

# 植被恢复对干旱区生态光伏电站 土壤团聚体组成及有机碳的影响

赵 晶, 刘美英, 郝孟婕, 王清宇

(内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 呼和浩特 010018)

**摘 要:**为给干旱区生态光伏电站植被恢复, 土壤结构稳定性以及有机碳固持提供理论依据, 选取光伏电站生态示范区内 3 种典型的人工植被樟子松、黄芪和苜蓿为研究对象, 以未进行植被恢复工作的土地为对照, 探究了不同植被恢复措施下 0—40 cm 土壤各粒径团聚体分布特征、稳定性水平和有机碳变化特征。结果表明: 相比于对照, 樟子松、黄芪和苜蓿地的水稳性大团聚体( $>0.25$  mm)含量增加, 微团聚体( $<0.25$  mm)含量降低, 尤其是樟子松样地大团聚体含量最高。3 种植被的水稳性团聚体 MWD(平均重量直径)和 GMD(几何平均直径)均显著高于对照, 而  $D$  值明显低于对照, 在整个土壤剖面中, 土壤团聚体稳定性指标均以樟子松样地最佳, 表明樟子松样地土壤结构改善效果明显, 团聚体稳定性较高。土地的利用方式转变后, 樟子松、黄芪和苜蓿地的有机碳含量和有机碳贡献率均增加, 其中以樟子松样地最为突出, 并且 3 种植被的有机碳含量增量主要源于 0.25~0.053 mm 粒级团聚体的贡献。樟子松样地较黄芪和苜蓿地土壤团聚体稳定性更高, 更有利于提高有机碳累积量。

**关键词:**光伏电站; 植被恢复; 土壤团聚体稳定性; 土壤有机碳

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)05-0137-07

## Effects of Vegetation Restoration on Soil Aggregate Composition and Organic Carbon of Eco-Photovoltaic Power Station in Arid Area

ZHAO Jing, LIU Meiyong, HAO Mengjie, WANG Qingyu

(Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** In photovoltaic power station ecological demonstration area, three types of typical artificial vegetation, *Pinus sylvestris* L., *stragalus membranaceus* and *Medicago sativa* L. were selected as the research objects, and the land without vegetation restoration was taken as the control to explore the particle size of aggregate distribution characteristics, the stability level and the changes of organic carbon of 0—40 cm soil layer under different vegetation restoration measures, and to provide a theoretical basis for the vegetation restoration, soil structure stability and organic carbon sequestration of ecological photovoltaic power stations in arid areas. The results showed that: compared with the control, the content of water-stable large aggregates ( $>0.25$  mm) increased in *Pinus sylvestris* L., *stragalus membranaceus* and *Medicago sativa* L., while the content of micro-aggregates ( $<0.25$  mm) decreased, especially the content of large aggregates was the highest in *Pinussylvestris* var. *mongolica*; the water stability of aggregate MWD (mean weight diameter) and GMD (geometric mean diameter) of the three plants were significantly higher than those of the control, while the  $D$  values were significantly lower than that of the control; in the whole soil profile, the soil aggregate stability index was the best in *Pinussylvestris* var. *mongolica*, which indicated that the improvement effect of soil structure in the *Pinus sylvestris* L. was obvious and the stability of soil aggregates was higher;

收稿日期: 2021-07-12

修回日期: 2021-08-13

资助项目: 国家重点研发计划项目“干旱荒漠区生态光伏产业技术研发与示范”(2016YFC0501008)

第一作者: 赵晶(1996—), 女, 内蒙古乌兰察布市人, 硕士研究生, 主要从事土壤学方面的研究。E-mail: 1463640368@qq.com

通信作者: 刘美英(1974—), 女, 内蒙古清水河县人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事土壤肥力与植物营养方面的教学科研工作。E-mail: liumeiyingimau@163.com

the organic carbon content and organic carbon contribution rate of *Pinus sylvestris* L., *stragalus membranaceus* and *Medicago sativa* L. increased, after the change of land use pattern, and *Pinus sylvestris* L. land was the most prominent one; moreover, the organic carbon content increments of the three plantlets were mainly due to the contribution of 0.25~0.053 mm particle size aggregate. These results showed that soil aggregates in *Pinus sylvestris* L. land were more stable than those in *stragalus membranaceus* and *Medicago sativa* L. lands, which was more beneficial to increase the organic carbon accumulation.

