

# 磷石膏基质改良配方筛选及多年生黑麦草生长特性研究

向仰州, 刘 方, 巍 巍, 吴永贵

(贵州大学 资源与环境工程学院 贵州 贵阳 550003)

**摘 要:** 根据赤泥、粉煤灰和污泥的理化互补特性, 采用正交设计法将三者制成 9 种复合基质改良磷石膏, 旨在筛选出适宜多年生黑麦草生长的最优配方。通过对多年生黑麦草的生长特性以及磷石膏基质的物理性质作多重比较分析、极差分析、方差分析、主成分分析以及聚类分析。结果表明: 添加改良剂的磷石膏物理性质得到较大改善, 多年生黑麦草长势更好; 赤泥、粉煤灰、污泥的最佳配比是 1:2:10; 9 种配方可以划分为 4 个等级。

**关键词:** 磷石膏; 多年生黑麦草; 植物修复; 主成分分析; 聚类分析

**中图分类号:** X 705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0009(2010)02-0090-04

磷石膏是磷矿加工厂提取磷酸后排放的固体废弃物之一, 因含有微量重金属, pH 较低, 受雨水淋失易对磷石膏堆场周围水体、土壤等环境造成污染<sup>[1]</sup>。贵州是磷矿资源大省, 随磷化工快速发展产生大量的磷石膏对该地区造成巨大的环境压力。因此, 开辟磷石膏资源化利用具有重大意义。目前磷石膏利用研究主要集中在生产建材<sup>[2-3]</sup>、改良土壤方面<sup>[4]</sup>, 磷石膏用量有限。采用植物修复磷石膏堆场, 初期既可减少磷石膏中有害物质污染水体和土壤, 又能绿化矿区、改善空气质量, 后期修复则可生产磷石膏生态砖、草坪花卉基质, 实现磷石膏的资源化利用。植物修复磷石膏的首要工作是改善其理化特性以适宜植物生长。磷石膏颗粒细小、透气保水性能差、酸性强, 添加的改良剂必须具备一定的碱性、富含养分、有益微量元素、疏松多孔等特性, 而赤泥<sup>[5]</sup>、粉煤灰<sup>[6]</sup>、污泥<sup>[7]</sup>混合施用能够满足这些需求。该试验采用来源渠道广、运输便利的赤泥、粉煤灰和污泥对磷石膏进行改良试验, 为磷石膏植物修复提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)品种 首相 购自美国百绿有限公司北京代表处百绿(天津)国际草业有限公司; 磷石膏取自贵州瓮福集团磷石膏堆场; 污泥取自贵阳市某污水处理厂; 粉煤灰取自贵阳电厂粉煤灰堆

场; 赤泥取自贵州铝厂赤泥堆场。

### 1.2 试验方法

将磷石膏、粉煤灰、赤泥、污泥在室内风干, 剔除石块、草屑等, 分装在清洁尼龙袋内备用。采用  $L_9(3^3)$  正交试验设计(见表 1)配置改良磷石膏基质。配制时必须先往磷石膏中加粉煤灰, 再加赤泥, 最后加污泥, 此添加顺序有助于粉煤灰、赤泥和污泥与磷石膏混匀。磷石膏用量: 800 g/盆。

将不同改良磷石膏基质装入塑料花盆(20 cm×20 cm×15 cm)中, 每个处理 3 次重复。基质稳定 1 周后播种多年生黑麦草子 20 粒/盆。播种完毕立即浇水, 确保 10 cm 深处基质相对含水量为最大田间持水量的 70%左右, 以后视基质干湿度浇水, 满足草种发芽、植株生长需水。试验按照其田间管理进行, 定期观察多年生黑麦草生长并作相关记录。试验时间从 2007 年 10 月至 2008 年 9 月。

