

庄会永,冯益明,杨岩岩,等.生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同使用的荒漠化治理效应——以阿拉善光伏基地为例[J].中国沙漠,2026,46(4):59-65.

生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同使用的荒漠化治理效应 ——以阿拉善光伏基地为例

庄会永^{1,2}, 冯益明³, 杨岩岩³, 刘永萍⁴, 宁虎森⁴

(1.国能生物发电集团有限公司,北京 100000; 2.清华大学,北京 100084; 3.中国林业科学研究院 生态保护与修复研究所,北京 100091; 4.新疆林业科学院 造林治沙研究所,新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要:以阿拉善盟乌兰布和100 MW光伏项目流动沙地为对象,设置处理组(光伏板间布设生物质灰渣砖沙障+施用自制土壤改良剂+种植杨柴、花棒等4种灌木)与对照组样方,通过监测风沙指标、土壤理化性质与植被特征,系统量化生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂的协同治沙效应。结果表明:(1)处理组综合覆盖度、灌木存活率、总生物量均显著优于对照组,板间花棒表现最佳,而板间四翅滨藜存活率仅8.00%,不适宜该区域种植。(2)防风固沙方面,处理组输沙量、单宽输沙率、风沙通量较对照组显著降低,其中板间花棒、板间杨柴、板间沙拐枣输沙量均小于18 g。(3)0~20 cm土层砂粒占比从对照组的99.19%~99.23%降至处理组97.61%~98.90%,粉粒占比从0.77%~0.81%升至1.10%~1.80%,部分模式出现黏粒,且土壤有机质、总碳含量显著高于对照组,其中板间花棒碳库累积效应最突出,土壤pH值、电导率、速效氮、速效磷、速效钾等其他土壤理化性质较对照组也均有明显改善。综上,生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同作用可实现防风固沙、土壤改良与生态修复的综合效益,达成废弃物资源化-荒漠化治理-生态修复的协同效应,且该技术成本较低、市场应用潜力大。

关键词:生物质灰渣砖;沙障;土壤改良剂;荒漠化治理效应;阿拉善光伏基地

文章编号:1000-694X(2026)04-059-07

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00198

中图分类号:X71

文献标志码:A

0 引言

中国荒漠及荒漠化土地面积达261.16万km²,占国土总面积的27.2%^[1],该区域兼具生态脆弱性与能源开发潜力(年均日照时长2 600~3 400 h的充沛光资源),使其成为中国推进能源结构转型、实现“双碳”目标的核心光伏布局区。截至2024年末,中国沙戈荒大型光伏基地已投产装机容量达9 000万kW,相当于4.5个三峡电站(总装机容量2 000万kW)的规模;预计到2030年,沙戈荒光伏总装机容量将进一步提升至4.55亿kW,年发电量可满足3.5亿家庭用电需求,年减少二氧化碳排放3.8亿t^[2]。

然而,沙戈荒地区频发的沙尘天气,成为光伏

项目稳定运行的关键瓶颈:沙尘覆盖会降低光伏组件透光率,导致发电效率衰减(1 mm厚沙尘层可使效率下降15%~30%),同时强风裹挟的沙粒会磨损组件玻璃、侵蚀电气设备,缩短设备使用寿命^[3-4]。此外,光伏区沙质地表存在有机质含量<1%、微生物群落单一、氮磷钾匮乏等问题,自然条件下难以支撑固沙植物定植。

沙障作为荒漠化治理的关键技术,通过机械阻挡和微环境调控来实现防风固沙的功能。目前在实际应用中广泛使用的沙障,例如黏土沙障、草方格沙障、塑料网格沙障等,在荒漠化治理过程中发挥了积极作用,但也存在一定的局限性。黏土沙障会消耗耕地资源,且生态活性较低;草方格沙障的

收稿日期:2025-11-04; 改回日期:2025-12-08

资助项目:国能生物发电集团有限公司科技项目(KY-C-2025-GX01);新疆重点研发项目(2024B0302)

作者简介:庄会永(1971—),男,山东莒南人,教授级高工,主要从事生物能源研究。E-mail:hyzhuang@163.com

通信作者:冯益明(E-mail:fengym@caf.ac.cn)