**Keywords:** photovoltaic power station; vegetation restoration; stability of soil aggregates; soil organic carbon

光伏发电具有分布性广,可再生性等优点,并且在我国政策的支持下,光伏产业在国内的发展蒸蒸日上<sup>[1]</sup>。内蒙古地区地域辽阔,气候干燥,大面积的太阳能资源和较长的日照时间为开发光伏产业创造了得天独厚的条件。然而大型光伏电站在场地准备过程中,移除天然植被,翻动土地,并添加压实填料等工作破坏了土壤结构<sup>[2]</sup>,改变了土壤的物理、化学和生物特性,从而影响水分和养分的动态平衡<sup>[3]</sup>。所以后期对光伏电站内土壤进行植被恢复工作有很高的生态效益<sup>[4]</sup>,不仅能有效减轻风蚀,还能提高土壤结构的稳定性。土壤团聚体是土壤结构的基本单元<sup>[5]</sup>,同时其数量和质量不仅能维持土壤结构的稳定,还能保护土壤有机碳<sup>[6]</sup>。所以土壤团聚体分布和稳定还与土壤有机碳密不可分<sup>[7]</sup>,同时团聚体也是土壤有机碳转化和固存的主要场所<sup>[8]</sup>。有研究表明富含有机碳大团聚体数量的增加会促进有机碳含量的增加<sup>[9]</sup>,提高团聚体的稳定性可提高土壤固碳能力。

随着国家践行“绿水青山就是金山银山”的发展理念,推进生态文明建设,减轻太阳能光伏安装和运行对生态环境影响的策略逐渐被人们重视。大量的研究表明植被恢复不仅影响土壤团聚体分布特征和稳定性,还会加速土壤颗粒的胶结作用,使不同大小的团聚体重新分布,最终决定土壤养分积累量<sup>[10-11]</sup>。不同植被类型下土壤团聚体的分布特征和其稳定性一般不同。陈静等人<sup>[12]</sup>发现相比于农耕地,核桃林地、黑麦草和天然灌草样地内水稳定性大团聚体含量会增加。Sun 等<sup>[13]</sup>的研究也证明了建植可以显著提高土壤大团聚体含量,并且合理的种植方式可以有效增加碳汇<sup>[14]</sup>。人工造林种草作为一种有效遏制风沙

的手段,不仅可以促进生态系统结构和功能的恢复,进而驱动微生物分解枯落物增加养分,还可以改善土壤结构,不同程度的改善了干旱区土壤的理化性质<sup>[15-16]</sup>。目前国内外对光伏产业领域的研究主要集中在光伏电板的降尘<sup>[17]</sup>以及提高光伏电板发电效率<sup>[18]</sup>,而在干旱区生态光伏电站土壤方面研究多集中在风沙危害方向<sup>[19]</sup>;而关于土壤团聚体稳定性及有机碳多集中在农田生态系统<sup>[20-21]</sup>且研究区域聚集在黄土高原<sup>[22-23]</sup>,但关于电站内土壤团聚体分布和有机碳变化特征研究较少。基于此从团聚体稳定性及其有机碳的角度去研究电站人工林草治理措施的成效,对于干旱区电站进一步治理以及选取最佳的植被恢复模式意义重大。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古呼和浩特市土默特左旗沙尔沁乡的大有光能源 30 MWp 光伏农林牧示范基地内,地理位置东经 110°47',北纬 40°36'。属于温带大陆性季风气候,常年气候干燥,并且年均蒸发量(1 870 mm)远高于年均降水量(399 mm)。电站在未进行植被恢复工作前大面积分布着风沙土,其特点是养分含量较低(表 1)。沙质属性决定了土壤易遭受风蚀,尤其在地表裸露、干旱多风的春季,风蚀更为强烈。2013 年后,电站开展了土地平整工作,并在电板间人工种植了樟子松(*Pinus sylvestris* L.)、苜蓿(*Medicago sativa* L.)和黄芪(*Astragalus membranaceus*)等。光伏板阵列行间距为 10 m,每年秋季为防火对每行电板过道的植被进行修剪,并且在前檐下方设置 2.5 m 的防火隔离带。

表 1 不同植被类型土壤理化性质

样地	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	pH	容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )
樟子松地	4.25	0.63	17.26	57.51	4.83	79.16	8.28	1.67
黄芪地	3.41	0.56	15.83	46.87	3.12	67.48	8.22	1.54
苜蓿地	3.72	0.57	16.24	41.90	3.39	63.22	8.21	1.58
对照	1.73	0.26	11.07	20.63	1.57	40.34	8.07	1.12