表 1 正交试验设计因素水平表

处理	A 赤泥/g·盆 <sup>-1</sup>	B 粉煤灰/g·盆 <sup>-1</sup>	C 污泥/g·盆 <sup>-1</sup>	组合
CK	0	0	0	—
T <sub>1</sub>	5	10	50	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>
T <sub>2</sub>	5	20	75	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
T <sub>3</sub>	5	30	100	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>
T <sub>4</sub>	10	10	75	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>
T <sub>5</sub>	10	20	100	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>
T <sub>6</sub>	10	30	50	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>
T <sub>7</sub>	15	10	100	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>
T <sub>8</sub>	15	20	50	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>
T <sub>9</sub>	15	30	75	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>

### 1.3 指标测定

多年生黑麦草生长特性指标: ①分蘖率(%)= 分蘖总数/植株总数×100; ②株高, 随机测量 5 株多年生黑麦草的株高, 求平均值; ③叶面积, 随机测量 5 株多年生黑

第一作者简介: 向仰州(1983—), 男, 贵州晴隆人, 硕士, 现主要从事污染环境的生物修复研究工作。E-mail: yzhxiang18@126.com。

通讯作者: 刘方(1964—), 男, 贵州天柱人, 博士, 教授, 现主要从事土壤生态学的研究工作。E-mail: lfang123@tom.com。

基金项目: “973 计划”前期研究专项基金资助项目(2008CB417209)。

收稿日期: 2009-09-20

麦草叶片的叶面积, 求其平均值;④穗数;⑤穗长, 选取 5 株具有代表性的多年生黑麦草, 求其平均值;⑥穗干重;⑦地上部干重。不同配方磷石膏改良基质物理性质指标:①容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );②总孔隙度(%);③毛管孔隙度(%);④非毛管孔隙度(%);⑤孔隙比;⑥三相比;⑦饱和含水量(%), 具体测定方法详见文献[8]。

1.4 数据处理

各指标数据的方差齐性用 Bartlett 法检验, 处理间的差异显著性用方差分析(ANOVA)测验;处理间平均数差异显著性的多重比较采用 Duncan's 新复极差法。所有数据分析采用 DPS2000 统计分析软件包[9] 进行。

2 结果与分析

2.1 磷石膏改良基质中多年生黑麦草生长性状

分蘖率越大, 植物的盖度越大。表 2 分蘖率多重比较结果表明,  $T_3$  的分蘖率最大, 比对照大 3.57 蘖/株, 其次是  $T_2$ , 超出对照 3.09 蘖/株, 二者均与对照之间存在极显著差异( $P<0.01$ )。改良磷石膏基质中  $T_8$  的分蘖率最低, 但仍高于对照。株高多重比较结果(表 2)显示,

$T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$ 、 $T_4$ 、 $T_8$ 、 $T_3$  都大于 50 cm, 分别比对照高 18.53~26.46 cm, 与对照的差异均达到极显著差异( $P<0.01$ )。株高最低的处理是  $T_1$ , 但也与对照呈极显著差异( $P<0.01$ )。从表 2 叶面积多重比较结果看,  $T_3$  最大, 其次  $T_8>T_4>T_2>T_6$ , 2 个处理分别高出对照 1.68、1.67、1.45、1.20、1.09  $\text{cm}^2$ , 且与对照的差异都达到极显著水平  $P<0.01$ 。 $T_9$  最小, 但高出对照 0.36  $\text{cm}^2$ , 二者差异不显著( $P>0.05$ )。多年生黑麦草穗数以  $T_5$  最多, 其次  $T_4$ ,  $T_8$  最少, 所有添加改良剂的处理均与对照呈极显著差异( $P<0.01$ )。所有改良剂处理穗长为 13.36~18.99 cm, 比对照长 3.41~9.04 cm, 均与对照呈极显著差异( $P<0.01$ )。改良磷石膏基质穗干重超出对照 1~2 数量级, 穗干重最大者  $T_5$ , 其次  $T_6$ ,  $T_3$  最小,  $T_5$  与  $T_6$  无显著差异( $P>0.05$ ), 但二者均与  $T_3$  呈极显著差异( $P<0.01$ ), 9 个处理与对照间差异极显著( $P<0.01$ )。改良磷石膏基质中多年生黑麦草地上部干重约是对照的 3~7 倍,  $T_3$  最重,  $T_4$  其次,  $T_1$  较轻, 所有改良处理与对照间差异极显著。

