

# 砒砂岩区沙棘林地土壤有机碳分布特征及影响因素

邵冬亮<sup>1</sup>, 朱元吉<sup>2</sup>, 唐梅<sup>3</sup>, 甄庆<sup>4</sup>

(1. 国网山东省电力公司, 济南 250001;

2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 济南 250021; 3. 西北农林科技大学

资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 明确砒砂岩区土壤有机碳与沙棘恢复和衰退的响应关系, 为该区生态修复提供科学依据。[方法] 基于恢复 5 a(HR5), 15 a(HR15) 和 30 a(HR30), 以及一般早衰(HRG) 和严重早衰(HRS) 沙棘林地土壤有机碳和理化性质等数据, 结合灰色关联度模型, 阐明了土壤有机碳分布特征及其影响因素。[结果] (1) HR15 的碳累积效果最佳, 其有机碳含量及储量分别是对照草地的 2.27 倍和 1.87 倍, 沙棘恢复的碳累积效应体现在表层(0—20 cm); (2) HRG 和 HRS 的有机碳含量较未早衰样地分别减少了 35.96% 和 40.70%, 其有机碳储量在 10—40 cm 层显著降低 ( $p < 0.05$ ); (3) 全氮、全磷、根系生物量和凋落物主要影响沙棘恢复和衰退阶段的土壤有机碳变化, 灰色关联度  $> 0.7$ 。[结论] 沙棘恢复促进了砒砂岩区土壤有机碳的累积, 但过早衰退则增加了土壤有机碳损失的风险, 建议对衰退沙棘林及时平茬以促进其更新复壮, 确保砒砂岩区生态环境的可持续发展。

**关键词:** 沙棘; 恢复年限; 早衰程度; 碳积累; 砒砂岩区

中图分类号: S152.7; S158

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0089-07

## Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in *Hippophae rhamnoides* forests in Pisha sandstone area

Shao Dongliang<sup>1</sup>, Zhu Yuanji<sup>2</sup>, Tang Mei<sup>3</sup>, Zhen Qing<sup>4</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 2. Economic and Technological Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] This study clarifies the response relationship between soil organic carbon and the recovery and decline of *Hippophae rhamnoides* in the Pisha sandstone area, and provides a scientific basis for ecological restoration in this area. [Methods] Based on data of soil organic carbon and physicochemical properties of *H. rhamnoides* forest land with 5 years (HR5), 15 years (HR15), and 30 years (HR30) recovery, as well as general premature aging (HRG) and severe premature aging (HRS), the grey relational model was applied to clarify the distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors. [Results] (1) HR15 showed the most significant carbon accumulation effect. Its organic carbon content and storage were 2.27 times and 1.87 times that of the control grassland, respectively. The carbon accumulation effect of *H. rhamnoides* recovery was reflected in the surface layer (0—20 cm). (2) The organic carbon contents of HRG and HRS decreased by 35.96% and 40.70%, respectively, compared with the non-premature aging plots, and their organic carbon storage significantly decreased in the 10—40 cm layer ( $p < 0.05$ ). (3) Total nitrogen, total phosphorus, root biomass,

收稿日期: 2025-04-28

修回日期: 2025-05-26

接受日期: 2025-06-04

资助项目: 国家电网公司总部科技项目“输变电工程水土保持措施碳汇途径及其固碳能力研究”(5200-202416091A-1-1-ZN)

第一作者: 邵冬亮(1985—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事水土保持生态修复研究。E-mail: 361831176@qq.com

通信作者: 甄庆(1989—), 男, 山东滕州人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤物理及水文研究。E-mail: zhenqing10@nwfau.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

and litter mainly affected the changes in soil organic carbon during the recovery and decline stages of *H. rhamnoides*, with a grey relational degree  $>0.7$ . [Conclusion] The restoration of *H. rhamnoides* promotes the accumulation of soil organic carbon in the Pisha sandstone area. However, premature decline increases the risk of soil organic carbon loss. It is recommended to cut back declining *H. rhamnoides* forests in time to facilitate regeneration and ensure the sustainable development of the ecological environment in the Pisha sandstone area.