## 1.2 样品采集与试验方法

在 2019 年 6 月中旬采集了土壤样本。试验地以生态治理为主,选取具有代表性的樟子松、苜蓿和黄芪 3 种植被已经治理 6 a 的试验样地为研究对象,并以电站未进行植被恢复工作的土地为对照。在光伏板间靠近前檐位置进行土样采集,每个样地设置 3 个采样点,按照“S”型取样法采集 3 个重复样,并将每个样点的重复样混合。土壤剖面深度为 40 cm。分 0—20 cm 和 20—40 cm 两层取原状土样并放入塑料盒内,带回实验室,测定土壤团聚体。

水稳性团聚体的测定采用湿筛法<sup>[24]</sup>。试验用国产 TTF-100 型土壤团聚体分析仪,称取 50 g 风干土,套筛孔径从上到下依次为 2.0 mm, 0.25 mm, 0.053 mm,用蒸馏水充分润湿后(整个套筛处于最上端确保最顶层筛的土样被水淹没状态),每组样品以 60 次/min 分析 3 min 后收集各级筛子上的团聚体并分别转移到已知重量的铝盒内,在 100℃ 下烘干,称量,并计算水稳性团聚体组成。

土壤团聚体有机碳的测定:将湿筛后的各粒径土壤团聚体土样烘干过 0.25 mm 的筛,然后用重铬酸钾容量法测定<sup>[25]</sup>。

选择平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数( $D$ )作为土壤团聚体稳定性的评价指标<sup>[26-28]</sup>。其计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[ \left( \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left( \frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

两边分别取以 10 为底的对数:

$$\lg \left[ \frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left( \frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right) \quad (4)$$

式中: $\bar{x}_i$  为第  $i$  粒级团聚体的平均直径; $w_i$  为各粒级水稳性团聚体质量百分数(%); $x_{\max}$  为最大粒级团聚体的平均直径; $M(r < \bar{x}_i)$  为团聚体粒级小于  $x_i$  的累积质量(g); $M_T$  为各粒级团聚体的质量之和(g)。

各粒径团聚体土壤总有机碳的贡献率计算公式<sup>[29]</sup>为:各粒径团聚体有机碳贡献率(%)=(各粒径团聚体有机碳含量×各粒级团聚体含量×100)/耕层土壤总有机碳含量。

## 1.3 数据处理与分析

文中基础数据和图、表利用 Excel 2007 分析和

制作,并用 SAS 9.2 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Pearson 法进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型下土壤水稳性团聚体的分布特征

3 种植被类型各粒径水稳性团聚体组分见表 2。在 0—20 cm 土层中,不同植被类型下土壤各粒径团聚体分布特征差异显著( $p < 0.05$ ,下同)。对照以 0.25~0.053 mm 团聚体为主体,而樟子松、黄芪以及苜蓿中  $> 2$  mm 团聚体组成比例最高,依次为黄芪(59.66%)>樟子松(55.08%)>苜蓿(44.06%)>对照(39.52%),且四者差异性显著。土地利用方式从裸地转化成人工林草地后,樟子松、黄芪和苜蓿地 0.25~0.053 mm 团聚体含量均在一定程度上有所下降,分别比对照降低了 14.16%, 20.56%, 9.33%,且四者差异性显著。

在 20—40 cm 土层内,除对照外的其他 3 种样地的 0.25~0.053 mm 含量均呈下降趋势,且四者有显著差异。除樟子松外,对照、黄芪和苜蓿地的 2~0.25 mm 团聚体有所增加,且不包括对照的 3 种样地  $< 0.053$  mm 的团聚体也在一定程度上增加,四者差异性显著。而  $> 2$  mm 粒径团聚体含量变化表现为樟子松(53.53%)>黄芪(46.36%)>苜蓿(42.80%)>对照(39.40%),相比于表土层,樟子松地、黄芪地和苜蓿地分别减少了 1.55%, 13.3% 和 1.26%。研究区开展相应的植被恢复措施后,土壤团聚体分布特征有显著变化。在 0—40 cm 剖面内,人工草地和林地  $< 0.25$  mm 微团聚体含量减少,与对照相比,3 种植被的  $> 0.25$  mm 大团聚体含量分别提高了 43.56%, 3.72% 和 18.13%。