表 2 多年生黑麦草生长性状的多重比较							
处理	分蘖率/蘖·株 <sup>-1</sup>	株高/cm	叶面积/cm <sup>2</sup>	穗数/穗	穗长/cm	穗干重/g	地上部干重/g
CK	4.91 <sup>d</sup> C	33.13 <sup>E</sup>	1.95 <sup>e</sup> E	2.50 <sup>h</sup> H	9.95 <sup>g</sup> F	0.08 <sup>d</sup> D	3.22 <sup>d</sup> D
T <sub>1</sub>	6.21 <sup>cd</sup> BC	43.72 <sup>d</sup> D	2.47 <sup>d</sup> CDE	32.33 <sup>f</sup> EF	13.36 <sup>E</sup>	0.84 <sup>cd</sup> BC	11.67 <sup>cd</sup> C
T <sub>2</sub>	8.00 <sup>ab</sup> AB	44.59 <sup>d</sup> D	3.15 <sup>ab</sup> ABC	30.33 <sup>F</sup>	13.89 <sup>d</sup> E	0.86 <sup>cd</sup> BC	18.47 <sup>ab</sup> B
T <sub>3</sub>	8.48 <sup>a</sup> A	51.66 <sup>c</sup> BC	3.63 <sup>a</sup> A	59.67 <sup>c</sup> C	16.90 <sup>bc</sup> BC	0.63 <sup>c</sup> C	20.72 <sup>a</sup> A
T <sub>4</sub>	6.38 <sup>cd</sup> ABC	52.87 <sup>bc</sup> BC	3.40 <sup>ab</sup> AB	63.33 <sup>b</sup> B	14.00 <sup>d</sup> DE	1.04 <sup>b</sup> B	20.60 <sup>a</sup> A
T <sub>5</sub>	6.62 <sup>cd</sup> ABC	59.59 <sup>a</sup> A	2.60 <sup>d</sup> CDE	64.67 <sup>a</sup> A	18.33 <sup>ab</sup> AB	1.52 <sup>a</sup> A	16.40 <sup>b</sup> B
T <sub>6</sub>	6.56 <sup>cd</sup> ABC	56.03 <sup>bc</sup> AB	2.94 <sup>cd</sup> BCD	45.33 <sup>d</sup> D	17.32 <sup>bc</sup> B	1.39 <sup>a</sup> A	17.16 <sup>cd</sup> B
T <sub>7</sub>	6.52 <sup>cd</sup> ABC	55.21 <sup>bc</sup> AB	2.52 <sup>d</sup> CDE	35.00 <sup>e</sup> E	15.51 <sup>cd</sup> CD	0.84 <sup>cd</sup> BC	12.61 <sup>cd</sup> C
T <sub>8</sub>	5.47 <sup>cd</sup> C	51.76 <sup>bc</sup> BC	3.62 <sup>a</sup> A	21.33 <sup>g</sup> G	18.99 <sup>a</sup> A	0.79 <sup>cd</sup> BC	20.58 <sup>ab</sup> A
T <sub>9</sub>	6.53 <sup>cd</sup> ABC	48.05 <sup>d</sup> CD	2.31 <sup>d</sup> DE	33.00 <sup>ef</sup> EF	14.74 <sup>d</sup> DE	0.86 <sup>cd</sup> BC	13.07 <sup>cd</sup> C

注:平均值±标准差 大写字母表示 0.01 水平显著 小写字母表示 0.05 水平显著 表 4 同此

极差分析结果显示(见表 3), 三因素对株高、穗数的重要性顺序是赤泥(A)>污泥(C)>粉煤灰(B), 最优处理组合分别是  $A_3B_2C_1$ 、 $A_2B_3C_3$ 、 $A_2B_3C_3$ 。三因素对分蘖率、穗干重的重要性顺序是赤泥(A)>粉煤灰(B)>污泥(C), 最优处理组合分别是  $A_1B_3C_2$ 、 $A_2B_2C_1$ 。三因素对叶面积、穗长、地上部干重的重要性顺序是粉煤灰(B)>赤泥(A)>污泥(C), 最优处理组合分别是  $A_1B_2C_1$ 、