**Keywords:** *Hippophae rhamnoides*; recovery period; degree of premature aging; carbon accumulation; Pisha sandstone area

当前,土壤有机碳变化已成为全球研究的热点。土壤有机碳储量是大气和生物群落碳储量的2.0倍和2.8倍<sup>[1]</sup>。作为陆地生态系统服务的关键组成部分,土壤有机碳在改善土壤肥力、提高粮食生产、生物多样性、调节水资源和土壤保持等方面发挥着核心作用。通过恢复碳汇、减少CO<sub>2</sub>排放和提升土壤有机碳固存,可以有效减缓气候变化并实现可持续发展目标<sup>[2]</sup>,尤其是在贫瘠的退化地区<sup>[3]</sup>。因此,最大限度恢复脆弱生境中的土壤有机碳水平已成为当前重要的科学议题。

砒砂岩区位于中国黄土高原北部,总面积达1.67万km<sup>2</sup>,属于地貌、植被、气候和土壤的多重过渡带。该区域覆盖着源自古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的岩石互层<sup>[4]</sup>,即砒砂岩。由于其成岩程度低、结构强度差且可蚀性高,该区多年平均侵蚀模数超过20 000 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[5]</sup>,成为全球土壤侵蚀最严重的地区<sup>[6]</sup>。自20世纪70年代以来,三北防护林工程和退耕还林(草)工程等重大生态修复项目的实施有效缓解了黄土高原地区的土地退化<sup>[7]</sup>,改善了砒砂岩地区的生境。

多年的生态恢复实践证明,沙棘(*Hippophae rhamnoides*)在改善砒砂岩区土壤生境、减少土壤侵蚀和提高土壤肥力方面具有重要作用,被视为该区水土流失治理的“先锋”植被<sup>[8]</sup>。沙棘根系发达,具有耐寒、耐旱和耐瘠薄等特性,能够在降水稀少、土壤侵蚀严重、肥力低的荒山陡坡、砒砂岩和河滩地生长并迅速成林。多项研究从不同角度探讨了沙棘种植对砒砂岩区生态恢复的促进作用,发现不同恢复阶段的沙棘在改善该区植被多样性、土壤水分和养分储存方面存在显著差异<sup>[9-11]</sup>。事实上,土壤有机碳储量对土壤的生物量生产、水分储存与过滤、养分储存与利用等生态功能起着重要作用。研究土壤有机碳分布变化有助于理解脆弱生境地区土地利用的稳定性和可持续性。先前许多学者探讨了水力侵蚀<sup>[12]</sup>、不同土地利用方式<sup>[9]</sup>及生态修复措施<sup>[13]</sup>对砒砂岩区土壤有机碳含量及储量的影响,但尚缺乏沙棘不同生长阶段对砒砂岩区土壤有机碳分布影响的实证研

究。此外,由于该区特殊的地质和气候条件,种植10a后的沙棘可能出现生理早衰,其对林地土壤有机碳的作用机制仍不明确<sup>[14]</sup>。

鉴于此,本研究以黄土高原北部薄层覆土砒砂岩区沙棘林地研究对象,从恢复年限和早衰程度两方面揭示沙棘林地土壤有机碳分布特征及其影响因素,旨在为更精确地估计土壤碳通量和全面评估指导砒砂岩区生态恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

砒砂岩区位于山西、陕西和内蒙古交界处(38°10′—40°10′N, 108°45′—111°31′E),属于风水交错区。该区地形破碎、沟壑纵横、总体地势西北高、东南低。气候类型为暖温带干旱半干旱大陆性季风气候,年均气温为6~9℃,年均降水量为280~400mm,年均蒸发量为2 200~2 600mm,年均风速达2~4m/s。由于冬春两季冻融和风化作用显著,夏秋两季暴雨和洪水频发,该区水土流失严重,贡献了黄河下游粗砂泥沙的25%,尽管其水土流失面积仅占黄河流域的2%<sup>[15]</sup>。该区植被类型包括针叶林、阔叶林、灌木和草本植物,其中沙棘作为绿色先锋植物,在改善恶劣环境、防治水土流失和调节水资源短缺方面发挥着重要作用。

### 1.2 研究方法

圪秋沟流域(39°42′—39°50′N, 110°25′—110°48′E)位于砒砂岩裸露区向覆土区的过渡地带,为了防风固沙,遏制该地区的土壤侵蚀,当地林业局人员分别在3个时间段(1992年、2007年和2017年左右)在流域内种植了沙棘,经过约30a的治理,流域生态恢复效果显著。沙棘为人工栽种,且种植后均允许自然生长。2022年,通过咨询当地林业人员,我们在流域内选取了自然恢复序列的人工沙棘林地,包括正常自然恢复的5a(HR5),15a(HR15)和30a(HR30)沙棘林地,以周围自然恢复草地(Grassland, GL)为对照。自然恢复沙棘林样地间距均为5km左右,且恢复年限覆盖了大部分沙棘生长历史,以保证所选择

