

3 种固沙材料与风沙土复配后土壤改良效应及其质量评价

陈艺文, 李红丽, 董 智, 耿林昇, 潘嘉琛, 尚 宾

(山东农业大学 林学院 泰山森林生态站, 山东 泰安 271018)

摘 要:揭示风沙土复配其他固沙材料后的土壤质量变化及改良效应对研发防沙固沙新材料具有重要的指导意义。以乌兰布和沙漠风沙土为对照(CK),采用粉煤灰、脱硫石膏、牛粪 3 种固沙材料按干质量比 15%, 25% 与风沙土进行复配,研究了不同材料与配比复配土壤对机械组成、养分含量、金属含量的改良效应,运用最小数据集构建、隶属度计算与土壤质量指数计算等方法评价了复配土壤质量。结果表明:(1) 不同复配土壤的机械组成均发生了改变,粉粒、粗砂等难蚀、较难蚀颗粒体积分数增加,易蚀的细砂体积分数降低。(2) 除石膏复配土壤各养分指标与 CK 相近外,其余复配土壤有机碳含量较对照提高 1.2~10.4 倍,牛粪复配土壤在提高养分含量方面显著高于其他材料;以牛粪和石膏为材料的复配土则分别增加或降低了沙土中的金属含量,而粉煤灰复配土的 Cr, As 较 CK 下降。(3) 不同复配土对土壤理化性质作用影响各异,粉煤灰在粒径改良方面较优,牛粪在养分提升方面效果显著,石膏在重金属含量降低方面作用明显,粉煤灰石膏混合复配则综合了二者的优势。(4) 3 种固沙材料均在不同程度上提高了复配土壤的质量,但复配土壤质量仍处于较低水平。综上,不同复配比例组合中,15% 粉煤灰复配土壤质量得分指数最高为 0.545,对风沙土的改良效果最好,其次为 15% 脱硫石膏(0.537),15% 牛粪(0.506)和 25% 粉煤灰与脱硫石膏(0.484)复配组合。

关键词:粉煤灰; 脱硫石膏; 牛粪; 固沙改土; 复配土壤; 土壤质量

中图分类号:S154.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0048-07

Soil Improvement Effect and Quality Evaluation of Three Sand-Fixing Materials Combined with Aeolian Sandy Soil

CHEN Yiwen, LI Hongli, DONG Zhi, GENG Linsheng, PAN Jiachen, SHANG Bin

(Taishan Forestry Ecosystem Research Station, College of Forestry,
Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: It is important to reveal the soil quality change and improvement effect of aeolian sand soil combined with other sand-fixing materials for the development of new sand-controlling and sand-fixing materials. The aeolian sand soil in Ulan Buhe Desert was taken as the control (CK), and three sand-fixing materials, flyash, desulfurized gypsum and cow dung, were mixed with aeolian sand soil at dry weight ratios of 15% and 25%, to study the improvement effects of different materials and ratios on mechanical composition, nutrient contents and metal contents. Soil quality was evaluated by minimum data set construction, membership degree calculation and soil quality index calculation. The results show that: (1) the mechanical composition of soils with different combinations changed, and the volume fraction of refractory and refractory particles such as silt and coarse sand increased, while the volume fraction of fine sand that is easy to be eroded decreased; (2) soil organic carbon content of gypsum compound soil was 1.2~10.4 times higher than that of CK, except that the nutrient indexes of gypsum compound soil were similar to that of CK; the nutrient content of cow manure compound soil was significantly higher than those of other materials; the metal contents in sand soils mixed with cow dung and gypsum increased or decreased, respectively, while the Cr and As of flyash mixed soil decreased compared with CK; (3) different combinations of soils had different

收稿日期:2021-07-31

修回日期:2021-08-30

资助项目:内蒙古重大专项(2019ZD003-3-1);国家重点研发计划(2018YFC0507101);国家自然科学基金(31870708, 51879155)

第一作者:陈艺文(1995—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事荒漠化治理方面研究。E-mail:994228959@qq.com

通信作者:董智(1971—),男,内蒙古乌兰察布市人,博士,教授,主要从事荒漠化防治及生态修复方面研究。E-mail:nmgdz@163.com

effects on soil physical and chemical properties; flyash was better in particle size improvement, cow dung had a significant effect on nutrient enhancement, and gypsum had an obvious effect on reducing heavy metal contents; the combination of flyash and gypsum combined the advantages of the two; (4) the three sand-fixing materials all improved the quality of the mixed soils to varying degrees, but the quality of the mixed soil was still at a low level. In this study, the soil quality score index of 15% fly ash combination is 0.545, and it had the best improvement effect on aeolian sand soil, followed by 15% desulfurized gypsum (0.537), 15% cow dung (0.506) and 25% fly ash and desulfurized gypsum (0.484).