$A_2B_2C_3$ 、 $A_2B_2C_2$ 。方差分析结果(见表 3)表明, 赤泥对分蘖率、株高、穗数、穗长、穗干重和地上部干重的影响极显著, 对叶面积影响不显著。粉煤灰对分蘖率、穗数、穗长和地上部干重产生极显著影响, 对其它生长性状无显著影响。污泥除对株高、穗数和穗长影响达到极显著外, 对其它生长性状影响不显著。

表 3		多年生黑麦草生长性状的极差分析与方差分析						
	试验因素	分蘖率/ %	株高/ cm	叶面积/ cm <sup>2</sup>	穗数/ 穗	穗长/ cm	穗干重/ g	地上部干重/ g
极差分析	赤泥	2. 16	9. 62	0. 26	28. 00	1. 84	0. 54	2. 63
	粉煤灰	1. 58	1. 47	0. 32	7. 22	2. 78	0. 15	3. 53
	污泥	0. 89	6. 95	0. 10	20. 11	2. 70	0. 09	0. 91
	最优组合	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
方差分析	赤泥	13. 55 **	29. 75 **	2. 01	342. 05 **	26. 24 **	48. 61 **	9. 96 **
	粉煤灰	7. 61 **	0. 70	3. 00	23. 19 **	51. 91 **	3. 12	17. 88 **
	污泥	2. 33	15. 64 **	0. 28	174. 19 **	54. 02 **	1. 30	1. 42

注: \*\* 表示 F 值在 0.01 水平显著, \* 表示 0.05 水平显著。表 5 同此

2.2 磷石膏改良基质的物理特性

不同配方磷石膏改良基质物理性质指标多重比较

结果(表 4)显示, 对照容重最大, 添加赤泥、粉煤灰和污泥等固体废弃物的磷石膏基质的容重均比对照小, 其中

容重最大的是 T<sub>2</sub>, 其次是 T<sub>9</sub>, T<sub>4</sub> 最小, 所有磷石膏改良基质与对照均有极显著差异 ( $P<0.01$ )。对照孔隙度最小, 使用改良剂的磷石膏基质中, T<sub>4</sub> 孔隙度最大, T<sub>2</sub> 最小, 但所有磷石膏改良基质的总孔隙度均与对照间差异极显著 ( $P<0.01$ )。9 个磷石膏改良基质的毛管孔隙度均比对照大, T<sub>4</sub> 孔隙度最大, T<sub>3</sub> 最小, 二者之间有极显著差异 ( $P<0.01$ )。添加赤泥、粉煤灰和污泥后, 磷石膏基质的非毛管孔隙度增多, 但与对照之间均无显著差异 ( $P>0.05$ )。孔隙比是原状结构基质的空隙与固体部分之间的体积比。磷石膏基质中添加赤泥、粉煤灰和污泥后, 孔隙比都增大, 其中以赤泥 : 粉煤灰 : 污泥为 2 :

2 : 25 的比例增大效应最显著。磷石膏基质中固体颗粒、水分和空气体积间的比值即为三相比。添加改良的磷石膏基质空隙增大, 涵养水分增加, 容纳的空气也有所增多, 可有效降低基质的三相比。基质饱和含水量是指基质中的空隙全部都充满水分时的含水量, 它代表基质最大的容水能力。纯磷石膏基质几乎为粉末, 见水易板结, 透水透气性较差, 因此饱和含水量最少。纯磷石膏基质中添加赤泥、粉煤灰和污泥后, 磷石膏吸附在颗粒较大的污泥表面, 磷石膏改良基质的团粒结构大大改善, 饱和含水量增大, 其以 T<sub>4</sub> 最大, 所有磷石膏改良基质的饱和含水量与对照间均呈极显著差异 ( $P<0.01$ )。