### 2.2 不同植被类型下土壤水稳性团聚体的稳定性

不同植被类型下水稳性团聚体 MWD, GMD 以及  $D$  值见表 3。各样地的团聚体 MWD, GMD 以及  $D$  值差异性显著。在 0—20 cm 土层中,樟子松、黄芪和苜蓿地的 MWD 和 GMD 都显著高于对照。其中樟子松的 MWD 和 GMD 值均最高,比对照分别高出 1.05 mm 和 0.16 mm。在 20—40 cm 土层内,其他 3 种植被的 MWD 和 GMD 值均下降,但都显著的高于对照。其中樟子松的 MWD 值最高,其次是黄芪;而黄芪的 GMD 最高,然后是樟子松。

在 0—40 cm 土层中樟子松、黄芪和苜蓿样地与对照相比均显著降低了  $D$  值。在 0—20 cm 土层中,团聚体  $D$  大小顺序为对照>苜蓿地>黄芪地>樟子松地,且樟子松和黄芪地差异不显著。随着土层的加

深,团聚体  $D$  大小顺序与表土层规律一致,并且四者林地,土壤稳定性得到增强,抗风、抗水蚀能力得到加强,其中樟子松和黄芪地在各土层稳定性均较好。差异性显著。表明随着土地利用方式变成人工草和

表 2 不同植被类型土壤水稳性团聚体粒径分布

土层/cm	植被	团聚体含量/%			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0—20	樟子松	55.08±0.42b	26.25±0.30a	27.44±0.67c	1.21±0.04d
	黄芪	59.66±0.50a	18.19±0.28c	21.04±0.71d	1.11±0.04c
	苜蓿	44.06±0.83c	21.27±0.29b	32.27±0.52b	2.40±0.04b
	对照	39.52±0.23d	13.67±0.12d	41.60±0.31a	5.21±0.27a
20—40	樟子松	53.53±0.2a	23.76±0.34c	20.88±0.43d	1.83±0.02d
	黄芪	46.36±0.05b	26.57±0.12a	24.90±0.11c	2.16±0.06c
	苜蓿	42.80±0.33c	25.06±0.33b	26.34±0.16b	3.80±0.03a
	对照	39.40±0.14d	22.46±0.20d	35.82±0.07a	2.32±0.16b

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示不同植被间存在显著性差异( $p<0.05$ ),下同。