使用年限相对较短;塑料网格沙障则难以降解^[5-9]。近年来,工业固废-农业废弃物协同资源化利用成为生态材料研发领域的热门研究议题^[10-12],其中生物质废弃物(玉米秸秆、木屑等)具有质轻、可降解且富含大量有机质的特点^[13-14],而生物质灰渣(生物质能利用副产物)则富含钾、钙、镁等速效养分^[15],以其为核心原料,搭配适量有机可降解黏合剂,通过配料、混合、加压等工艺制备成砖,可兼顾结构稳定性与生态功能性,为新型沙障的研发提供了材料基础。

当前,生物质灰渣砖沙障的研究多局限于室内模拟或短期小尺度试验^[10-11],缺乏沙戈荒光伏区野外长期观测数据,其防风效率、土壤改良机制及与土壤改良剂的协同效应尚未明确。基于此,本文以阿拉善盟乌兰布和100 MW光伏项目流动沙地为研究区,通过布设生物质灰渣砖沙障并配施自制土壤改良剂,系统监测防风固沙、土壤理化性质及植被生长动态,量化协同治沙效应,为沙戈荒光伏区提供低成本、高生态效益的技术范式。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 沙障材料

采用模压生物质灰渣砖,原材料为生物质炉灰、生物质炉渣及草木灰,砖体规格为40 cm×20 cm×20 cm(长×宽×高),空心内径15 cm。沙障按4 m×2 m网格状铺设。

1.1.2 土壤改良剂

将生物质电厂废弃物炉灰与炉渣混合物:泥炭按70:30质量比混合均匀;向上述混合物中添加微生物浓缩菌剂(含枯草芽孢杆菌与胶冻样类芽孢杆菌,有效活菌数 $\geq 1\,000$ 亿cfu·g⁻¹),添加量为10 g·kg⁻¹,制成土壤改良剂。施用是按4 500 g·m⁻²撒施于沙地表层,采用旋耕机(深度15 cm)将改良剂与沙土混合均匀。

1.2 试验区概况

试验地位于阿拉善盟乌兰布和生态沙产业示范区100 MW光伏项目区(39°46′51.97″N, 106°37′45.05″E),地势平坦(坡降1%,西向东倾斜),属中温带大陆性干旱气候:多年平均气温8.8℃,年降水量168.5 mm(集中于5—9月),年蒸发量3 249

mm,平均风速2.7 m·s⁻¹(主导风向SE风、SSE风),年扬沙日数38 d,年日照时数3 125.8 h。

试验区土壤以沙土为主(砂粒占比>99%),原生植被为温带荒漠化草原,建群种为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、垫状锦鸡儿(*Caragana tibetica*)。光伏项目于2023年5月建成发电,同步开展13 hm²沙漠生态治理试验(光伏板间布设生物质灰渣砖沙障+施用土壤改良剂+种植固沙灌木)。

1.3 样地设置及调查

依托国家电投集团北京公司阿拉善盟乌兰布和生态沙产业示范区100 MW光伏沙漠治理项目,建设13 hm²生态治理试验区。试验区划分为5个2.7 hm²试验小区。在4个试验小区(处理组T),沿光伏铺设方向,在光伏板间铺设生物质灰渣砖沙障+施用土壤改良剂,在沙障网格中间,不同试验小区分别种植杨柴容器苗(T1)、沙拐枣容器苗(T2)、四翅滨藜容器苗(T3)和花棒容器苗(T4),株距1 m,行距2 m,另一试验小区光伏板间不作处理,作为对照组(CK)。处理组与对照组微环境基本一致。

样地设置:沿光伏铺设方向每150 m设1个样方,样方大小5 m×5 m。每个试验小区布设36个样方,共180个样方,即4种植被模式(板间杨柴、板间沙拐枣、板间四翅滨藜、板间花棒)以及对照样方各36个。