地的代表性。选取的沙棘林均位于坡上部位(坡顶或梁上),且样地的海拔和坡度差异均较小,基本可以忽略地形影响,并保证了立地条件的一致性。样地基本信息见表1。

表1 自然恢复序列沙棘林地基本信息

Table 1 Basic information of natural restoration sequence of *Hippophae rhamnoides* forests

样地	海拔/m	坡度/(°)	栽种时间及地点
HR5	1288	6	2017年左右在坡顶栽种
HR15	1198	5	2007年左右在梁上栽种
HR30	1382	5	1992年左右在坡顶栽种

由于季节性干旱和树干蛀虫的危害,位于流域内的15a沙棘人工林地出现了过早衰退现象。为了进一步分析沙棘衰退对土壤有机碳分布的影响,2023年综合调查了处于正常生长阶段和衰退阶段的15a沙棘林地的树高、胸径和枯枝率等指标,将衰退阶段沙棘林地按照早衰程度划分为一般早衰(General Premature Aging, HRG)和严重早衰(Severe Premature Aging, HRS),并以未早衰沙棘林地(HR15)为对照。衰退阶段沙棘林地均位于同一梁上种植,且样地间距小于2 km,保证了所选样地的代表性和一致性。沙棘早衰林地植被属性见表2。

表2 沙棘早衰林植被属性

Table 2 Vegetation properties of *H. rhamnoides* premature aging forests

样地	树高/cm	地径/mm	枯枝率/%
HR15	197	30.24	44.40
HRG	115	23.33	61.07
HRS	102	19.33	90.73

2022年7—8月,在圪秋沟流域内选定的自然恢复序列沙棘林地及草地采集了土壤样品,并于第二年7—8月在该流域内选定的衰退阶段沙棘林地采集了土壤样品。各样地选择3个立地条件相似的重复样方,样方内随机选取5个采样点。用土钻(直径5 cm)分层(0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm和40—60 cm)采集土样,充分混匀后得到72个混合土样,风干后测定土壤含水率、有机碳含量、全氮含量、全磷含量、颗粒组成和pH值。用环刀(100 cm<sup>3</sup>)分层采集样方内原状土样以测定土壤容重。此外,收集样方内1 m<sup>2</sup>区域的凋落物,并用根钻(直径9 cm)分层采集样方内根土样品。

土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)采用环刀法测定。土壤pH值通过水土比2.5:1的电极法测定。土壤含水率(%)采用烘干法测定。土壤有机碳含量(g/kg)采用重铬酸钾-外加加热法测定。全氮含量(g/kg)采用凯氏定氮法测定。全磷含量(g/kg)则采用钼锑抗比色法测定。在清

洗干净附着在根系表面的土壤后,在75℃下烘干确定根系生物量(g/cm<sup>3</sup>)。凋落物在60℃下烘干24 h计算凋落物蓄积量(g/cm<sup>2</sup>)。土壤颗粒组成分析使用Master 2000激光粒度仪,依据美国农业部制土壤粒级划分标准,分别计算砂粒(> 0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)的体积百分含量。

用以下公式计算土壤有机碳储量<sup>[16]</sup>:

$$\text{SOCs} = \text{SOC} \times \text{BD} \times d \times 0.1 \quad (1)$$

式中:SOCs为土壤有机碳储量(t/hm<sup>2</sup>);SOC为土壤有机碳含量(g/kg);BD为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);d为土壤厚度(cm)。

灰色关联分析(Grey Relational Analysis, GRA)源于灰色系统理论,能够将难以精确定量、边界模糊的因素转化为可分析的数值信息,从而弥补传统统计方法在处理不确定性方面的不足<sup>[17]</sup>。该方法通过计算各因素之间的灰色关联度,衡量其相互接近的程度,以揭示系统中部分已知与未知信息之间的潜在关联。鉴于土壤-植物系统具有结构复杂、影响因素众多等特点,可视为典型的灰色系统,因而适宜采用灰色关联法进行系统性综合评价<sup>[18]</sup>。植被对土壤有机碳的影响归因于土壤-植被系统互作。因此,本研究结合灰色关联法探究影响砒砂岩区沙棘恢复和衰退阶段土壤有机碳的主要影响因素。