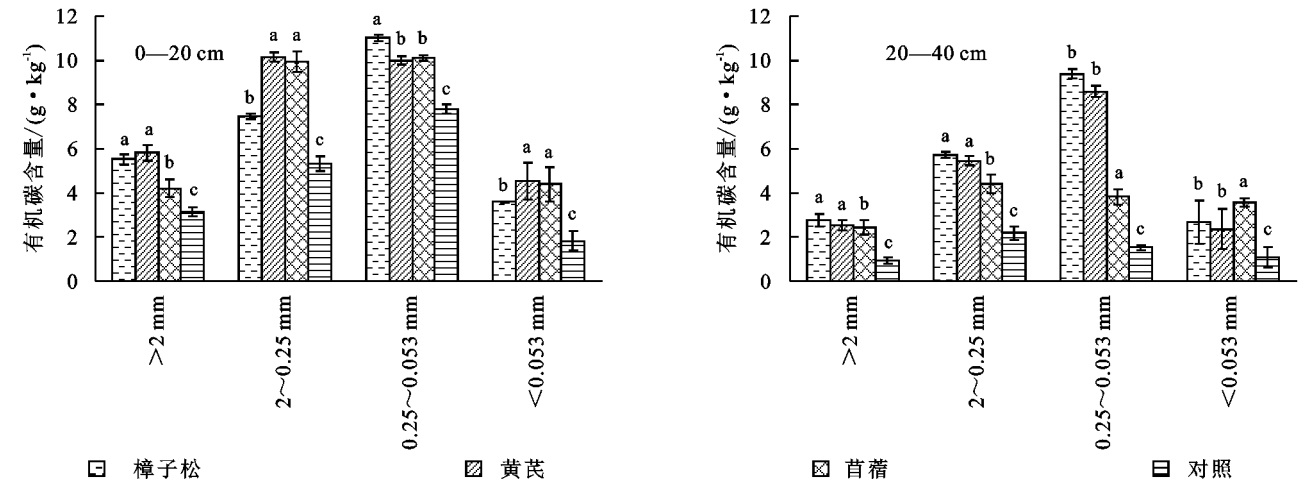
表 3 不同植被类型土壤团聚体稳定性差异

植被	平均重量直径 MWD/mm		几何平均直径 GMD/mm		分形维数 $D$	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
樟子松	1.37±0.04a	0.84±0.05a	0.81±0.03a	0.69±0.02b	1.34±0.07c	1.39±0.14d
黄芪	1.00±0.03c	0.76±0.07b	0.76±0.04b	0.72±0.05a	1.33±0.1c	1.41±0.2c
苜蓿	1.05±0.03b	0.46±0.02c	0.76±0.02c	0.63±0.06c	1.68±0.09b	1.79±0.12b
对照	0.32±0.05d	0.33±0.04d	0.65±0.06d	0.59±0.02d	1.97±0.06a	1.98±0.11a

2.3 土壤团聚体有机碳含量

对照各粒径团聚体中有机碳含量显著低于樟子松、黄芪和苜蓿样地(图 1)。0—20 cm 土层内,4 种样地不同粒径团聚体有机碳含量的变化范围在 1.82~11.03 g/kg,其中樟子松和黄芪样地内各粒径团聚体有机碳含量均显著高于苜蓿地和对照。同时 0.25~0.053 mm 粒径的有机碳含量明显高于其他粒径。>0.25 mm 大团聚体中有机碳含量顺序为黄芪地>樟子松地>苜蓿地>对照,而<0.25 mm 微团聚体有机碳含量规律为

樟子松地>黄芪地>苜蓿地>对照。相较于 0—20 cm 土层,20—40 cm 土层内的樟子松、黄芪和苜蓿样地各粒径团聚体有机碳含量在逐渐降低,但对照的两个土层各粒径有机碳含量变化范围较小。在 20—40 cm 土层中,4 种样地不同粒径团聚体有机碳含量均值在 9.39~0.93 g/kg 范围内,且 3 种植植模式的有机碳主要集中在 0.25~0.053 mm 粒径的团聚体中。>0.25 mm 大团聚体和<0.25 mm 微团聚体中有机碳含量顺序与表土层微团聚体的规律一致。



注:同列数据后不同小写字母表示不同植被间存在显著性差异( $p<0.05$ ),下同。

图 1 不同植被类型各粒级团聚体中有机碳含量

2.4 土壤团聚体有机碳贡献率

不同植被类型下水稳性团聚体对有机碳贡献率

不同(图 2),整体表现为 0.25~0.053 mm 团聚体对有机碳贡献率占主导地位,且不同土层 0.25~0.053



mm 团聚体对有机碳的贡献率均在 30% 以上。樟子松样地在表土层 (0—20 cm)  $>2$  mm 团聚体有机碳贡献率最高,为 34.93%,其次是黄芪 (32.51%) 和苜蓿 (30.89%),对照的有机碳贡献率最低 (22.81%)。

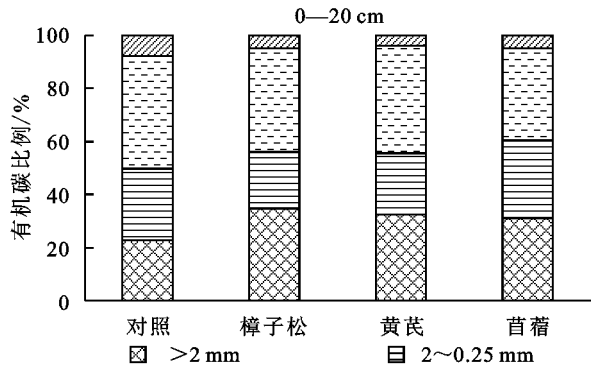
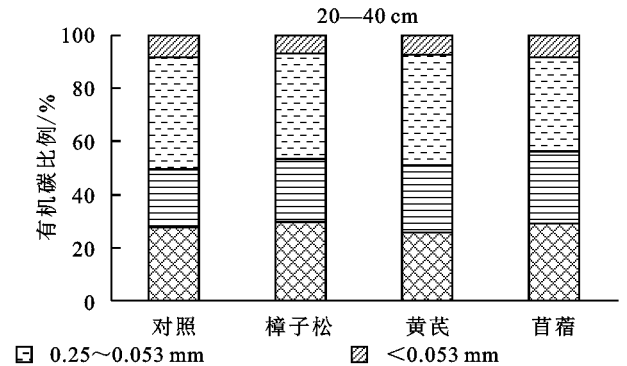