样地调查:于2025年5月和10月,对各试验小区监测样方进行调查。主要调查植被覆盖度、生物量、输沙量、土壤颗粒组成、土壤碳库与有机质等。

1.4 监测指标与方法

1.4.1 植被恢复效应

植被覆盖度调查:采用针刺法,调查植被覆盖度。

生物量调查:采用刈割法与根系挖掘法,在植物生长季(5月和10月)进行。各试验小区典型区内,分别设置3个1 m×1 m破坏性草本采样样方,3个5 m×5 m破坏性灌木采样样方。①草本生物量调查:地上生物量的采集方法为齐地面剪取样方内所有草本植物。地下生物量的采集方法为挖掘样方内0~30 cm深度土壤,筛分出所有根系。将地上、地下样品,在65℃烘箱中烘干至恒重,用天平称重。②灌木生物量调查:采用相对生长法获取灌木地上生物量。逐株记录灌木物种名称、株高、地径、冠幅

等信息,参考《中国常见灌木生物量模型手册》进行灌木地上、地下生物量推算^[16]。

1.4.2 防风固沙效应

输沙量监测:分别于试验处理组(T1、T2、T3、T4)与对照组CK小区,各选择3个典型样方,同步设置3个集沙仪(高度范围为0~50 cm,开口面积为0.1 m²),于2025年5月和10月,分别连续15 d,收集集沙仪内的沙样,经烘干处理(温度为105 °C,时长24 h)后称重,计算0~50 cm土层的输沙量。

按公式计算单宽输沙率 Q :

$$Q = W / (L \cdot \Delta T)$$
 (1)

式中: Q 为输沙率(kg·m⁻¹·d⁻¹); W 为集沙量(kg); L 为集沙仪进沙口宽度(m); ΔT 为时间(d)。

按公式计算风沙通量 $q(h)$:

$$q(h) = W / (S \cdot \Delta T)$$
 (2)

式中: $q(h)$ 为输沙通量(kg·m⁻²·d⁻¹); W 为集沙量(kg); S 为集沙仪进沙口面积(m²); ΔT 为时间(d)。

1.4.3 土壤改良效应

土壤颗粒组成:采集0~10、10~20 cm土层土样,自然风干后过2 mm筛,采用激光衍射粒度分析仪

(Mastersize 3000,英国)测定,粒级划分参照美国制(砂粒2~0.05 mm,粉粒0.05~0.002 mm,黏粒<0.002 mm)。

土壤碳库与有机质:采集0~10 cm、10~20 cm土层土样,采用重铬酸钾氧化-外加热法测有机质含量,元素分析仪(Vario EL III,德国)测有机碳、无机碳及总碳含量。

其他土壤理化性质(pH值、电导率、速效氮、速效磷、速效钾):采集0~20 cm土层土样,分别使用pH计、电导仪测定土壤的pH值和电导率值。分别运用扩散吸收法、碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法、火焰光度法测定土壤中速效氮、速效磷、速效钾的含量。

2 结果与分析

2.1 植被恢复效应

由表1可知,各处理组样方植被覆盖度、灌木存活率及生物量均显著高于CK样方($P<0.05$),且不同植被模式差异显著。

表1 不同样方植被恢复特征

Table 1 Vegetation restoration characteristics in different sample plots

样方	植被模式	草本覆盖度 /%	灌木覆盖度 /%	综合覆盖度 /%	灌木存活率 /%	地上生物量 /(g·m ⁻²)	地下生物量 /(g·m ⁻²)	总生物量 /(g·m ⁻²)
CK 样方	板间对照	2.17 ^d	0.00 ^c	2.17 ^d	—	0.00 ^d	0.00 ^d	0.00 ^d
T处理样方	板间杨柴	49.33 ^a	27.00 ^b	76.33 ^b	79.33 ^b	23.38 ^b	28.14 ^b	51.52 ^b
	板间沙拐枣	50.33 ^a	22.00 ^c	72.33 ^b	77.67 ^b	21.50 ^b	23.56 ^c	45.06 ^c
	板间四翅滨藜	27.33 ^c	0.00 ^c	27.33 ^c	8.00 ^c	5.27 ^c	7.23 ^d	12.50 ^d
	板间花棒	49.00 ^a	32.00 ^a	81.00 ^a	85.00 ^a	38.32 ^a	53.75 ^a	92.07 ^a

注:同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

覆盖度:草本覆盖度表现为板间沙拐枣(50.33%)>板间杨柴(49.33%)>板间花棒(49.00%)>板间四翅滨藜(27.33%);灌木覆盖度以板间花棒最高(32.00%),板间四翅滨藜为0;综合覆盖度为板间花棒(81.00%)>板间杨柴(76.33%)>板间沙拐枣(72.33%)>板间四翅滨藜(27.33%)。

