

陈化粉煤灰用于毛乌素沙地光伏基地生态修复研究

张志强¹, 李京藏²

(1. 国电电力发展股份有限公司, 北京市, 100101; 2. 北京信息科技大学计算机学院, 北京市, 102206)

摘要 本文针对毛乌素沙地风沙土保水保肥能力差、煤电基地粉煤灰大量堆存及光伏电站建设扰动地表等现实问题,以国能锦界能源有限公司光伏基地陈化粉煤灰和当地牛粪为材料,通过盆栽试验研究不同配比的陈化粉煤灰-牛粪复合基质对风沙土理化性质及植物生长的影响。结果表明:陈化粉煤灰与风沙土复配后,土壤粘粉粒含量增加,抗风蚀能力增强,复配比例1:5~1:2(体积比)效果较理想;添加腐熟牛粪可有效中和粉煤灰碱性、胶结土壤颗粒形成团聚体,使粉煤灰安全添加上限从约25%提升至40%;复合基质按风沙土:基质=80:20比例施用,油葵和紫花苜蓿株高与生物量显著提升,土壤有机质、速效养分持续改善。研究为毛乌素沙地光伏基地生态修复及粉煤灰资源化利用提供了技术参考。

关键词 陈化粉煤灰;牛粪;风沙土;土壤改良;毛乌素沙地;光伏基地

中图分类号:S156.2 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)10-0017-03

毛乌素沙地地处鄂尔多斯高原东南部与陕北长城沿线过渡带,面积约7.33万km²,属典型农牧交错生态脆弱区。风沙土砂粒含量占90%以上,粘粉粒匮乏,结构松散,保水保肥能力极差。近年来,该区域被列为黄河“几字弯”攻坚战核心治理区,同时作为国家“沙戈荒”风电光伏基地重点布局区域,大规模光伏电站建设进一步加剧了地表扰动与风蚀水蚀风险^[1]。光伏板阵列的“狭管效应”可使板间风速提升40%~60%,板间地表年均风蚀深度可达3.2cm,板下土壤盐分含量比板间高出1.8倍。与此同时,我国北方煤电基地粉煤灰年产量超7.6亿吨,历史堆存超30亿吨,占地约100万亩。毛乌素沙地所在的榆林、鄂尔多斯地区是重要产灰区,大量陈化粉煤灰长期堆存于灰场,既占用土地又存在环境风险。如何将煤基固废资源化利用与沙地生态修复有机结合,成为亟待解决的关键问题^[2]。国内外研究表明,粉煤灰具有多孔结构和较大比表面积,可改善土壤持水保肥能力;与有机物料配施后,土壤容重降低、孔隙度增加,植物生长显著改善。现有研究多采用新鲜粉煤灰进行光伏基地生态修复,

对陈化粉煤灰关注不足,且多停留在实验室阶段,缺少面向光伏基地规模化应用的工程化方案^[3]。本研究以国电电力毛乌素沙漠光伏基地为对象,系统研究陈化粉煤灰与牛粪有机复合对风沙土的改良效应,探索“煤基固废资源化-生态修复-光伏治沙”协同路径。

1 材料与方法

1.1 研究区域与供试材料

研究区位于陕西省神木市大保当镇摆言采当村国能锦界能源有限公司光伏基地(E109.75°, N38.74°),海拔约1 284m,属温带大陆性季风气候,年均气温10.7℃,年降水量250~350mm,集中于7~9月,潜在蒸发量1 800~2 500mm。土壤类型以流动风沙土和半固定风沙土为主。所采用的陈化粉煤灰取自国能锦界能源有限公司蘑菇沟灰场,堆放时间6个月以上,陈化粉煤灰的容重为0.98g/cm³,PH值为8.35,电导率为225.4μS/cm,而新鲜粉煤灰的pH值为12.49,电导率为1 112μS/cm,陈化粉煤灰与新鲜粉煤灰相比,陈化后碱性显著降低,可溶性盐大幅减少。而且陈化粉煤灰的主要成分为SiO₂含量约为48.7%,Al₂O₃含量为28.3%,Fe₂O₃含量为8.6%。所采用的风沙土采自光伏基地板间表层30cm土,其中砂粒95.73%、粉粒4.05%、黏粒0.21%;容重为1.46g/cm³,pH为7.75,有机质为10.46g/kg,全氮含量为0.04%。所采用的牛粪取自神木澳牛牧业,经堆肥

作者简介:张志强(1975~),男,山东沂水人,本科,高级经济师,研究方向:能源政策。

表1 不同复配比例下土壤质地变化

粉煤灰:风沙土	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%	质地
0:1(CK)	95.73	4.05	0.21	砂土
1:5	78.2	18.5	3.3	壤质砂土
1:3	68.7	27.1	4.2	砂质壤土
1:2	60.4	34.6	5.0	砂质壤土
1:1	52.1	41.8	6.1	壤土