### 1.3 数据分析

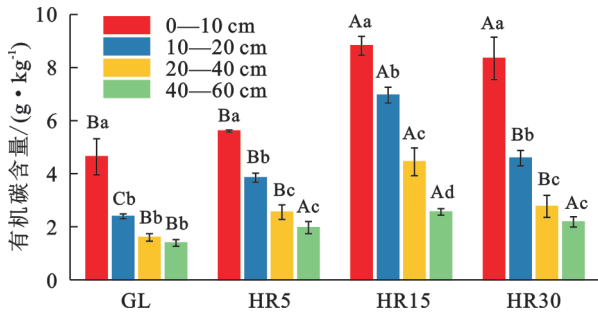
单因素方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)和最小显著性差异法(Least Significant Difference, LSD)对各样地及土层间土壤有机碳含量和储量进行差异分析,显著性水平设为0.05。灰色关联度模型分析土壤有机碳的主要影响因素。采用SPSS 26.0进行数据分析,Origin 2021进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳含量分布特征

2.1.1 不同恢复年限沙棘林土壤有机碳含量变化特征 砒砂岩区沙棘林土壤有机碳含量总体上随恢复年限增加先增加后减小,随土层增加呈下降趋势(图1)。HR5, HR15和HR30的土壤有机碳含量(0—60 cm层均值)依次为3.49, 5.70, 4.47 g/kg,分别是GL的1.39, 2.27, 1.79倍。尽管沙棘林各层有机碳含量均高于草地,但差异主要体现在0—10 cm和10—20 cm土层( $p < 0.05$ )。从恢复年限来看,HR15各土层的土壤有机碳含量均最高,从表层到深层有机碳含量分别为8.82, 6.96, 4.45, 2.56 g/kg;而HR5各土层的土壤有机碳含量均最低,从表层到深层有机碳含量分别为5.61, 3.85, 2.55, 1.97 g/kg;HR30各土层的

土壤有机碳含量居于HR5和HR15之间。因此,沙棘恢复促进了砒砂岩区土壤有机碳的积累(尤其是表层),但这种效应会在沙棘生长15 a后降低。



注:不同大写字母代表同一土层不同样地土壤有机碳含量之间差异显著,不同小写字母代表同一样地不同土层土壤有机碳含量之间差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

图1 不同恢复年限沙棘林土壤有机碳含量分布特征  
Fig. 1 Distribution characteristics of soil organic carbon content in *H. rhamnoides* forests of different restoration years

2.1.2 不同早衰程度沙棘林土壤有机碳含量变化特征 砒砂岩区沙棘林土壤有机碳含量随早衰程度的加剧而下降,随土层加深而减小(图2)。土壤有机碳含量(0—60 cm层均值)依次为HR15(5.70 g/kg) > HRG(3.65 g/kg) > HRS(3.38 g/kg),HRG和HRS的土壤有机碳含量较HR15分别减小了35.96%和40.70%。此外,HRG和HRS各土层有机碳含量较HR15存在不同程度的降低。具体来讲,尽管HRG的0—10 cm和40—60 cm的有机碳含量和HR15的差异不显著( $p > 0.05$ ),但在10—20 cm和20—40 cm土层中分别显著减小了47.56%和46.07% ( $p < 0.05$ )。HRS在0—10 cm,10—20 cm和20—40 cm层的土壤有机碳含量较HR15分别显著减小了35.71%,45.83%和48.09% ( $p < 0.05$ )。综上,沙棘退化过程加剧了砒砂岩区土壤有机碳的减少,尤其在沙棘严重早衰阶段。

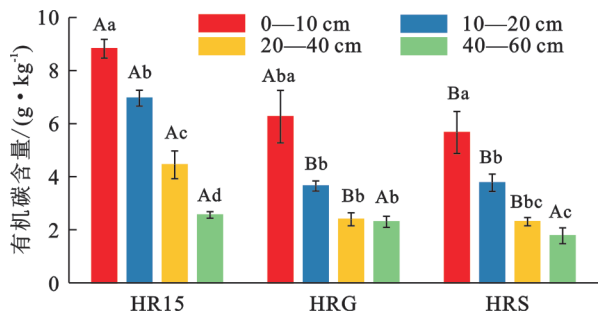
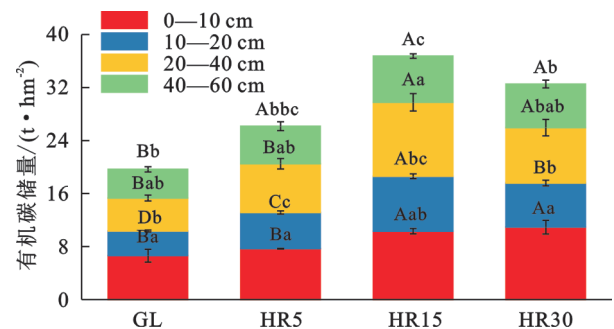