灌木存活率:板间花棒(85.00%)>板间杨柴(79.33%)>板间沙拐枣(77.67%)>板间四翅滨藜(8.00%)。这表明生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同作用,结合植被建植,对区域荒漠化治理有着积极作用。板间花棒、板间杨柴及板间沙拐枣均具有较好的植被覆盖度和灌木存活率,说明模式植物

选择与光伏区环境相适宜,可作为光伏区生态治理的优选植物措施进行推广。

生物量:总生物量板间花棒(92.07 g·m⁻²)>板间杨柴(51.52 g·m⁻²)>板间沙拐枣(45.06 g·m⁻²)>板间四翅滨藜(12.50 g·m⁻²),且板间花棒的地上、地下生物量均为最高,表明这种模式在相同条件下更有利于有机物质的积累。

花棒在综合覆盖度、灌木存活率、总生物量3个维度上均显著优于其他植物,说明其适应性最强,对于沙漠光伏区的特殊环境有更强的适应性,建议作为光伏区生态修复的首选灌木。四翅滨藜表现较差,可能与其耐旱性或土壤适应性有关,建议后

续研究中剔除或优化种植条件。

2.2 防风固沙效应

由表2可知,CK样方风沙活动显著大于各处理组样方($P<0.05$)。CK样方输沙量、单宽输沙率、风沙通量分别为526.52 g、1 253.02 $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、561.10 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,而处理组样方各指标均显著降低(降幅89.9%~96.9%)。这表明生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同作用,对区域植被生长有明显促进作用,防风固沙效应显著。

由表2可以看出各处理组样方内不同植被模式差异显著:输沙量以板间花棒最低(15.91 g),板间四翅滨藜最高(42.49 g);单宽输沙率与风沙通量板间四翅滨藜~板间沙拐枣<板间花棒<板间杨柴。综合来看,板间花棒、板间杨柴、板间沙拐枣的输沙量均<18 g,防风固沙效果均表现较好,表明板间花棒、板间杨柴、板间沙拐枣模式具有良好的风沙流拦阻控制作用,可作为光伏区防风固沙的优选植物措施进行推广。四翅滨藜虽有一定效果,但远不如其他三者,不适合推广。

表 2 不同样方地表风沙运动特征

Table 2 Characteristics of surface aeolian sand movement in different sample plots

样方	植被模式	输沙量 /g	单宽输沙率 /($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	风沙通量 /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
CK 样方	板间对照	526.52 ^a	1 253.02 ^a	561.10 ^a
T 处理样方	板间杨柴	16.36 ^c	467.11 ^b	329.05 ^b
	板间沙拐枣	17.23 ^c	44.16 ^c	16.21 ^c
	板间四翅滨藜	42.49 ^b	46.07 ^c	17.12 ^c
	板间花棒	15.91 ^c	102.04 ^c	45.01 ^c

注:同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

2.3 土壤改良效应

2.3.1 土壤颗粒组成

由表3可知,CK样方0~20 cm土层以砂粒为主(占比99.19%~99.23%),粉粒仅0.77%~0.81%,无黏粒;而各处理组样方0~20 cm土层砂粒占比显著降低(97.61%~98.90%),粉粒占比提升至1.10%~1.80%,且部分植被模式出现黏粒($P<0.05$)。

表 3 不同样方 0~20 cm 土层理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of 0~20 cm soil layer in different sample plots(soil organic matter and total carbon content)