Keywords: flyash; desulfurization gypsum; cattle manure; fixing-sand and soil improvement; compound soil; soil quality

中国北方风沙区面积广阔,土壤主要以风沙土为主,其结构松散,抗蚀性差,保水保肥能力弱,对土壤风蚀的发生发展有着重要影响^[1],控制风蚀、增加土壤养分是改良利用风沙土和提高土壤质量的关键。研究表明:土壤颗粒及团聚体含量对风蚀可蚀性有着直接影响^[2],而砂土由于缺少形成土粒间黏结力的粉粒和黏粒而更易受到侵蚀^[3],因此,在风沙土中施加粉粒、黏粒及促进团聚体形成的有机质等不可蚀成分是控制土壤风蚀与改良风沙土最为直接的方法。客土压沙、增施有机肥、种植防沙治沙林、设置沙障等是风沙区常用的风沙土改良途径,均取得了显著的成效^[4-7]。但风沙区环境的特殊性 & 材料地域分布的有限性在一定程度上制约了材料的使用,进而限制了风沙土改良的高效性和可持续性。因此,立足沙漠沙地环境与资源特点,利用现有资源研发改良风沙土的新材料成为研究热点。

粉煤灰、脱硫石膏颗粒细腻,比表面积大^[8],牛粪含有大量养分与有机胶体^[9-10],三者均具有调节土壤质地、改良土壤、提供养分、吸附重金属等功能^[11-14],但在风沙土改良方面的利用鲜有报道。利用这 3 种材料与风沙土掺混复配后会对风沙土的土壤理化、重金属特性产生何种影响,土壤质量的改良效应如何尚不可知,值得开展进一步的研究。特别地,伴随着乌兰布和沙漠地区绿洲开发、工业、畜牧业等产业的蓬勃发展,区域内产生了大量的粉煤灰、脱硫石膏和牛粪等工业、畜牧业废弃物,如果能将 这些废弃物作为资源合理地应用于风沙土的治理与改良,更能取得一举多得的效果,对于风沙土的改良、土壤质量的提升与可持续利用具有非常重要的意义。因此,本研究拟使用乌兰布和沙漠内现有的成本低廉、易于获取的粉煤灰、脱硫石膏、牛粪等 3 种工、农业废弃物材料,通过与风沙土进行不同复配比例的混合,研究室内不同复配比例组合对土壤理化与重金属元素特性的影响,评价复配后的土壤质量,并筛选出改土效果良好、环保友好型的复配组合与比例,为野外试验奠定理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料与土壤复配比例

试验用风沙土取自内蒙古自治区磴口县乌兰布和沙漠圣牧高科第十一场试验地的流动沙丘(40°26′30″N,106°25′10″E)表层(0—20 cm 层);粉煤灰(记作 F,下同)与脱硫石膏(记作 S,下同)均购置于内蒙古磴口金牛煤电有限公司,两种材料均为燃煤发电过程中经高温烧结后产生的废弃物;牛粪(记作 N,下同)为圣牧高科第十一场奶牛养殖产生的粪便经堆肥后加工磨碎而成。各固沙材料的粒径组成特征与有机质含量见表 1。试验时,对粉煤灰、脱硫石膏、牛粪等材料按干质量比 15%,25% 两个比例与风沙土进行复配,共形成 15%F,25%F,15%S,25%S,15%N,25%N,15%FS(粉煤灰与脱硫石膏各 50% 共占复配土质量的 15%),25%FS8 种复配组合。所有测试均以没有复配的流动风沙土为对照(CK)。

表 1 试验用固沙材料理化性状

性状	CK	F	S	N
pH	8.61±0.04b	9.77±0.04a	7.69±0.02b	9.38±0.26a
黏粒/%	0.00c	0.25±0.08b	1.94±0.29a	1.76±0.53a
粉粒/%	5.26±0.92d	11.07±5.32c	56.83±11.97a	28.4±2.66b
砂粒/%	94.74±0.39a	88.68±4.34b	41.23±3.55d	69.84±1.24c
有机质 SOC/ (g·kg ⁻¹)	1.06±0.20c	12.24±1.02b	1.53±0.05c	25.83±0.36a

1.2 测定方法

每种材料按比例完成复配后,分别取 3 份样品进行土壤理化性状和重金属元素含量测试。其中机械组成采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定,并按美国制将粒径划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、极细砂(0.05~0.1 mm)、细砂(0.1~0.25 mm)、中砂(0.25~0.5 mm)、粗砂(0.5~1.0 mm)、极粗砂(1.0~2.0 mm)共 7 级^[6];有机质采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定,土壤全氮采用全自动凯氏定氮法测定,全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消化、钼蓝比色法测定^[15]。全钾和金属元素(Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As