图2 不同早衰程度沙棘林土壤有机碳含量分布特征  
Fig. 2 Distribution characteristics of soil organic carbon content in *H. rhamnoides* forests with different degrees of premature aging

## 2.2 土壤有机碳储量分布特征

2.2.1 不同恢复年限沙棘林土壤有机碳储量变化特征 不同恢复年限沙棘林土壤有机碳储量变化特征

与土壤有机碳含量变化基本一致,总体表现为随恢复年限的增加先增加后降低,随土层深度的增加逐渐减小(图3)。HR5,HR15和HR30的有机碳储量(0—60 cm)依次为26.16,36.75,32.53 t/hm<sup>2</sup>,分别是GL的1.33,1.87,1.65倍。具体来讲,HR5仅在10—20 cm层的有机碳储量较GL显著增加了47.56% ( $p < 0.05$ ),其余各层有机碳储量在HR5和GL间差异不显著。HR15在所有土层的有机碳储量均显著高于GL,从表层至深层有机碳储量较GL分别显著增加了55.52%,123.98%,123.93%和60.69% ( $p < 0.05$ )。此外,除了20—40 cm层,HR30各层土壤有机碳储量较GL分别显著增加,但增加程度略低于HR15。因此,沙棘恢复显著提升了砒砂岩区土壤有机碳储量,尤其是在恢复15 a的沙棘林地。



注:不同大写字母代表同一土层不同样地土壤有机碳储量之间差异显著,不同小写字母代表同一样地不同土层土壤有机碳储量之间差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

图3 不同恢复年限沙棘林土壤有机碳储量分布特征  
Fig. 3 Distribution characteristics of soil organic carbon storage in *H. rhamnoides* forests of different restoration years

2.2.2 不同早衰程度沙棘林土壤有机碳储量变化特征 不同早衰程度的沙棘林土壤有机碳储量相对于未早衰沙棘林均有所减小,且随着早衰程度的增加,减小幅度更大(图4)。HRG和HRS的土壤有机碳储量(0—60 cm)依次为29.28,26.47 t/hm<sup>2</sup>,分别是HR15的79.68%和72.03%。从各层土壤有机碳储量来看,尽管HRS的各层有机碳储量(5.39~8.10 t/hm<sup>2</sup>)略低于HRG(5.52~9.46 t/hm<sup>2</sup>),但同土层间有机碳储量差异不显著( $p > 0.05$ )。然而,相比于HR15,HRG和HRS的土壤有机碳储量在10—20 cm和20—40 cm层显著降低( $p < 0.05$ ),但其他土层的有机碳储量在样地间无显著差异。因此,沙棘早衰加剧了砒砂岩区土壤碳储量的减小,严重退化的沙棘林地土壤有机碳储量减小程度最大,且消极影响主要体现在10—40 cm层。

## 2.3 土壤有机碳分布的影响因素

从土壤理化性质、植被生物量和植被演替阶段

来讲,土壤有机碳变化差异可归因于土壤养分状况(特别氮、磷)、pH值、土壤含水量、土壤容重、颗粒组成、凋落物和根系生物量以及植被的恢复年限和早衰程度等<sup>[19-21]</sup>。因此,本研究选取全氮、全磷、pH值、砂粒、粉粒、黏粒、含水率、容重、凋落物和根系生物量共10个指标探究砒砂岩区不同恢复年限和不同早衰程度沙棘林土壤有机碳的影响因素。各样地影响因素指标的平均值见表3。全氮、全磷含量以及凋落物蓄积量和根生物量随沙棘恢复过程先增加后减小,随衰退过程逐渐减小,与土壤有机碳含量及储量变化趋势一致。此外,土壤砂粒含量随沙棘生长年限增加而逐渐降低,随沙棘退化而逐渐增加,表明沙棘恢复有利于改善土壤质地,而沙棘退化导致土壤质地粗粒化。土壤容重随沙棘衰退而增加,表明退化的沙棘林地导致土壤结构恶化。