土层深度	样方	植被模式	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%	有机质 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机碳 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	无机碳 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总碳 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0~10 cm	CK 样方	板间对照	99.23 ^a	0.77 ^c	0.00 ^b	1.25 ^d	0.72 ^d	1.13 ^d	1.85 ^d
	T 处理 样方	板间杨柴	98.72 ^b	1.13 ^b	0.15 ^a	3.86 ^b	2.24 ^b	1.89 ^b	4.13 ^b
		板间沙拐枣	98.78 ^b	1.22 ^b	0.00 ^b	3.37 ^c	1.97 ^c	2.59 ^a	4.56 ^a
		板间四翅滨藜	98.63 ^b	1.37 ^a	0.00 ^b	3.77 ^b	2.20 ^b	1.88 ^b	4.08 ^b
		板间花棒	97.77 ^c	1.80 ^a	0.43 ^a	4.53 ^a	2.63 ^a	3.42 ^a	6.05 ^a
		板间四翅滨藜	98.63 ^b	1.37 ^a	0.00 ^b	3.77 ^b	2.20 ^b	1.88 ^b	4.08 ^b
10~20 cm	CK 样方	板间对照	99.19 ^a	0.81 ^c	0.00 ^b	1.08 ^d	0.61 ^d	0.59 ^d	1.20 ^d
	T 处理 样方	板间杨柴	98.56 ^b	1.18 ^b	0.26 ^a	3.42 ^b	1.98 ^b	2.04 ^b	4.02 ^b
		板间沙拐枣	98.66 ^b	1.19 ^b	0.15 ^a	2.80 ^c	1.62 ^c	2.48 ^a	4.10 ^b
		板间四翅滨藜	98.90 ^b	1.10 ^b	0.00 ^b	3.25 ^b	1.90 ^b	1.62 ^c	3.52 ^c
		板间花棒	97.61 ^c	1.19 ^b	0.39 ^a	4.18 ^a	2.43 ^a	2.79 ^a	5.22 ^a
		板间四翅滨藜	98.90 ^b	1.10 ^b	0.00 ^b	3.25 ^b	1.90 ^b	1.62 ^c	3.52 ^c

注:同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

0~10 cm 土层,板间花棒黏粒占比最高(0.43%),板间杨柴次之(0.15%),板间沙拐枣与板间四翅滨藜无黏粒;10~20 cm 土层,板间花棒黏粒占比0.39%,板间杨柴0.26%,板间沙拐枣0.15%,板间四翅滨藜无黏粒。这表明板间花棒与板间杨柴对土壤质地改良效果更优,而板间四翅滨藜无黏粒

积累,改良效果有限。

2.3.2 土壤理化性质

由表3可知,各处理组样方土壤有机质、有机碳、无机碳及总碳含量均显著高于CK样方($P<0.05$)。

土壤有机质含量:0~10 cm 土层,板间花棒(4.53 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>板间杨柴(3.86 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>板间四翅滨

藜($3.77\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>板间沙拐枣($3.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>CK样地($1.25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。这表明生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同,配合植被建植,对区域土壤改良作用明显,板间花棒、板间杨柴植被建植模式效果较优。

总碳含量:板间花棒($6.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>板间沙拐枣($4.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>板间杨柴($4.13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>板间四翅滨藜($4.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>CK样地($1.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$);有机碳与无机碳变化趋势与总碳一致,且板间花棒的碳库累积效应最显著。这表明生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同作用,配合植被建植,对区域土壤碳增加明显。另外,各处理组样方中,板间花棒模式在土壤碳汇能力提升方面表现最突出,说明该植被建设模式提高土壤碳固存能力较强,可用作光伏区提高土壤碳汇优选植物。

土壤其他理化性质:由表4可知,各处理组样方平均土壤pH值、电导率、速效氮、速效磷、速效钾等较对照组样方均有明显改善。CK样方pH值为6.72,经过生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂的运用以及人工栽种灌木容器苗,土壤pH提升到7.26,处于中性水平;同时,电导率由 $62.7\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 提升到 $87.5\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,提升了39.55%;速效氮、速效磷、速效钾含量处理组较对照组分别提升了31.43%、14.29%、11.29%。这表明生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同作用,对区域土壤理化性质也有一定的改善。

表4 不同样方0~20 cm土层土壤其他理化性质
Table 4 Other physical and chemical properties of 0~20 cm soil layer in different sample plots

样方	pH值	电导率(EC) $/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	速效氮 $/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	速效磷 $/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	速效钾 $/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
CK样方	6.72 ^a	62.7 ^a	3.5 ^a	0.91 ^a	18.6 ^a
T处理样方	7.26 ^b	87.5 ^b	4.6 ^b	1.04 ^b	20.7 ^b