和 Al)采用王水 CEM-MARS6 微波消解,参考中华人民共和国环境保护标准《土壤和沉积物 12 种金属元素测定王水提取—电感耦合等离子体质谱法》(HJ803-2016)^[16],采用 ICP-OES 法测定。

1.3 土壤质量评价方法

1.3.1 土壤质量评价最小数据集构建 国际上研究者们广泛选取物理化学、生物、重金属污染等指标开展土壤质量的研究,方法上多采用土壤质量指数^[17]、最小数据集(MDS)等^[18]评价方法。本研究采用最小数据集方法进行复配后土壤质量的评价。具体步骤为:将测定的土壤粒径、养分含量及金属含量等各项土壤质量评价指标,利用主成分分析法对其进行降维分组,提取主成分特征值 ≥ 1 的因子,并以指标载荷大于 0.5 为标准分为一组,若某指标在不同主成分中的载荷均大于 0.5,则将其并入与其他指标相关性较低的一组,分别计算各组指标的 Norm 值,并保留每组最大 Norm 值 10%范围内的指标。若某组中只有一个指标,则直接纳入土壤质量评价最小数据集,若某组中保留有多个指标,则先剔除该组非敏感性指标,然后根据剩余指标的相关性来确定指标的去留;若剩余指标不相关或负相关则全部保留,反之则选取与其余指标相关系数最高的指标纳入土壤质量评价最小数据集,最终筛选出对土壤质量评价具有显著影响的土壤指标最小数据集^[19]。

Norm 值计算公式为:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (U_{ik}^2 M_k)}$$

式中: N_{ik} 为第 i 个指标在特征值 >1 的前 k 个主成分的综合载荷; U_{ik} 为第 i 个指标在第 k 个主成分上的载荷; M_k 为第 k 个主成分的特征值。

1.3.2 评价指标的权重计算 以各指标经主成分分析后所得的公因子方差占有指标公因子方差之和的比为指标权重,指标权重越高,表明其在土壤质量评价中的贡献度越高^[20]。

1.3.3 评价指标的隶属度与土壤质量指数计算 依据各指标与土壤质量变异的正负相关性来确定隶属度函数类型,并采用隶属度函数分别计算各指标的隶属度值。

$$\text{升型分布函数公式: } F(x_i) = \frac{(x_{ij} - x_{i\min})}{(x_{i\max} - x_{i\min})}$$

$$\text{降型分布函数公式: } F(x_i) = \frac{(x_{i\max} - x_{ij})}{(x_{i\max} - x_{i\min})}$$

式中: x_{ij} 为各指标平均值; $x_{i\max}$ 为第 i 个指标的最大值; $x_{i\min}$ 为第 i 个指标的最小值。

土壤质量指数(SQI)计算公式^[20]如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i F(x_i)$$

式中: n 为指标数量; W_i 为指标权重值; $F(x_i)$ 为指标隶属度;SQI 为土壤质量指数,该值越高,代表土壤质量越好。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2010 对数据进行统计以及相关指数计算;利用 SPSS 22.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、LSD 多重检验以及主成分分析等;利用 Origin 2019 制图。

2 结果与分析

2.1 不同复配类型土壤指标统计特征

2.1.1 不同复配类型土壤粒径特征 不同材料按比例与风沙土复配后改变了风沙土的原有机械组成,且复配土壤的粒径组成均与原有风沙土 CK 的粒径组成呈现出显著差异(表 2)。含有粉煤灰的复配土壤的粉粒体积分数显著增加($p < 0.05$),土壤粒径分布幅度变宽,呈现细砂体积分数减小,粉砂、极细砂、中砂、粗砂体积分数增大的趋势。含有石膏的复配土壤,其极细砂、粗砂和极粗砂的体积分数明显增大,细砂、中砂体积分数下降;而 15%、25%牛粪的复配土壤在各粒径上表现不一,但粗砂含量高于 CK。总体上,复配土壤主要颗粒组成与 CK 一致,仍以细砂和中砂为主,但二者的组成比例发生了明显的变化,基本上呈现中砂、粗砂体积分数有所增加,细砂体积分数有所下降,极细砂和粉粒体积分数也有所上升的趋势。表明经 3 种材料混合复配后,土壤机械组成基本上呈现不易为风吹动的中砂、粗砂与极细砂、粉粒成分增加,易吹蚀的细砂体积分数有所下降,有助于增大沙粒起动风速,达到固沙目的。