表 4 磷石膏改良基质物理特性的多重比较

处理	容重 / g · cm <sup>-3</sup>	总孔隙度 / %	毛管孔隙度 / %	非毛管孔隙度 / %	孔隙比	三相比	饱和含水量 / %
CK	1.36 <sup>a</sup>	49.09 <sup>d</sup>	42.18 <sup>c</sup>	6.91 <sup>a</sup>	0.96 <sup>d</sup>	0.09 <sup>a</sup>	29.66 <sup>d</sup>
T <sub>1</sub>	1.03 <sup>bcd</sup>	59.98 <sup>b</sup>	50.61 <sup>ab</sup>	9.38 <sup>a</sup>	1.50 <sup>b</sup>	0.05 <sup>bcd</sup>	33.60 <sup>abc</sup>
T <sub>2</sub>	1.13 <sup>b</sup>	56.66 <sup>c</sup>	47.92 <sup>bc</sup>	8.75 <sup>a</sup>	1.31 <sup>b</sup>	0.06 <sup>ab</sup>	32.36 <sup>bc</sup>
T <sub>3</sub>	1.08 <sup>b</sup>	58.36 <sup>bc</sup>	47.18 <sup>b</sup>	11.18 <sup>a</sup>	1.41 <sup>b</sup>	0.05 <sup>bc</sup>	32.05 <sup>bc</sup>
T <sub>4</sub>	0.90 <sup>c</sup>	64.16 <sup>a</sup>	53.76 <sup>a</sup>	10.40 <sup>a</sup>	1.79 <sup>a</sup>	0.04 <sup>d</sup>	34.96 <sup>a</sup>
T <sub>5</sub>	0.95 <sup>cd</sup>	62.59 <sup>ab</sup>	51.52 <sup>ab</sup>	11.07 <sup>a</sup>	1.68 <sup>a</sup>	0.04 <sup>cd</sup>	34.00 <sup>ab</sup>
T <sub>6</sub>	1.04 <sup>bcd</sup>	59.64 <sup>bc</sup>	53.50 <sup>a</sup>	6.14 <sup>a</sup>	1.48 <sup>b</sup>	0.05 <sup>bcd</sup>	34.85 <sup>a</sup>
T <sub>7</sub>	1.05 <sup>b</sup>	59.35 <sup>bc</sup>	50.11 <sup>ab</sup>	9.24 <sup>a</sup>	1.46 <sup>b</sup>	0.05 <sup>bcd</sup>	33.38 <sup>abc</sup>
T <sub>8</sub>	1.05 <sup>b</sup>	59.38 <sup>bc</sup>	52.53 <sup>a</sup>	6.85 <sup>a</sup>	1.46 <sup>b</sup>	0.05 <sup>bcd</sup>	34.44 <sup>ab</sup>
T <sub>9</sub>	1.06 <sup>b</sup>	58.92 <sup>bc</sup>	51.70 <sup>ab</sup>	7.22 <sup>a</sup>	1.43 <sup>b</sup>	0.05 <sup>bcd</sup>	34.06 <sup>ab</sup>

极差分析结果(表 5)表明, 3 个试验因素对容重、总孔隙度、孔隙比的重要顺序是赤泥(A)>粉煤灰(B)>污泥(C), 最优处理组合分别是 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>。三因素对毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水量的重

要性顺序是赤泥(A)>污泥(C)>粉煤灰(B), 最优处理组合分别是 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>、A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>。三因素对磷石膏改良基质三相比同等重要, 最优处理组合 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>。

表 5 磷石膏改良基质物理特性的极差分析与方差分析

	试验因素	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	孔隙比	三相比	饱和含水量
极差分析	赤泥	0.11	3.54	4.21	2.37	0.19	0.01	1.00
	粉煤灰	0.06	2.11	0.94	1.63	0.13	0.01	0.14
	污泥	0.02	0.79	2.88	3.67	0.11	0.01	0.52
	最优组合	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>
方差分析	赤泥	16.70 **	16.70 **	23.63 **	3.24	12.59 **	3.90	0.0027
	粉煤灰	5.51 *	5.51 *	1.10	1.51	4.98 *	4.18	0.0001
	污泥	0.76	0.76	10.41 **	7.34 *	4.90 *	2.91	0.0007