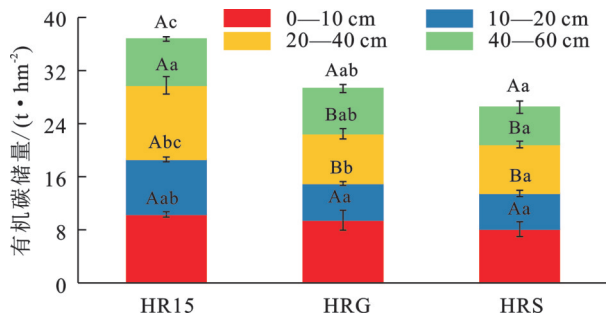


图4 不同早衰程度沙棘林土壤有机碳储量分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of soil organic carbon storage in *H. rhamnoides* forests with different degrees of premature aging

表3 不同沙棘林土壤有机碳的影响因素

Table 3 Influencing factors of soil organic carbon in different *H. rhamnoides* forests

影响因素	恢复年限			早衰程度	
	HR5	HR15	HR30	HRG	HRS
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.36	0.57	0.45	0.30	0.29
全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.28	0.50	0.23	0.39	0.38
pH值	8.70	8.73	8.56	8.75	8.94
砂粒/%	61.53	44.62	27.74	82.98	85.93
粉粒/%	28.04	46.20	54.93	11.73	10.07
黏粒/%	10.43	9.18	17.33	5.29	4.00
含水率/%	5.96	10.18	10.87	4.68	5.99
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.42	1.36	1.44	1.52	1.51
凋落物/(g·cm <sup>-2</sup> )	105.58	234.07	107.45	207.83	174.90
根生物量/(g·m <sup>-3</sup> )	477.14	1186.06	906.08	875.00	832.55

采用灰色关联度模型分析沙棘林土壤有机碳与其影响因素之间的相关性(表4),关联度越大,影响程度越大。恢复阶段沙棘林地的土壤有机碳与各指标的灰色关联度介于0.451~0.996,植被(根系生物量和凋落物)和养分指标(全氮和全磷)对土壤有机碳的影

响程度相对较大。衰退阶段沙棘林地的土壤有机碳与各指标的灰色关联度在0.445~0.998,除根系生物量和养分指标(全氮和全磷)外,粉粒和黏粒与土壤有机碳也具有密切联系。综上,土壤养分和植被因子是影响砒砂岩区沙棘林土壤有机碳的主要因素。

表4 土壤有机碳含量与影响因素间的灰色关联度及排序  
Table 4 Grey relational degrees and ranking between soil organic carbon content and influencing factors

影响因素	不同恢复年限样地		不同早衰程度样地	
	关联度	排序	关联度	排序
全氮	0.996	1	0.958	4
全磷	0.735	4	0.982	2
pH值	0.580	7	0.586	8
砂粒	0.471	9	0.447	9
粉粒	0.670	6	0.963	3
黏粒	0.511	8	0.924	5
含水率	0.699	5	0.843	6
容重	0.451	10	0.445	10
凋落物	0.784	3	0.768	7
根系生物量	0.892	2	0.998	1

### 3 讨论

植被恢复可以通过直接或间接的方式提升脆弱地区的土壤有机碳含量。在水土流失严重地区,植被可以通过凋落物或根系分泌物输入增加土壤有机碳含量,进而改善土壤结构并防止土壤侵蚀,以减少土壤有机碳损失<sup>[19]</sup>。实际上,土壤有机碳的分布特征可能因植被生长阶段不同(包括恢复年限和衰退程度)而存在显著差异。

砒砂岩区土壤有机碳含量随着沙棘恢复年限的增加先增加(生长5~15 a)后降低(生长30 a)(图1和图3),这主要归因于土壤有机碳对沙棘生长特性的动态响应。先前研究表明,沙棘生长前20 a,土壤有机碳随恢复年限的增加而增加;生长20 a后,土壤有机碳随恢复年限的增加而逐渐降低<sup>[21]</sup>。恢复初期的凋落物和植被根系产生的有机质易于被分解以供植物的新陈代谢,导致向土壤的碳归还量较少<sup>[22]</sup>。较低的植被覆盖度使得此阶段减蚀效果不佳,造成侵蚀流失的碳部分抵消了植被的碳输入<sup>[23]</sup>。然而,进一步的植被恢复促进了植物生物量的积累和土壤微生物活性的增强,从而提升了土壤有机碳的转化和储存能力。此外,植被覆盖度的增加有效缓解了土壤侵蚀和养分流失,进而促进了土壤有机碳的积累<sup>[23]</sup>。在成熟—过熟期的植被中,过密的植被盖度限制了林下光照资源,导致大量枯死的下层枝叶抑制了凋落物向土壤的碳返还<sup>[21]</sup>。本研究中凋落物蓄