表2 不同处理对植物生长的影响(60d)

处理	粉煤灰:牛粪	油葵株高/cm	油葵生物量/g	苜蓿株高/cm	苜蓿生物量/g
CK	—	18.7±2.1e	4.3±0.6e	12.4±1.5e	3.2±0.4e
A	10%:60%	32.6±3.0d	9.1±1.0d	19.6±2.1d	6.1±0.7d
B	20%:50%	38.4±3.5c	10.8±1.2c	22.3±2.4c	7.4±0.8c
C	30%:40%	42.1±3.8b	12.0±1.3b	24.6±2.6b	8.0±0.9b
D	40%:30%	42.7±4.0a	12.4±1.4a	25.3±2.7a	8.2±0.9a
E	50%:20%	35.2±3.2c	9.8±1.1c	20.8±2.2c	6.5±0.7c

注:同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

表3 不同处理对土壤化学性质的影响

处理	有机质/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	pH
CK	10.46±1.2	18.5±2.1	4.3±0.5	26.0±3.0	7.75±0.10
A	18.5±2.0	45.6±4.2	12.8±1.4	68.5±6.5	7.92±0.08
B	23.4±2.5	58.7±5.3	16.9±1.8	86.3±8.0	8.05±0.09
C	30.2±3.1b	76.8±6.8b	22.5±2.3b	115.4±10.5b	8.12±0.08ab
D	32.6±3.3a	82.3±7.2a	24.6±2.5a	124.7±11.2a	8.18±0.09a
E	26.8±2.8c	65.4±6.0c	19.8±2.0c	98.6±9.0c	8.35±0.10a

腐熟处理。粗蛋白13.74%、粗纤维43.6%、N+P+K约0.9%。

1.2 试验设计

试验一:陈化粉煤灰与风沙土复配。设体积比1:1、1:2、1:3、1:5及纯风沙土对照(CK),共5个处理,3次重复。测定复配土粒度组成、容重、孔隙度、田间持水量及风蚀量。

试验二:陈化粉煤灰-牛粪复合基质配比优化。设15个处理组合,粉煤灰占比10%~50%,牛粪占比10%~60%,余量为风沙土。以纯风沙土为对照,种植油葵和紫花苜蓿,生长周期60d。测定植物株高、生物量、叶绿素含量及土壤理化指标。

1.3 测定方法

物理性质:环刀法测容重,烘干法测含水量,维尔科克斯法测田间持水量;化学性质:重铬酸钾氧化法测有机质,凯氏定氮法测全氮,钼锑抗比色法测有效磷,火焰光度法测速效钾,电位法(水土比2.5:1)测pH;重金属:ICP-MS测定总量,原子荧光法测砷。风蚀量:室内风洞模拟(风速6、10、14m/s)。

1.4 数据处理

采用SPSS 26.0进行单因素方差分析(ANOVA)

和Duncan多重比较($\alpha=0.05$),Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 陈化粉煤灰对风沙土物理性质的改良

风沙土添加陈化粉煤灰后,土壤质地发生系统性转变(表1)。随粉煤灰比例增加,砂粒含量从95.73%降至52%~78%,粉粒含量从4.05%升至18%~42%,黏粒含量从0.21%上升至2%~6%。当粉煤灰添加比例达30%~40%时,土壤质地由砂土转变为砂质壤土或壤土。

复配后土壤容重从1.46g/cm³降至0.98~1.28g/cm³,总孔隙度从44.9%增至51.7%~63.0%,田间持水量从8.3%增至15.6%~28.9%。持水实验表明,补水7d后纯风沙土含水率仅剩5.7%~11.9%,而添加粉煤灰后(1:1)可维持在15.0%~28.9%。风洞试验表明,复配比例1:5~1:2时抗风蚀能力最佳,风蚀量较纯风沙土降低62%~85%。

2.2 陈化粉煤灰-牛粪复合基质对植物生长的影响

复合基质按风沙土:基质=80:20施用后(表2),油葵株高较CK增加74.5%~128.7%,地上部生物量增加112.6%~189.3%;紫花苜蓿株高增加58.3%~104.2%,生物量增加89.7%~156.8%。随粉煤灰占比