注:同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

2.4 生态经济效益

2.4.1 成本

生物质灰渣砖:主料来源于生物质电厂废弃物(炉灰与炉渣),主原料成本 $0\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$,辅料 $600\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$,主、辅料掺配比9:1,原料价格约为 $66.7\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$,每立方米原料可压制成200块砖,按 $4\text{ m}\times 2\text{ m}$ 网格状铺设,用料成本约 $1.25\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$ 。灰渣砖形状规则,适于机械作业,铺设成本低于黏土、草方格等沙障,综合考量,生物质灰渣砖及铺设成本约为 $1.55\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$,低于黏土沙障综合成本 $1.87\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$ (降低了17.1%),也

低于草方格沙障标价 $2.92\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$ (降低了46.9%)^[17]。

土壤改良剂:生物质电厂废弃物(炉灰与炉渣)质量占比70%,该部分成本 $0\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$;泥炭占30%,泥炭多就近取材,成本基本可以忽略;辅料为微生物浓缩菌剂,添加量 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,按 $4\ 500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 撒施土壤改良剂,综合成本约 $4.5\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$ 。实践中,为节约成本,可以不施土壤改良剂。

2.4.2 生物质灰渣资源可利用潜力

生物质能源产业的快速发展催生了海量生物质灰渣,根据2019年石炎等^[18]测算,中国生物质灰渣年总产量约4 000万t。每立方米生物质灰渣可压制200块规格为 $40\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 砖,若按 $4\text{ m}\times 2\text{ m}$ 网格状铺设沙障方案,200块砖可覆盖 32 m^2 区域。据此推算,全国每年4 000万 m^3 生物质灰渣若全部用于制砖、铺设,可覆盖土地面积约 $1\ 280\text{ km}^2$,彰显了其在生态修复领域的巨大应用潜力。

2.4.3 环境安全性与生态友好性

生物质灰渣富含钾、钙、镁等植物速效养分,以其为主材制成的砖体,经第三方检测机构检测验证,其主要重金属元素(Pb、Cd、Cr、As、Hg等)含量均远低于GB 3838、GB/T 14848或GB 5749标准限值,环境安全性符合生态应用要求^[19]。

将生物质灰渣应用于荒漠区生态治理,其富含的养分可被荒漠生态系统缓慢吸收利用,不会向环境中引入新的污染因子,体现了资源化利用与生态保护的协同性。

3 讨论

3.1 协同治沙机制

生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂的协同效应源于三方面。物理拦截:生物质灰渣砖 $4\text{ m}\times 2\text{ m}$ 网格结构可直接阻挡风沙流,降低近地表风速^[15],且其缓慢风化特性(4~5 a开始风化)可延长固沙时效,优于传统草方格沙障(2~3 a失效)^[20];土壤改良:灰渣砖风化释放的钙、镁离子促进土壤胶体形成,泥炭提供腐殖质提升有机质含量,微生物菌剂(枯草芽孢杆菌分泌纤维素酶、胶冻样类芽孢杆菌活化钾磷)进一步强化养分供应^[13-14];植被-土壤反馈:优选灌木(花棒、杨柴)的根系分泌有机酸可促进灰渣养分释放,枯枝落叶补充有机质,形成沙障固沙-改良剂养土-植被固土的正反馈循环。

3.2 与已有研究的对比

本研究开展了生物质灰渣砖沙障野外短期验证。Yuan等^[10]的室内模拟显示生物质灰渣材料可降低输沙量50%~70%,而本研究野外试验中处理组样方输沙量降幅达89.9%以上,表明协同作用(沙障+改良剂+植被)的实际效果优于单一材料;Qiu等^[11]指出生物质灰渣的碳含量可提升土壤碳库,本研究进一步证实板间花棒模式可使总碳含量提升227%(从1.85 g·kg⁻¹至6.05 g·kg⁻¹),为光伏区固沙-固碳协同提供新证据。

3.3 研究局限性与展望

本研究仅开展了2025年5、10月两次监测,未来需开展5~10 a长期定位观测,分析生物质灰渣砖的风化动态、土壤碳库的长期累积趋势及植被群落的演替规律;同时可探索不同沙障网格尺寸(如3 m×3 m、4 m×4 m)与改良剂施用量(如3 500 g·m⁻²、5 000 g·m⁻²)的优化组合,进一步优化治理效果、降低治理成本。