图 2 不同植被类型各粒级团聚体中有机碳贡献率

随着土层深度的增加 (20—40 cm), 樟子松样地  $>2$  mm 团聚体有机碳贡献率最高, 但随土层深度增加而逐渐降低。总体上随着土层深度的增加,  $<0.25$  mm 微团聚体的主导作用更为明显。



### 3 讨论

#### 3.1 人工植被恢复模式对土壤团聚体含量分布的影响

大量的研究证明植被恢复类型可作为土壤团聚体分布特征和稳定性重要影响因子<sup>[30-32]</sup>。我们的研究也证明了这点, 3 种植被类型的土壤团聚体含量存在差异。在本研究中, 与对照相比, 樟子松、黄芪和苜蓿地在 0—40 cm 土层中的土壤团聚体的主要以粒径  $>0.25$  mm 大团聚体形式存在,  $0.25 \sim 0.053$  mm 粒径明显降低, 这与乌达木等<sup>[33]</sup>的研究结果相似。一方面可能是人工林、草地建植后促进了植被覆盖度和表层凋落物增加, 增加外源有机质输入的同时, 也促进了土壤中天然有机质的增加, 有机质的胶结物质促进更多的水稳性微团聚体聚集成大团聚体<sup>[34-35]</sup>。另一方面土地利用方式主要对形成大团聚体的真菌菌丝、根系等综合作用造成影响<sup>[36]</sup>, 帮助微团聚体向大团聚体转化。Oades 等<sup>[37]</sup>发现  $>0.25$  mm 大团聚体的含量越高, 土壤团聚体越稳定, 所以植被恢复提高了大团聚体含量, 稳定了土壤结构。同时樟子松在 0—40 cm 的剖面中,  $>0.25$  mm 大团聚体的含量最高。这是因为相比黄芪和苜蓿地, 林地地表有较高的植被覆盖率, 能减缓的地表径流和地下渗流对团聚体结构的冲击力和破坏作用<sup>[38-39]</sup>。而对照地颗粒粗化正如其他研究所记录的那样<sup>[40]</sup>, 施工期间对表土的扰动、光伏设备的引进和原生植被的移除会加速细颗粒的侵蚀, 同时风蚀加速了碳、养分和持水能力的流失<sup>[41]</sup>。

#### 3.2 人工植被恢复模式对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体 MWD, GMD 以及  $D$  值对团聚结构稳定特征进行评价的主要参数, 其中 MWD 和 GMD 越大,  $D$  值越小, 说明水稳性团聚体团聚能力越高,

稳定性也越强<sup>[42]</sup>。我们的研究发现, 在 0—20 cm 土层内, 樟子松的 MWD 和 GMD 值均显著高于其他 3 种样地, 随着土层深度的加深 (20—40 cm), 樟子松团聚体 MWD 和 GMD 值逐渐下降, 但仍然比其他 3 个样地高, 这与樟松  $>0.25$  mm 团聚体含量的变化规律一致, 由此表明  $>0.25$  mm 团聚体含量变化规律和团聚体 MWD 和 GMD 大小保持一致, 也就验证了大团聚体含量对团聚结构稳定性至关重要, 这与陈静等<sup>[10]</sup>和 Qu 等<sup>[21]</sup>的研究结果相似。而在 20—40 cm 土层, 3 种植被类型团聚体稳定性下降, 可能是由于草地和林地地表聚集大量的枯落物, 为微生物分解供应能量, 提高微生物对枯落物分解力, 产生聚集土壤团聚体的胶结物质, 有助于小粒级团聚体转化为稳定性更高的大团聚体<sup>[43]</sup>。本研究中, 水稳性团聚体的  $D$  值大小顺序均表现为对照  $>$  苜蓿  $>$  黄芪  $>$  樟子松, 由于我们的研究区风沙化较为严重在, 对照土壤质地较差, 有机质含量低, 可供土壤团聚体形成的胶结物质较少, 所以其  $D$  值最低。而人工林、草地建植后, 沙化得到了不同程度的改善, 提高了土壤有机质含量, 特别是樟子松和黄芪的  $D$  值最小。樟子松发达的根系以及较多的枯落物被分解将养分回归于土壤, 而黄芪根茎互相串成一根, 常“一株成林”, 枝叶繁茂, 还生长迅速、是良好的防风固沙植被<sup>[15]</sup>。二者的大团聚体含量较高, 增加了土壤稳定性。