方差分析结果(见表 5)表明, 赤泥对磷石膏基质的容重、总孔隙度、毛管孔隙度、孔隙比的影响达极显著水平, 对非毛管孔隙度、三相比和饱和含水量无显著影响。粉煤灰对容重、总孔隙度和孔隙比产生显著影响, 对剩余物理特性无显著影响。污泥除对毛管空隙度影响达到极显著, 对非毛管孔隙度和孔隙比有显著影响, 对其它物理性状影响不显著。

从多年生黑麦草的 7 个生长指标和磷石膏改良基质的 7 个物理性质指标的多重比较、极差分析和方差分析结果得知, 多年生黑麦草生长特性和磷石膏基质物理性质的改善未集中表现在同一个处理组合内, 采用单一指标评价磷石膏改良剂配比可能存在片面性。因此采用主成分和聚类分析多指标筛选出真实反映磷石膏改

良效果的指标及添加剂最优配比的结果才较为可靠。

2.3 主成分分析

将处理间无显著差异的非毛管孔隙度数据剔除, 对多年生黑麦草的分蘖率、株高、叶面积、穗数、穗长、穗干重、地上部干重等 7 个生长指标和磷石膏基质容重、总孔隙度、毛管孔隙度、孔隙比、三相比、饱和含水量等 6 个物理性质指标进行主成分分析<sup>[10-11]</sup>。第一主成分贡献率为 67.70%, 特征值是 8.80; 第二主成分贡献率为 18.43%, 特征值是 2.40。根据累积贡献率为 85%的判别值, 选取前 2 个主成分的累积贡献率为 86.13%, 且 2 个主成分的特征值均大于 1, 这表明前 2 个主成分基本反映了多年生黑麦草生长性状和磷石膏基质物理性质所包含的全部信息。

从表6可知,所有磷石膏改良基质中,以赤泥:粉煤灰:污泥为1:2:10的处理T<sub>5</sub>综合得分最高为1.970,其次是3种改良剂按2:2:15构成的配方综合得分1.503,综合得分最低的是T<sub>2</sub>。9个磷石膏改良基质综合得分高低顺序是:T<sub>5</sub>>T<sub>4</sub>>T<sub>6</sub>>T<sub>8</sub>>T<sub>7</sub>>T<sub>9</sub>>T<sub>1</sub>>T<sub>3</sub>>T<sub>2</sub>。

表6 磷石膏基质改良配方的主成分得分和综合得分

处理	第1主成分得分F <sub>1</sub>	第2主成分得分F <sub>2</sub>	综合得分F	等级
T <sub>1</sub>	-0.660	-2.303	-0.262	7
T <sub>2</sub>	-2.674	-0.263	-1.626	9
T <sub>3</sub>	-1.722	2.170	-0.982	8
T <sub>4</sub>	1.947	1.503	1.503	2
T <sub>5</sub>	2.638	0.648	1.970	1
T <sub>6</sub>	1.158	0.203	0.926	3
T <sub>7</sub>	-0.170	-1.356	0.069	5
T <sub>8</sub>	-0.003	1.304	0.182	4
T <sub>9</sub>	0.513	-1.906	-0.163	6

2.4 聚类分析

对不同磷石膏改良基质的7个物理性质指标和多年生黑麦草的7个生长性状按聚类分析法<sup>[12]</sup>进行分析,具体步骤:系统聚类→原始数据标准化→欧氏距离→离差平方和,将磷石膏改良基质划分为4大类:T<sub>4</sub>和T<sub>5</sub>为一类;T<sub>6</sub>和T<sub>8</sub>为一类;T<sub>1</sub>、T<sub>9</sub>和T<sub>7</sub>为一类;T<sub>2</sub>和T<sub>3</sub>为一类。磷石膏改良基质物理性质得到较大改良,黑麦草长势较好的配方有T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub>,以T<sub>5</sub>最优;其次是T<sub>6</sub>、T<sub>8</sub>;在T<sub>1</sub>、T<sub>7</sub>、T<sub>9</sub>配方中生长较差;T<sub>2</sub>配方最差。