此外,生物质灰渣砖的规模化应用需关注两点:灰渣原料的重金属安全性(本研究参照NY/T525-2021标准,Pb、Cd、Cr、As、Hg等限量符合要求);光伏板与沙障、植被的空间配置(如板高、行距)对光照与防风效果的影响,需结合光伏发电效率开展耦合研究。

4 结论

各处理组样方植被综合覆盖度(27.33%~81.00%)、灌木存活率(8.00%~85.00%)及总生物量(12.50~92.07 g·m⁻²)均显著高于CK样方;板间花棒表现最优(综合覆盖度81.00%、存活率85.00%、总生物量92.07 g·m⁻²),板间四翅滨藜不适宜试验区光伏板间种植。

生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同作用,配合植被建植,可显著降低风沙活动强度,各处理组样方输沙量、单宽输沙率及风沙通量较CK组样方降幅达89.9%~96.9%;其中板间花棒、板间杨柴、板间沙拐枣模式防风效果较优,输沙量均<18 g。

生物质灰渣砖沙障与土壤改良剂协同作用,配合植被建植,可降低土壤砂粒占比(从99.23%降至97.61%),提升粉粒(从0.77%升至1.80%)与黏粒(最高达0.43%)占比;同时,显著提升土壤有机质(最高达4.53 g·kg⁻¹)与总碳含量(最高达6.05 g·kg⁻¹),尤其

是板间花棒的土壤碳库累积效应最显著。

板间花棒与板间杨柴在防风固沙、土壤改良及植被恢复方面综合表现最优,可作为沙戈荒光伏区生态治理的优选植被模式推广。

生物质灰渣砖沙障成本低廉,原料+铺设综合成本约1.55元·m⁻²,分解后的生物质灰渣砖以及土壤改良剂富含的养分可被荒漠生态系统缓慢吸收利用,且不会向环境中引入新的污染,实现了废弃物资源化-荒漠化治理-生态修复的协同效应,可在干旱半干旱流动沙地进行推广应用。

参考文献:

- [1] 国家林业和草原局.中国荒漠化和沙化状况公报(2021年)[R].北京:中国林业出版社,2022.
- [2] 刘明洋,王靖.“光伏长城”让“死亡之海”变能源绿洲[N/OL].新华网,2025-08-26. <https://www.xinhuanet.com/politics/20250827/c418e65035aa4cb395be65163e37923e/c.html>.
- [3] 李诗源,徐路遥,李兴财,等.风沙环境下光伏板表面积尘仿真及其透光率研究[J].宁夏大学学报(自然科学版),2024,45(3):267-272.
- [4] 东方,马玉峰,达布希拉图,等.内蒙古地区光伏发电工程气象灾害风险评估及区划[J].太阳能学报,2025,46(8):564-572.
- [5] 毛亚娜,薛春晓,刘世忠.酒额铁路不同沙障防沙性能对比[J].灾害学,2023,38(3):48-52.
- [6] 王学全,卢琦,杨恒华,等.高寒沙区沙障固沙效益与生态功能观测研究[J].水土保持学报,2009,23(3):38-41.
- [7] 孙涛,刘虎俊,朱国庆,等.3种机械沙障防风固沙功能的时效性[J].水土保持学报,2012,26(4):12-16+22.
- [8] 石麟,李红悦,赵雨兴,等.毛乌素沙地流动沙丘不同沙障组合措施的防风固沙效益评价[J].干旱区研究,2023,40(2):268-279.
- [9] 蔡立坤,丁国栋,曲梦雨.基于数值模拟的网格沙障孔隙率-风速耦合机制与防风固沙效能评价[J].干旱区资源与环境,2025,39(8):104-115.
- [10] Yuan S N, Hong M F, Li H, et al. Contributions and mechanisms of components in modified biochar to adsorb cadmium in aqueous solution[J]. Science of the Total Environment, 2020, 733:139320.
- [11] Qiu C C, Xu L W, Geng W J, et al. Evolutionary behaviors of straw-reinforced slurry for sustainable management of dredging sediment: rheological and fertility properties[J]. Waste and Biomass Valorization, 2025, 16(3): 1057-1071.
- [12] 张旺兴,邵吉成.河湖库底泥清除、处置及资源化利用技术研究进展[J].环境工程学报,2025,19(10):2363-2373.
- [13] Yang L Y, Cheng Q, Zhuang W E, et al. Seasonal changes in the chemical composition and reactivity of dissolved organic matter at the land-ocean interface of a subtropical river[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(24): 24595-24608.
- [14] 张磊,刘艳,王栋,等.生物质-矿渣复合生态砖的制备及性能