2.1.2 不同复配类型土壤的养分特征 由表 3 可知,不同复配土壤的养分含量变化明显,总体上,复配土壤养分含量除石膏复配土壤与对照 CK 无显著差异外($p > 0.05$),其余复配土壤的有机碳、全氮、全磷含量均整体升高,整体分布呈现为 $N > F > CK > S$ 。土壤有机碳 SOC 升高比例最大,复配不同比例牛粪、粉煤灰的土壤较对照增大 2.6~10.4 倍,粉煤灰与石膏混合复配土壤的 SOC 较 CK 提高 1.2~2.4 倍。牛粪复配土壤的土壤全氮含量显著高于流沙(5.4~7.8 倍)与其他复配类型(4.9~23.3 倍),土壤全磷含量则在牛粪、粉煤灰复配中呈现最高,分别为 0.52~0.63, 0.47~0.69 g/kg,配施粉煤灰、石膏后降低了土壤全钾含量,但配施牛粪后土壤全钾含量较 CK 增加了 28.8%~76.4%,二者差异显著。

表 2 不同复配类型土壤机械组成

复配土样	黏粒 ($<2\ \mu\text{m}$)	粉粒 ($2\sim50\ \mu\text{m}$)	极细砂 ($50\sim100\ \mu\text{m}$)	细砂 ($100\sim250\ \mu\text{m}$)	中砂 ($250\sim500\ \mu\text{m}$)	粗砂 ($500\sim1000\ \mu\text{m}$)	极粗砂 ($1000\sim2000\ \mu\text{m}$)
15%F	0.00c	9.51±0.78bc	7.87±1.38bc	40.84±4.10c	32.30±6.48ab	9.43±1.38b	0.04±0.07c
25%F	0.25±0.39b	15.22±2.57a	12.06±0.72ab	39.87±3.87c	26.44±4.28c	6.11±1.22bc	0.05±0.09c
15%S	0.00c	1.30±0.48e	7.33±0.85c	61.49±19.24a	18.43±0.99d	7.85±2.64bc	3.59±1.62b
25%S	0.00c	0.60±0.63e	6.12±2.76c	38.84±19.08c	18.95±4.48d	23.23±8.80a	12.40±8.63a
15%N	0.03±0.06c	1.92±3.33e	5.56±1.48c	63.10±20.19a	19.95±6.79cd	8.73±5.12bc	0.72±1.25b
25%N	0.00c	5.40±1.03d	5.58±0.66c	44.97±9.01b	38.04±6.13a	6.01±3.94bc	0.00c
15%FS	0.51±0.41a	8.55±1.47c	8.99±1.09bc	47.11±3.91b	29.62±2.13bc	5.20±3.99c	0.00c
25%FS	0.6±0.47a	11.95±1.37b	15.02±5.97a	36.74±6.43c	26.42±8.55c	9.27±4.73b	0.00c
CK	0.00c	5.26±0.92d	5.90±0.39c	58.34±6.83ab	25.60±4.43c	4.14±3.92c	0.76±1.32b

注:表中小写字母表示相同指标在不同土壤复配类型差异显著($p<0.05$),下同。

表 3 不同复配类型土壤养分含量变化特征

复配 类型	有机碳 SOC/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 TN/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 TP/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾 TK/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
15%F	4.44±0.05d	0.09±0.01c	0.47±0.04bc	1.80±0.25e
25%F	6.37±0.47c	0.10±0.01c	0.69±0.05a	1.86±0.11e
15%S	1.07±0.18f	0.08±0.02c	0.18±0.01d	2.47±0.16cd
25%S	1.06±0.15f	0.07±0.01cd	0.16±0.01d	2.31±0.15d
15%N	10.25±0.16e	0.49±0.03b	0.52±0.01b	3.44±0.08b
25%N	14.22±0.17e	0.70±0.04a	0.63±0.14a	4.71±0.07a
15%FS	2.69±0.18e	0.03±0.01e	0.37±0.06c	1.54±0.11ef
25%FS	4.19±0.19d	0.04±0.01de	0.42±0.05bc	1.42±0.12f
CK	1.23±0.20f	0.09±0.01c	0.24±0.01d	2.67±0.43c