#### 3.3 人工植被恢复模式对土壤团聚体有机碳及其贡献率的影响

有机质输入和矿化的动态平衡影响着有机碳的含量<sup>[44]</sup>。本研究中, 0—40 cm 土层内 3 种植植模式下  $0.25 \sim 0.053$  mm 团聚体有机碳含量最高。可能是由于微团聚体内孔隙较小, 有机碳被微生物分解时会

消耗大量,会大大降低有机碳的分解速率,使得微团聚体中的有机碳受到的干扰较少,能够长时间储存<sup>[45]</sup>。我们还发现樟子松和黄芪地土壤团聚体中有机碳含量显著高于对照。相较于其他样地,对照地植被覆盖率极低,养分循环尚未完全重建,对照固碳能力远不如受植被保护的样地,并且暴雨、强风等灾害发生时,大团聚体易被破碎,加快内部有机质矿化速率,破坏了土壤结构的稳定性。在20—40 cm土层中,樟子松、黄芪和苜蓿地各级团聚体有机碳含量显著降低,这主要是因为土壤有机碳含量呈现明显的表聚特征,土壤表土层中枯枝落叶和动植物残体的堆积为形成团聚体中有机质创造得天独厚的外部条件<sup>[46]</sup>。同时,在提高团聚体有机碳含量上,樟子松在0—40 cm的剖面内优于其他3个样地,它对土壤团聚体有机碳贡献率也是最高的。樟子松表土层凋落物盖度高和强壮的根系显著影响有机碳含量,有效增强了碳的固持能力<sup>[21]</sup>。

## 4 结论

与对照相比,樟子松、黄芪和苜蓿地团聚体分布特征以大团聚体( $>0.25$  mm)为主, $<0.25$  mm微团聚体减少;3种植被类型团聚体MWD,GMD值显著高于对照,而D值均显著低于对照,特别是樟子松的土壤团聚体稳定性最好;同时樟子松有机碳含量及其有机碳贡献率明显高于其他3个样地。

综合以上,干旱区生态光伏电站内,樟子松样地的土壤结构较好,土壤有机碳含量较高,能很好的促进土壤固持养分。因此,在该区域加强生态环境保护是很有必要的,并且樟子松可在之后的干旱区光伏电站治理中发挥主要修复作用。

### 参考文献:

- [1] 杨世荣,蒙仲举,党晓宏,等.库布齐沙漠生态光伏电站不同覆盖类型下土壤粒度特征[J].水土保持研究,2020,27(1):112-118.
- [2] Hernandez R R, Easter S B, Murphy-Mariscal M L, et al. Environmental impacts of utility-scale solar energy [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29:766-779.
- [3] Choi C S, Cagle A E, Macknick J, et al. Effects of revegetation on soil physical and chemical properties in solar photovoltaic infrastructure [J]. Frontiers in Environmental Science, 2020,140(8):1123-1132.
- [4] Dan U, Markéta K, Aleksandra J, et al. Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants[J]. Ecological Engineering, 2021,168:125-133.
- [5] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [6] 陈静,陈海,朱大运,等.石漠化地区林草复合治理对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].水土保持研究,2020,27(4):1-7.
- [7] Lal R, Kimble J M. Conservation tillage for carbon sequestration[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997,49(1/3):243-253.
- [8] Assi A T, Blake J, Mohtar R H, et al. Soil aggregates structure-based approach for quantifying ( ) the field capacity, permanent wilting point and available water capacity[J]. Irrigsci, 2019,37:511-522.
- [9] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Soil Sci, 1982,33(2):141-163.
- [10] 林培松,高全洲.不同土地利用方式下紫色土结构特性变化研究[J].水土保持研究,2010,17(4):134-138.
- [11] Qiu L P, Wei X R, Gao J L, et al. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon along an afforestation chronosequence[J]. Plant and Soil, 2015,391(1/2):237-251.
- [12] 陈静,朱大运,陈许,等.石漠化区生态治理措施对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J].长江流域资源与环境,2021,30(9):2236-2244.
- [13] Sun L P, He L R, Wang G L, et al. Natural vegetation restoration of Liaodong oak(*Quercus liaotungensis* Koidz.) forests rapidly increased the content and ratio of inert carbon in soil macroaggregates[J]. Journal of Arid Land, 2019,11(3):928-938.
- [14] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse [J]. Effect Ful Journal of Social & Personatl Relationships, 1999,12(4):553-558.
- [15] 刘琳,张宝军,熊东红,等.雅江河谷防沙治沙工程近地表特性—林下植被特性、生物结皮及土壤养分变化特征[J].中国环境科学,2021,41(9):4310-4319.
- [16] 罗雅曦,刘任涛.宁夏风沙区不同人工固沙灌丛林土壤质量评价[J].水土保持研究,2019,2(6):120-123.
- [17] 孙家欢,王涛,薛炯,等.降尘对中国北方主要城市光伏电站发电量的影响[J].中国沙漠,2016,36(4):932-942.
- [18] 李辉,任洲洋,胡博,等.基于时序生成对抗网络的月度风光发电功率场景分析方法[J].中国电机工程学报,2022,42(2):537-548.
- [19] 袁方,张振师,卜崇峰,等.毛乌素沙地光伏电站项目区风速流场及风蚀防治措施[J].中国沙漠,2016,36(2):287-294.