- 研究[J].材料导报,2021,35(增刊2):456–460.
- [15] Liang F, Li B Z, Vogt R D, et al. Straw return exacerbates soil acidification in major Chinese croplands[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 198: 107176.
- [16] 谢宗强, 王杨, 唐志尧, 等. 中国常见灌木生物量模型手册[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [17] 王玉才, 张恒嘉. 五种机械沙障的固沙效果研究[J]. 中国水运, 2016, 16(8): 314–315.
- [18] 石炎, 薛聪, 邱宇平. 农林生物质直燃电厂灰渣资源化技术分析展望[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 127–139.
- [19] 李汉卿, 王军, 汤政, 等. 生物质电厂灰渣理化特性及土地利用潜在生态环境风险评价[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(22): 54–59.
- [20] 赵哈林, 周瑞莲, 曲浩, 等. 沙障对流动沙地土壤水分和植被恢复的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 923–930.

Desertification control effect of synergistic utilization of biomass ash brick sand barriers and soil amendments—taking the Alxa photovoltaic base as an example

Zhuang Huiyong^{1,2}, Feng Yiming³, Yang Yanyan³, Liu Yongping⁴, Ning Husen⁴

(1. National Energy Biomass Power Generation Group Co., Ltd., Beijing 100000, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Institute of Afforestation and Desertification Control, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China)

Abstract: Taking the mobile sand dunes of the 100 MW photovoltaic project in Wulan Buh of Alxa League as the research object, a treatment group T (arranging biomass ash brick sand barriers between photovoltaic panels + applying self-made soil amendment + planting 4 shrub species including *Hedysarum mongolicum*, *Hedysarum scoparium*, etc.) and a control group CK were set up. By monitoring aeolian sand indicators, soil physical and chemical properties, and vegetation characteristics, the synergistic desertification control effect of biomass ash brick sand barriers and soil amendment was systematically quantified. The results showed that: (1) In terms of vegetation restoration, the comprehensive coverage, shrub survival rate, and total biomass, the treatment group T were significantly better than those of the CK group, with the “*Hedysarum scoparium* between panels” configuration performing the best, while the survival rate of “*Atriplex canescens* between panels” was only 8.00%, which is not suitable for planting in this area. (2) In terms of windbreak and sand fixation, the sand transport amount, sand transport rate per unit width, and aeolian sand flux, the treatment group was significantly lower than those in the CK group, among which the sand transport amounts of the configurations “*Hedysarum scoparium* between panels”, “*Hedysarum mongolicum* between panels”, and “*Calligonum mongolicum* between panels” were all less than 18 g. (3) In terms of soil improvement, the sand particle content in the 0–20 cm soil layer of the treatment group T decreased from 99.19%–99.23% in the CK group to 97.61%–98.90%, the silt particle content increased from 0.77%–0.81% to 1.10%–1.80%, clay particles appeared in some configurations, and the soil organic matter and total carbon content were significantly higher than those in the CK group, among which the “*Hedysarum scoparium* between panels” configuration had the most prominent carbon pool accumulation effect. Moreover, other soil physical and chemical properties such as soil pH value, electrical conductivity (EC), available nitrogen, available phosphorus, and available potassium have all been significantly improved compared with those in the CK group. In summary, the synergistic effect of biomass ash brick sand barriers and soil amendment can achieve the comprehensive benefits of windbreak and sand fixation, soil improvement, and ecological restoration, realizing the synergistic effect of waste resource utilization-desertification control-ecological restoration. Moreover, this technology has low cost and great market application potential, providing a low-cost and high-ecological-benefit ecological governance technical paradigm for photovoltaic areas in desert and gobi regions.

Key words: biomass ash brick; sand barrier; soil amendment; desertification control effect; Alxa photovoltaic base