注:SOC表示有机碳;TN表示全氮;TP表示全磷;TK表示全钾,下同。

2.1.3 不同复配土壤的金属特征 由表 4 可知,牛粪复配土壤的金属元素含量在各复配类型中表现最高,除 Cr 含量低于 CK 外,其余金属含量均高于 CK,

表 4 不同复配类型土壤金属含量变化特征

类型	Cr/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Mn/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Fe/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cu/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Zn/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	As/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Al/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
15%F	5.09±0.87c	261.3±9.49c	18325.13±498.20a	7.32±0.61bc	84.03±4.47a	5.40±0.85a	11998.19±464.82d
25%F	5.55±1.09bc	254.12±1.50c	18794.96±457.87a	6.04±1.54bc	69.24±11.98a	3.53±3.09a	13517.26±431.75ab
15%S	13.11±9.21ab	188.26±10.42e	11181.27±478.64e	1.62±1.22c	59.45±23.96a	7.54±1.25a	13034.91±404.86bc
25%S	13.44±5.31a	163.69±7.29f	9576.65±494.88f	7.62±10.74bc	89.52±35.55a	4.63±3.93a	11926.31±262.71d
15%N	12.60±4.25abc	282.17±17.68b	16320.48±198.61b	9.08±1.45ab	86.31±17.90a	9.69±1.96a	14216.45±125.90a
25%N	18.12±2.03a	300.32±2.01a	16621.56±190.65b	14.39±1.33a	94.82±9.56a	3.26±0.51a	14245.21±330.53a
15%FS	5.36±2.03bc	224.45±5.71d	14644.68±106.26c	4.58±1.08bc	87.34±22.82a	5.70±1.57a	13078.22±297.37bc
25%FS	5.54±0.43bc	197.12±5.52e	13623.26±404.19d	4.43±1.05bc	66.37±20.39a	5.30±4.71a	13110.44±449.76bc
CK	16.44±3.25a	266.19±16.74bc	17000.75±838.83b	4.31±1.03bc	69.44±13.16a	7.68±7.31a	12578.25±922.33cd

2.2 不同复配类型土壤质量综合评价

不同复配土壤的理化与金属含量指标关系较为密切(图 1),各指标的变异系数(CV)介于 2%~101%,根据敏感度等级划分标准^[21],高度敏感($\text{CV}\geq 100$)指标有一项,土壤指标的整体变异性较低,特别是锰、铁、铝、有机质、全氮、全磷、全钾指标都属于非敏感指标,其对于土壤物理材料添加以及比例的变化引起的土壤

石膏复配土壤的金属含量在各复配类型中最小,且低于 CK;粉煤灰复配土样的 Mn,Zn,Al 含量接近于 CK,与 CK 差异不显著,Cr,As 含量较 CK 下降,Fe,Cu 含量较 CK 明显上升;FS 混合材料复配土壤则呈现出 Cu,Zn,Al 含量则略高于较 CK,Cr,Mn,Fe,As 含量低于 CK 的变化趋势。从单个元素的含量变化看,对于 Cr,As、含量,不同材料 25%复配土壤均高于 15%复配土壤;对于 Mn 含量,除牛粪复配土壤外,其余材料均表现为 25%复配土壤低于 15%复配土壤;对于 Fe,Al 含量,25%F 以及 25%N 高于 15%比例,25%S 以及 25%FS 低于 15%比例;对于 Cu,Zn 含量,25%S 以及 25%N 高于 15%比例,25%F 以及 25%FS 低于 15%比例。整体上,复配土壤具有增加土壤中微量元素 Zn 的含量、降低有害重金属元素 Cr,As 含量的作用。

性质变异敏感性较低,作为评价该研究区土壤质量的指标不太适宜(表 5)。

表 5 土壤质量评价指标的敏感度分级

敏感度等级	CV/%	指标
高度敏感	≥ 100	极粗砂
中度敏感	40~100	黏粒、粗砂
低度敏感	10~40	铬、铜、锌、粉粒、极细砂、细砂、中砂
非敏感	≤ 10	锰、铁、砷、铝、有机质、全氮、全磷、全钾