积量和根生物量与有机碳含量随沙棘恢复和衰退过程的变化趋势一致也验证了这一点(表3)。此外,不同恢复年限沙棘林在表层(0—20 cm)土壤有机碳含量和储量方面均显著高于草地( $p < 0.05$ )(图1和图3)。与草地相比,沙棘更高的植被生产力和固氮能力为其迅速成林提供了充足的养分条件,大量枯落物向土壤的碳输入加速了表层土壤的碳固存。沙棘的串根萌蘖特性增强了土壤的抗冲和抗蚀能力,有效缓解了表层土壤有机碳的侵蚀流失<sup>[24]</sup>。

干旱胁迫、养分贫瘠、密度过大以及经营管理不善等因素导致沙棘林大面积早衰,其主要表现为寿命缩短、更新受阻、群落稳定性降低和植被生产力下降<sup>[25]</sup>。本研究表明,沙棘林早衰加剧了土壤有机碳含量和储量的显著降低(图2和图4)。沙棘早衰的直接后果是枯落物和根系分泌物的减小,导致植被向土壤的碳输入显著降低<sup>[26]</sup>。此外,早衰程度的加剧减弱了沙棘向土壤的氮输入能力,从而降低了植物生长对土壤微生物残体物质碳累积的促进作用<sup>[27]</sup>。土壤氮缺乏还会限制土壤的多种功能,导致更多的土壤有机碳被消耗,并向大气中释放大量 $\text{CO}_2$ <sup>[28]</sup>。因此,为了避免因沙棘衰退对土壤生态功能发挥造成负面影响,建议对砒砂岩区衰退的沙棘林进行及时的人工干预(如平茬处理),以促进其更新复壮,同时缓解因早衰所导致的碳损失。

土壤有机碳变化决定着植被建设和生态恢复的方向。揭示土壤有机碳动态变化过程的主导因子,不仅可以准确估计土壤有机碳的变化速率和方向,还能为提高土壤碳汇功能提供重要参考。结果表明,植被(凋落物、根系生物量)和养分(全氮、全磷)是影响沙棘恢复和衰退过程中土壤有机碳变化的主要因素(表4)。凋落物和根系是土壤有机碳的主要来源,对土壤呼吸和有机碳动态变化具有重要影响。沙棘林地内枯枝落叶层的腐殖质、根系的死亡代谢及分泌物是土壤有机碳的重要来源<sup>[10]</sup>。土壤养分是微生物群落利用土壤有机碳和植物进行光合作用以补充土壤碳库所必需的要素。全氮对沙棘恢复阶段的土壤有机碳变化的影响较大,关联度为0.996,而全磷对沙棘衰退阶段的土壤有机碳的影响较大,关联度为0.982。李仲牧等<sup>[29]</sup>的研究能够支撑这一结论,他们认为沙棘在生长过程中主要受到氮和磷元素的限制(除碳元素外),进而影响其向土壤的碳输入。对于正常演替的沙棘而言,作为固氮植物的沙棘能够使土壤累积大量的氮,而对于早衰的沙棘则无法进行正常的氮输入,导致其对土壤有机碳的影响程度有所下降。此外,土壤粉黏粒在沙棘衰退阶段对土壤有机碳影

响程度仅次于植被和养分,表现出极强的相关程度(关联度 $> 0.9$ )。粉黏粒相比于砂粒对土壤有机碳具有更大的储存潜力,这主要归因于较细的粉黏颗粒较粗砂颗粒具有更大的比表面积,能够稳定更多的有机碳<sup>[30]</sup>。

## 4 结论

(1) 沙棘林土壤有机碳的含量和储量均随恢复年限的增加先增加后减小,且均高于草地。恢复15a的沙棘林对土壤有机碳的提升效果最好,其有机碳含量和储量分别是草地的2.27,1.87倍。

(2) 沙棘林土壤有机碳的含量和储量均随早衰程度的加剧而减小,且均低于未早衰沙棘林样地。相比于未早衰沙棘林地,一般早衰和严重早衰沙棘林的土壤有机碳含量分别减小了35.96%和40.70%,土壤有机碳储量分别是未早衰样地的79.68%和72.03%。