3 小结

磷石膏基质中施用赤泥、粉煤灰、污泥后,容重减小、孔隙度增大、饱和含水量增加,团粒结构改善,透气保水功能变强,有利于多年生黑麦草生长,并能完成生活史,对磷石膏堆场植物修复可持续发展起到重要作用。主成分分析表明,可以采用容重、总孔隙度、孔隙比、毛管孔隙度、株高、穗数、穗干重作为磷石膏改良效

果及多年生黑麦草生长的评价指标体系。综合得分说明,赤泥:粉煤灰:污泥按1:2:10的配比改良磷石膏基质的物理性质最佳,同时多年生黑麦草生长最茂盛且能正常开花结种子,有效减少次年磷石膏堆场植物修复种子使用量。聚类分析将9种磷石膏改良基质划分成4类,赤泥:粉煤灰:污泥的最优配比1:2:10,与主成分分析结果一致,说明筛选出的基质配方可靠性较高。

参考文献

[1] Abril J M, Rafael G T, Guillermo M. Extensive radioactive characterization of a phosphogypsum stack in SW Spain: <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U, <sup>210</sup>Po concentrations and <sup>222</sup>Rn exhalation rate [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164: 790-797.

[2] Nurhayat D. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products [J]. Construction and Building Materials 2008, 22: 1857-1862.

[3] Shen W G, Zhou M K, Ma W, et al. Investigation on the application of steel slag fly ash phosphogypsum solidified material as road base material [J]. Journal of Hazardous Materials 2009, 164: 99-104.

[4] El Afifi E M, Hilal M A, Attallah M F, et al. Characterization of phosphogypsum wastes associated with phosphoric acid and fertilizers production [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2009, 100: 407-412.

[5] 吴亚君, 李小平, 冷杰彬. 平果铝业公司赤泥的土壤改良 [J]. 有色金属, 2004, 56(3): 130-134.

[6] 鲁晓勇, 朱小燕. 粉煤灰综合利用的现状与前景展望 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 24(2): 295-298.

[7] 申荣艳, 骆永明, 章钢娅, 等. 城市污泥农用对植物和土壤中有有机污染物的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 651-657.

[8] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.

[9] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 350-460.

[10] 荣跃, 刘志斌, 冯吉燕, 等. 主成分分析在污灌区土壤分析中的应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(增刊): 252-254.

[11] 荆延德, 张志国. 主成分分析和聚类分析在花卉栽培基质配方选择中的应用 [J]. 土壤通报, 2004, 35(5): 588-601.

Choosing of Improvement Formulation of Phosphogypsum Media and Growth Properties of *Lolium perenne* L.

XIANG Yang-zhou, LIU Fang, WEI Wei, WU Yong-gui

(College of Resources and Environment Engineering Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003)

**Abstract:** According to their physical and chemical properties, red mud, fly ash and sludge are mixed into nine different media formulations through orthogonal design to improve phosphogypsum. The purpose aims at choosing the best media formulation to be fit for *Lolium perenne* L. planting. Seven characteristics of growth of *Lolium perenne* L. and seven physical traits of improvement phosphogypsum were accounted with multiple comparison, range analysis, variance analysis, principal component analysis and cluster analysis. The results showed that combining red mud, fly ash and sludge improve positively physical properties and promote *Lolium perenne* L. growth. The best composition of red mud, fly ash and sludge was 1:2:10. Nine media formulations of phosphogypsum were divided into four gradations.

**Key words:** phosphogypsum; *Lolium perenne* L.; phytoremediation; principal component analysis; cluster analysis