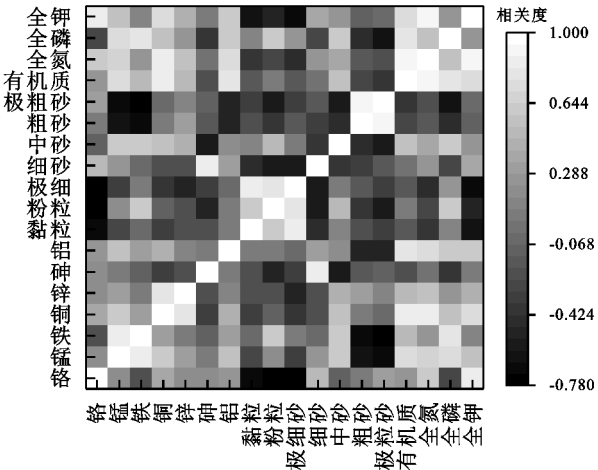


图 1 不同复配土壤质量评价指标的相关性

表 6 主成分主体原件分析载荷矩阵以及 Norm 值计算

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	分组	Norm 值	公因子方差	权重
锰	0.906	0.110	−0.243	−0.292	1.000	2.439		
中砂	0.639	0.464	0.290	−0.317	1.000	2.075		
SOC	0.936	0.035	0.140	0.280	1.000	2.479		
TN	0.902	−0.335	0.083	0.241	1.000	2.500		
TK	0.782	−0.570	0.031	0.123	1.000	2.435		
黏粒	−0.268	0.745	0.007	0.433	2.000	1.918		
粉粒	0.067	0.977	0.050	−0.075	2.000	2.263	0.967	0.250
极细砂	−0.331	0.848	0.030	0.357	2.000	2.176	0.957	0.248
粗砂	−0.461	−0.445	0.684	0.110	3.000	1.971		
极粗砂	−0.529	−0.626	0.527	0.071	3.000	2.194	0.955	0.247
铁	0.646	0.511	−0.251	−0.427	4.000	2.157		
铜	0.823	−0.189	0.520	0.030	4.000	2.368	0.983	0.255
锌	0.509	−0.256	0.601	−0.124	4.000	1.786		
铝	0.733	0.059	−0.284	0.596	4.000	2.090		
TP	0.754	0.553	0.101	0.122	4.000	2.358		
特征值	6.832	5.319	2.916	1.247			3.862	1.000
方差贡献率/%	37.955	29.549	16.201	6.931				
累积方差贡献率/%	37.955	67.504	83.705	90.636				

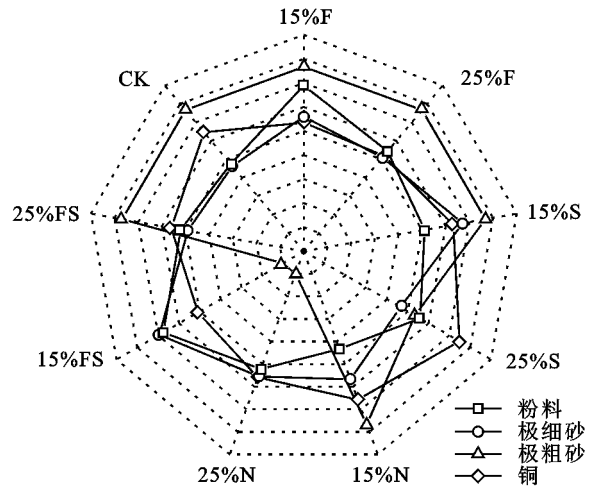


图 2 不同复配土壤质量指标隶属度雷达图

将 18 个候选参数排序,通过主成分分析,根据因子的特征值大小,结果见表 6。前 4 个主成分的特征值 ≥ 1 ,累积方差贡献率达到 90.636%,符合信息提取的要求。根据载荷因子分组原则,锰、中砂、有机质、全氮、全钾被划分为组 1;黏粒、粉粒、极细砂为组 2;粗砂、极粗砂为组 3;铁、铜、锌、铝、全磷为组 4。综合敏感度分析、相关性比较以及 Norm 值 10% 范围内保留的最小数据集构建方法,建立的复配土壤质量评价最小数据集的指标为粉粒、极细砂、极粗砂体积分数与铜含量。根据进入最小数据集的各指标的函数类型、权重计算求属度值,并绘制各指标的隶属度雷达图(图 2)。由图可知,极粗砂、黏粒、粗砂含量是评价本研究土壤质量的限制性与关键因子。

不同复配土壤质量得分指数范围为 0.335~0.545,由大到小表现为 15% F (0.545) > 15% S (0.537) > 15% N (0.506) > 25% FS (0.484) = 25% F (0.484) > 25% S (0.478) > 15% FS (0.395) > CK (0.385) > 25% N (0.335)(图 3)。由结果可知,15%F 对沙漠土壤质量的改良效果最优,其次为 15%S 和 15%N。土壤质量综合指数取值区间为 0~1.0,级差 0.2,土壤质量综合指数被划分为 5 个等级:0.8~1.0 为Ⅰ级,表征肥沃;0.6~0.8 为Ⅱ级,表征较肥沃;0.4~0.6 为Ⅲ级,表征中等;0.2~0.4 为Ⅳ级,表征贫瘠;0~0.2 为Ⅴ级,表征极贫瘠^[22]。不同复配物理材料对沙漠土壤改良的效果整体水平为 0.472,属Ⅲ级水平,个别为Ⅳ级水平,表明施加物理固沙材料后,原流沙的土壤质量由Ⅳ级

水平提升至Ⅲ级水平,这也说明施加物理固沙材料后可改良风沙土的质量,达到改土的目的。

综上所述,结合 3 种材料市场价格(不含物流费用):干牛粪 200 元/t、粉煤灰原灰 200 元/t、脱硫石膏 480 元/t,根据低成本筛选原则,15%复配比例的成本低于 25%复配比例,且混合复配比例低于粉煤灰单一复配比例,为此,本研究主要选择 15%F,15%N,15%S,25%FS 这 4 种方案进行野外配施参考。