- [20] Ndzelu B S, Dou S, Zhang X W, et al. Tillage effects on humus composition and humic acid structural characteristics in soil aggregate-size fractions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021,213:23-31.
- [21] Bischoff N, Mikutta R, Shibistova O, et al. Limited protection of macro-aggregate-occluded organic carbon in siberian steppe soils[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14 (10):2627-2640.
- [22] Xiao L, Zhang Y, Li P, et al. Effects of freeze-thaw cycles on aggregate-associated organic carbon and glomalin-related soil protein in natural-succession grassland and Chinese pine forest on the loess plateau[J]. *Geoderma*, 2019,334:1-8.
- [23] Dou Y X, Yang Y, An S S, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2020,185:237-248.
- [24] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993,57(4):1071-1076.
- [25] He X X, Huang Y Z, Zhang Q C, et al. Distribution of organic carbon fractions in soil aggregates in Chinese fir plantations with different stand ages[J]. *Ecological Processes*, 2021,10(1):1-13.
- [26] 侯晓娜,李慧,朱刘兵,等.生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J].*中国农业科学*,2015,48(4):705-712.
- [27] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].*水土保持学报*,2016,30(6):265-270.
- [28] 王艳玲,蒋发辉,徐江兵,等.长期配施有机肥对旱地红壤微团聚体中有机碳含量的影响[J].*土壤通报*,2018,49(2):377-384.
- [29] 高鸣慧,李娜,彭靖,等.秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2020,26(11):1978-1986.
- [30] Wang H, Guan D, Zhang R, et al. Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field [J]. *Ecological Engineering*, 2014,70:206-211.
- [31] Zhang Q Y, Shao M A, Jia X X, et al. Understory vegetation and drought effects on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon on the loess plateau in China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018,82(1):734-740.
- [32] Xiao L, Yao K H, Li P, et al. Effects of freeze-thaw cycles and initial soil moisture content on soil aggregate stability in natural grassland and Chinese pine forest on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020,20(3):1222-1230.
- [33] 乌达木,范茂攀,赵吉霞,等.不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征[J].*农业环境科学学报*, 2021,40(7):1519-1528.
- [34] Zeng Q C, Darboux F, Man C, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau(China)[J]. *Catena*, 2018,167:276-283.
- [35] 向蕊,伊文博,赵薇,等.间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J].*水土保持学报*,2019,33(5):303-308.
- [36] 徐香茹,汪景宽.土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J].*土壤通报*,2017,48(6):1523-1529.
- [37] Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982,33(2):141-163.
- [38] 董莉丽.不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J].*林业科学*,2011,47(4):95-100.
- [39] 王轶浩,耿养会,黄仲华.三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征[J].*生态学报*,2013,33(18):5493-5499.
- [40] Mohammad A A, Adam M. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J]. *Catena*, 2010,81(2):97-103.
- [41] Li J R, Okin G, Alvarez L, et al. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities [J]. *Biogeochemistry*, 2008,88(1):73-88.
- [42] 刘梦云,吴健利,刘丽雯,等.黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J].*自然资源学报*, 2016,31(9):1564-1576.
- [43] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J].*水土保持学报*,2012,26(5):229-234.
- [44] Liu M, Han G L, Zhang Q. Effects of soil aggregate stability on soil organic carbon and nitrogen under land use change in an erodible region in southwest China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019,16(20):1115-1123.
- [45] 刘中良,宇万太.土壤团聚体中有机碳研究进展[J].*中国生态农业学报*,2011,19(2):447-455.
- [46] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].*环境科学*,2019,40(8):3816-3824.