从10%增至40%,植物生长指标持续提升;但当粉煤灰占比达50%时,各项指标均出现下降。

2.3 复合基质对风沙土化学性质的影响

施用复合基质60d后(表3),土壤有机质含量从10.46g/kg增至18.5~32.6g/kg,增幅77%~212%;碱解氮从18.5mg/kg增至45.6~82.3mg/kg;有效磷从4.3mg/kg增至12.8~24.6mg/kg;速效钾从26.0mg/kg增至68.5~124.7mg/kg。C处理(粉煤灰30%+牛粪40%)和D处理(粉煤灰40%+牛粪30%)效果最优,土壤肥力指标均达到或超过表3.6设计要求(全氮 ≥ 0.3 g/kg、有效磷 ≥ 2 mg/kg、速效钾 ≥ 50 mg/kg、有机质 ≥ 2 g/kg)。

3 讨论

3.1 陈化处理对粉煤灰安全利用的关键作用

新鲜粉煤灰pH值可达10~12,含大量游离CaO和可溶性盐,直接施用易造成“烧苗”和次生盐碱化。本研究所用陈化粉煤灰经6个月以上自然堆放,pH从12.49降至8.35,EC从1112 μ S/cm降至225.4 μ S/cm。雨水淋溶消除了大部分游离CaO和可溶性盐,同时f-CaO与CO₂反应生成CaCO₃,体积安定性问题得以解决。因此,陈化是粉煤灰农用安全性的关键前置环节,建议陈化时间不少于3~6个月并经历至少一个完整雨季。

3.2 有机质协同提升粉煤灰添加阈值

单纯添加粉煤灰存在“细孔隙增加→毛细蒸发增强→盐分表聚”的风险^[2]。本研究发现,当风沙土添加陈化粉煤灰超过25%(体积比)时,EC值在干旱期上升较快,存在次生盐碱化隐患。但加入腐熟牛粪后,有机质胶结粉煤灰粉粒与风沙土砂粒形成团聚体,改善孔隙结构、切断毛细管通道,同时有机酸中和碱性、络合盐基离子,使粉煤灰安全添加上限提升至约40%。

3.3 与同类研究的比较

田超等研究表明^[5-6],粉煤灰120t/hm²+有机肥30 t/hm²配施时黑麦草长势最优。朱晓月等发现10%粉煤灰复配条件下风沙土肥力最高。本研究结论与之吻合,同时进一步明确了陈化粉煤灰与牛粪的体积配比范围(粉煤灰30%~40%、牛粪30%~40%)及施用方式(复合基质:风沙土=20:80),为工

程化应用提供了量化依据。

3.4 工程应用前景

经济性分析表明,陈化粉煤灰替代红黏土和黄土用于场地平整复配材料,每公顷可降低成本3.7万元~11.5万元。若在场平整阶段同步提升土壤肥力,陈化粉煤灰复合基质(粉煤灰40%+牛粪60%)成本为红黏土+商品有机肥方案的53.25%、黄土+商品有机肥方案的53.69%。该方案兼具技术可行性与经济可行性,可为毛乌素沙地光伏基地生态修复提供可复制模板。

4 结论

本研究结果表明,陈化粉煤灰与风沙土进行复配能够有效改良土壤质地,提升土壤持水性能,在体积比1:5~1:2的复配范围内可实现良好的抗风蚀效果。综合来看,陈化粉煤灰体积占比20%~25%可作为基础推荐施用区间。腐熟牛粪对提高粉煤灰安全添加占比具有关键作用,在风沙土、陈化粉煤灰与腐熟牛粪三者协同配施条件下,粉煤灰的安全添加上限可由约25%提升至40%左右。将陈化粉煤灰-牛粪复合基质按照风沙土:基质80:20的比例投入应用,能够显著推动油葵、紫花苜蓿的生长发育,同时实现土壤肥力的持续性改良。基于本研究室内试验所得结果,后续可推进小区域示范工程开展实地验证,同步推动配套技术标准的研究与编制工作。

参考文献

- [1] 刘海龙,陈坤娇,王雪雪,等.毛乌素沙地固沙林恢复对持水能力的影响[J].环境与发展,2026,38(3):37-45.
- [2] 屈楠,卢杰,王子明,等.毛乌素沙地生态环境质量时空演变及驱动因素[J].水土保持通报,2025,45(5):336-346+432.
- [3] 李明哲,马淑花,王建兵,等.改性粉煤灰对沙土物理特性改良效果研究[J].过程工程学报,2022,22(2):204-213.
- [4] 李占宏,白守德,崔志永,等.利用粉煤灰改良风沙土物理性质的研究[J].安徽农业科学,2011,39(36):22399-22400+22548.
- [5] 田超,等.粉煤灰与有机肥配施对风沙土理化性质及黑麦草生长的影响[J].中国土壤与肥料,2022(7).
- [6] 卢海峰,李中洋,张凯.改性粉煤灰材料固沙特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(S1):3374-3384.