3 讨论

杨凯等^[23]对不同比例粉煤灰固沙效果开展了风洞试验,结果显示,施用 10%,20%和 30%的粉煤灰后的沙土起动风速较对照沙的起动风速提高了 40%,50%和 30%,在 8 m/s 的净风吃蚀下,10 min 的土壤吹蚀量表现为 10%,20%无风蚀或仅有少量风蚀,而 30%施用量则较对照沙的风蚀量降低一半。本文选择的 15%,25%的施用比例较为适合,且与本文最终筛选的 15%F 结果相一致。董治宝等^[24]将风成沙颗粒按可蚀性分成 >0.7 mm 和 <0.05 mm 的难蚀颗粒、0.4~0.7 mm 和 0.05~0.075 mm 的较难蚀颗粒和 0.075~0.4 mm 的易蚀颗粒,显然,在风沙土中施用粉煤灰、石膏和牛粪等固沙材料后,粉粒、极细砂、粗砂体积分数均有所增加,相当于增加了风沙土中的难蚀颗粒和较难蚀颗粒,而细砂含量的下降则相当于减少了易蚀颗粒,从而使得复配土壤变得不易风蚀。此外,粉粒含量的增加使沙粒相互联接,增加了颗粒间的内聚力,促使沙土的抗蚀性整体增强;而且,施用材料中的细颗粒在沙土的粗颗粒孔隙中填充,使得沙粒点与点接触范围减少,可减弱沙粒在气流脉动周期作用下产生的振动,进而使得沙土稳定性增强,达到降低风蚀的作用。

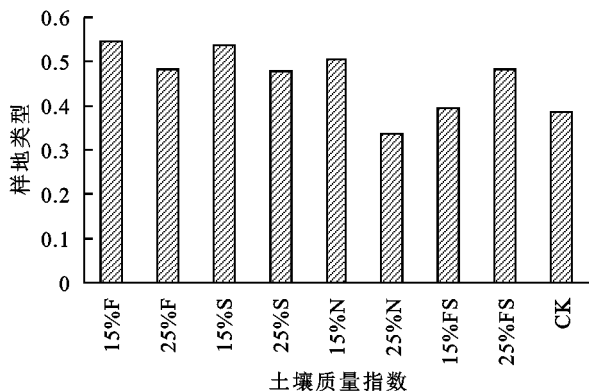


图 3 不同复配类型土壤质量得分

研究表明,粉煤灰与碱性生石灰混合后,强碱性能够将六价 Cr 转化成三价 Cr,并使 Cr 元素的可溶性降低,抑制 Cr 的迁移,起到固定和吸附 Cr 元素的

作用^[25],本研究中,在风沙土中加入粉煤灰后,不同配比下风沙土中的 Cr 含量均表现为下降,说明 Cr 得到了粉煤灰的固定和吸附。本研究表明,粉煤灰用量较高时,25%F 的 As 元素的含量反而明显低于 15%F,这与前人的研究^[26]一致,高比例的粉煤灰对应着碱性上升,强碱性可能改变了 As 在土壤当中的形态,土壤可溶性 As 增加,粉煤灰强碱性可能促进了 As 的可溶性,As 被淋洗到土壤深层,因此 15%F 处理表层土壤 As 含量明显低于对照。有研究表明,在污染土壤的治理过程中,粉煤灰作为一种化学试剂用作改变重金属状态,在土壤胶体和腐殖质载体下有效发挥其对重金属的吸附和沉淀作用,并形成玻璃态而固化重金属,降低重金属的活性^[27-28]。张俊华等^[28]对宁夏西吉县养牛场粪污以及周边土壤的重金属特征开展研究,结果表明宁夏肉牛牛粪中的 Cu,Zn,Cd,Pb,Hg 含量显著低于全国平均值,但 As 较高,且不同时期重金属含量不同,以育肥前期为最高,但不同养殖期的重金属含量都在安全范围内。与张俊华等^[28]的研究对象牛粪中各元素含量检测值相比,本研究牛粪中的重金属含量均低于张俊华等的检测值,这可能与不同地区养殖场采用的饲料不同有关。但这也表明牛粪中重金属含量可能会高于粉煤灰和石膏,这一点恰好与本文试验结果相同。综合牛粪的易取性、经济性、养分提升性等性能,在进一步研究中,应重点研究牛粪的实地应用。

运用主成分分析降维,综合敏感度分析、相关性比较以及 Norm 值 10%范围内保留的方法作为土壤质量评价方法被广泛使用^[29],通过土壤质量评价得分获得的不同固沙材料及其配比比例可作为野外配施参考。15%F 与 15%S 最终评价结果相近,结合结果分析来看,15%S 的极粗砂与 Cu 下降比例较其他样地较好;15%F 的粉粒以及极细砂上升比例较大,且 TP 以及 SOC 改良效果较好;15%N 养分含量变化较优,但养分指标因其变异系数较小,皆为非敏感性指标,未纳入最小数据集,导致 N 复配土质量指数不及 F 和 S;25%FS 既有 F 样地优点也有 S 样地优势,纳入生产实践观察其变化有其必要性,对各种复配土壤的质量评价指数大小顺序有其科学性和生产实践指导性意义。

