小。脱水污泥的添加会增加基质的粘度,从而阻碍幼苗的破土。冻融泥溶解性污染物增加,碱性提高<sup>[10,11]</sup>,对发芽有影响。无芒雀麦在各基质上的出苗率高于沙生冰草的出苗率,其种子显示出更强的适应性。

#### 4.3 不同复混基质对植物生长的影响

表 7 从株高和根长两方面比较了不同复混基质对植物生长的影响。由表 7 可知,不同复混基质对无芒雀麦和沙生冰草的株高和根长都存在影响,且影响效果不同。从株高来看,两种植物在不同复混基质中的株高均高于在对照土壤中的株高。对照土壤和不同复混基质按无芒雀麦株高从大到小的排序为 A2>A1>B1>B2>B3>A3>CK。对照土壤和不同复混基质按无芒雀麦株高从大到小的排序为 A2>A1>B1>B2>A3>B3>CK。其中添加冻融污泥的复混基质 A3 和 B3 与对照土壤相比无明显差异,可能是由于冻融污泥溶解性污染物增加,碱性提高。两种植物在 A2、A1、B1 和 B2 中的株高均与对照土壤中的株高差异显著,说明腐熟污泥和脱水污泥都能促进牧草地上部分的生长,有土复混基质 A2 对株高的促进作用最大。

表 7 不同复混基质对植物株高和根长的影响

植物	复混基质	株高/cm	根长/cm
无芒雀麦	CK	25.69±0.73e	15.23±0.19b
	A1	50.46±1.56b	18.00±1.43ab
	A2	59.48±2.10a	16.72±0.84b
	A3	27.24±3.09de	15.28±1.00b
	B1	46.14±0.99bc	18.70±1.51a
	B2	41.30±1.34c	16.22±1.62b
	B3	31.84±2.45d	15.40±0.87b
沙生冰草	CK	21.65±2.06c	15.03±1.36bc
	A1	40.29±0.78b	12.90±1.29c
	A2	48.17±1.29a	13.72±0.72c
	A3	22.63±1.90e	17.80±1.02ab
	B1	38.94±0.97b	15.48±0.44bc
	B2	36.87±2.14b	14.72±0.95bc
	B3	21.92±0.99c	18.98±1.45a

从根长来看,无芒雀麦在不同复混基质中的根长均大于在对照土壤中的根长,对照土壤和不同复混基质按无芒雀麦根长从大到小的排序为  $B1>A1>A2>B2>B3>A3>CK$ 。沙生冰草与无芒雀麦不同,对照土壤和不同复混基质按沙生冰草根长从大到小的排序为  $B3>A3>B1>CK>B2>A2>A1$ 。复混基质 A3 和 B3 更能促进沙生冰草地下部分的生长,其它基质的根长与对照相比差异不明显。

## 5 结论

多种固体废弃物综合用于矸石山复垦,不但可以弥补单一物质的复垦缺陷,还能同时实现资源再利用。污泥施用对于林地与园林绿地等不牵涉食物链的植物来说,不会威胁生物体安全,风险性较小;对于远离人口密集区的森林地,安全性更高;对于缺乏养料的荒山、荒地、废弃地等,污泥中大量的 N、P、K 和有机质等也可以得到充分利用<sup>[16,17]</sup>。本试验所用供试基质的重金属含量均满足国家规定的相应标准,且试验区为远离居住区的煤矸石山,避免了环境污染。

田间出苗率表示的是种子对土壤环境的适应情况。无芒雀麦和沙生冰草在基质中田间出苗率偏低,其原因可能是矿区的恶劣的自然条件影响种子萌发,而且丰富的营养也影响了种子萌发。添加冻融污泥的复混基质其植物田间出苗率最低,可见冻融污泥对种子萌发有抑制作用。腐熟污泥对种子萌发的影响最小,添加腐熟污泥的复混基质 A2 和 B2 的田间出苗率最高。

植物的株高和根长是衡量植物生长情况的重要指标。由于对照土壤养分含量低,植物生长指标一般低于其它处理。由于冻泥溶解性污染物增加,碱性提高<sup>[14,15]</sup>,添加冻融污泥的复混基质的植物生长指标一般比较低。两种植物在添加腐熟污泥的复混基质 A2 和 B2 中生长状况最好,其中添加腐熟污泥的无土复混基质 B2 不但养分含量较高,而且 EC 值显著低于其它复混基质,其环境更适

于植物生长。结合矸石山复垦现状,无土复混基质能节省人力、物力和财力,并且避免了采土过程对环境的再次破坏,复混基质 B2 可作为此次试验的最优基质。无芒雀麦分蘖能力强,生长旺盛,表现最好,沙生冰草次之。无芒雀麦和沙生冰草均可作为矿区矸石山复垦的先锋植物推广。

## 参考文献

- [1]胡振琪,张光灿,魏忠义,等.煤矸石山的植物种群生长及其对土壤理化特性的影响[J].中国矿业大学学报,2003,32(5):491-499.
- [2]王玖玲,董文彬,陈民.中国煤矸石堆存现状的统计分析[J].煤炭加工与综合利用,2014(1):61-64.
- [3]胡振琪.半干旱地区煤矸石山绿化技术研究[J].煤炭学报,1995,20(3):322-327.
- [4]岳星慧.城市污泥在园林植物上的应用试验研究[J].宁夏农林科技.2006,39(3):15-26.
- [5]Labrecque M, Teodorescu T I, Daigle S. Biomass productivity and wood energy of Salix species after 2 years growth in SRIC fertilized with wastewater sludge. Biomass and Bioenergy. 1997,12(6):409-417.
- [6]徐加庆.粉煤灰钝化城市污泥中重金属赋存形态及其生物有效性的研究[D].华侨大学,2012.
- [7]韩朝,常智慧.城市生活污水对绿地植物生长和生理的影响[J].草业科学,2014,31(4):641-649.
- [8]赵广琦,沈烈英,王智勇,等.城市污泥堆肥对 12 种花灌木生长的影响[J].西北林学院学报,2011,26(5):87-90.
- [9]高清兰,张国勇,李海平,等.大同市 2013 年气候特征分析及影响评估[J].安徽农业科学,2014,42(23):7963-7966, 8013.
- [10]鲍士旦.土壤农化分析[M].中国农业出版社,1999,12.
- [11]陈同斌,罗维,高定,等.混合堆肥过程中容重的层次效应及动态变化[J].环境科学,2004,25(5):143-145.
- [12]李慧君,殷宪强,谷胜意,等.污泥及污泥堆肥对改善土壤物理性质的探讨[J].陕西农业科学,2004,(1):29-31.
- [13]许安民,张英利,李紫燕,等.西安地区日光温室土壤养分与盐分累积状况[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):193-196.
- [14]胡凯,赵庆良,邱微.冷冻预处理对剩余污泥性质的影响研究[J].水工业市场,2011,(6):37-41.
- [15]李玉瑛,李冰.冷融技术对剩余污泥的调理研究[J].工业水处理,2012,32(8):56-58.
- [16]刘颂颂,吕浩荣,莫罗坚,等.城市生活污水在林业上的应用综述[J].广东园林.2007,29(S1):23-25.
- [17]任宏英.北京市城市污水厂污泥利用途径的研究[硕士学位论文].北京工业大学,2003.