4 结论

(1) 不同固沙材料与风沙土复配后的土壤理化性质差异显著,但 3 种材料在土壤改良方面的作用各异,粉煤灰在土壤粒径改良方面作用较优,牛粪在养分提升方面作用显著,石膏在重金属含量降低方面作

用明显,因此,可以根据风沙土改良的目的进行固沙材料的筛选与复配。

(2) 不同复配材料在不同程度上可有效提高土壤的质量,但土壤质量指数仍处于较低水平。本研究的不同比例组合中,15%F 复配土壤改良效果较好,其次为 15%S,15%N,25%FS,可将此 4 个比例运用于研究区风沙土的固沙改土试验。

参考文献:

- [1] Lang L L, Wang X M, Wang G T, et al. Effects of aeolian processes on nutrient loss from surface soils and their significance for sandy desertification in Mu Us Desert, China: A wind tunnel approach[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 7: 421-428.
- [2] Skidmore E, Powers D. Dry soil-aggregate stability: Energybased index[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(6): 1663-1666.
- [3] Leys J, Koen T, Mctainsh G. The effect of dry aggregation and percentage clay on sediment flux as measured by a portable field wind tunnel[J]. *Soil Research*, 1996, 34(6): 849-861.
- [4] Li X J, Zhou R P, Jian H T, et al. Quantitative analysis of how different checkerboard sand barrier materials influence soil properties: A study from the eastern edge of the Tengger Desert, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(13): 481-495.
- [5] 李红丽, 万玲玲, 董智, 等. 沙柳沙障对沙丘土壤颗粒粒径及分形维数的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 540-545.
- [6] Yujie Dai, Zhi Dong, Hongli Li, et al. Effects of checkerboard barriers on the distribution of aeolian sandy soil particles and soil organic carbon[J]. *Geomorphology*, 2019, 338: 79-87.
- [7] 丁国栋, 董智主编. *荒漠化防治学*[M]. 北京: 中国林业出版社, 2021.
- [8] Jeffrey Skousena, Jae E. Yang, Jin-Soo Lee, et al. Review of fly ash as a soil amendment [J]. *Geosystem Engineering*, 2013, 16(3): 249-256.
- [9] 张正昊. 煤基固废与牛粪混合肥料在沙化土壤改良中的持续作用效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [10] Liu W, Ling N, Guo J, et al. Dynamics of the antibiotic resistome in agricultural soils amended with different sources of animal manures over three consecutive years[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123399.
- [11] 吴洪生, 陈小青, 周晓冬, 等. 磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化性状及小麦生长的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1262-1266.
- [12] Moon D H, Chang Y Y, Ok Y S, et al. Amelioration of acidic soil using various renewable waste resources [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, 21(1): 774-780.
- [13] 黄河. 不同改良剂对盐碱土的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [14] Gupta A K, Dwivedi S, Sinha S, et al. Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus vulgaris* grown in fly ash amended soil[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(17): 3404-3407.
- [15] 赵智, 唐泽军, 杨凯, 等. PAM 与粉煤灰改良沙土中重金属的迁移和富集规律[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 83-89.
- [16] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. *《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取—电感耦合等离子体质谱法》*[S]. HJ803-2016, 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [18] Gong L, Ran Q, He G, et al. A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146: 223-229.
- [19] 曹志洪, 周建民. *中国土壤质量*[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [20] 庞世龙, 欧芷阳, 申文辉, 等. 广西喀斯特地区不同植被恢复模式土壤质量综合评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(7): 60-66.
- [21] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 256-267.
- [22] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1843-1848.
- [23] 陶宝先, 张金池, 林杰, 等. 苏南丘陵不同林分类型土壤质量评价[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(6): 74-78.
- [24] 杨凯, 唐泽军, 赵智, 等. 粉煤灰和聚丙烯酰胺固沙效果的风洞试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 54-59.
- [25] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(4): 1-5, 12.
- [26] Su Y Z, Zhao H L, Zhao W Z, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. *Geoderma*, 2004, 122(1): 43-49.
- [27] 生骏, 陆文静, 王洪涛. 粉煤灰对污泥堆肥过程和土地施用后交换态重金属(Cu, Zn, Pb)的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(6): 1367-1371.
- [28] 张俊华, 尚天浩, 刘吉利, 等. 宁夏西吉县养牛场粪污和周边土壤重金属及细菌群落特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3119-3130.
- [29] 张智勇, 刘广全, 艾宁, 等. 吴起县退耕还林后主要植被类型土壤质量评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(2): 81-87.