(3) 植被因子(根系生物量、凋落物)和养分因子(全氮、全磷)是影响砒砂岩区沙棘恢复阶段和衰退阶段的土壤有机碳的主要因素。粉粒和黏粒含量也影响着沙棘衰退阶段的土壤有机碳变化。

### 参考文献(References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [2] Moinet G Y K, Hijbeek R, van Vuuren D P, et al. Carbon for soils, not soils for carbon [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(9):2384-2398.
- [3] Lal R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8):3285-3301.
- [4] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分 [J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1):14-18.  
Wang Y C, Wu Y H, Kou Q, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(1):14-18.
- [5] Ma W M, Zhang X C. Effect of Pisha sandstone on water infiltration of different soils on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(3):331-340.
- [6] Liang Z S, Liu H W, Zhao Y B, et al. Effects of rainfall intensity, slope angle, and vegetation coverage on the erosion characteristics of Pisha sandstone slopes under simulated rainfall conditions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(15):17458-17467.
- [7] Xie S D, Mo X G, Hu S, et al. Contributions of climate change, elevated atmospheric  $\text{CO}_2$  and human activities to ET and GPP trends in the Three-North Region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 295:108183.

- [8] 朱雅娟,党宏忠,杜娟,等.覆土砒砂岩区沙棘耗水量及其影响因子[J].水土保持研究,2020,27(4):171-177,183.  
Zhu Y J, Dang H Z, Du J, et al. Water consumption of *Hippophae rhamnoides* and its affecting factors in loess-covered Pisha rock area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(4):171-177,183.
- [9] 刘军,杨凯齐,刘科,等.内蒙古砒砂岩不同类型区土壤水分、养分特征研究[J].水土保持研究,2023,30(4):47-52.  
Liu J, Yang K Q, Liu K, et al. Characteristics of soil water and nutrients in different types area of Pisha sandstone in Inner Mongolia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):47-52.
- [10] 杨方社,李怀恩,杨寅群,等.沙棘植物对砒砂岩沟道土壤改良效应的研究[J].水土保持通报,2010,30(1):49-52.  
Yang F S, Li H E, Yang Y Q, et al. Effects of seabuckthorn plant on gully soil improvement in soft rock region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010,30(1):49-52.
- [11] 杨振奇,秦富仓,张晓娜,等.砒砂岩区不同立地类型人工沙棘林下草本物种多样性环境解释[J].生态学报,2018,38(14):5132-5140.  
Yang Z Q, Qin F C, Zhang X N, et al. Environmental interpretation of herb species diversity under different site types of *Hippophae rhamnoides* forest in feldspathic sandstone region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (14):5132-5140.
- [12] 张若曦,秦富仓,李龙,等.水力侵蚀对砒砂岩区土壤有机碳空间变异性的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):117-124.  
Zhang R X, Qin F C, Li L, et al. Effect of rainfall erosion on spatial variability of soil organic carbon in arsenic sandstone area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(6):117-124.
- [13] 李学峰,饶良懿,马凯.砒砂岩区不同生态修复措施对土壤碳含量的影响[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2022,50(4):125-135.  
Li X F, Rao L Y, Ma K. Effects of different ecological restoration measures on soil carbon content in the Pisha sandstone area [J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2022,50(4):125-135.
- [14] Wang X, Guo Y F, Qi W, et al. Compensatory growth and understory soil stoichiometric features of *Hippophae rhamnoides* at different stubble heights [J]. Peerj, 2022, 10:e13363.
- [15] Zhang P, Xiao P Q, Yao W Y, et al. Analysis of complex erosion models and their implication in the transport of Pisha sandstone sediments [J]. Catena, 2021, 207: 105636.
- [16] Yang K Q, Wang K, Zhang X Y, et al. Change in soil water deficit and soil organic matter consumption over time in rain-fed apricot orchards on the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 314:107381.
- [17] Kadier A, Abdeslahian P, Simayi Y, et al. Grey relational analysis for comparative assessment of different cathode materials in microbial electrolysis cells [J]. Energy, 2015,90:1556-1562.
- [18] 肖豪,黄柏豪,孙凯,等.应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(9):1966-1974.  
Xiao H, Huang B H, Sun K, et al. Grey relational analysis for evaluating the effects of lime combined with organic fertilizer on a cadmium contaminated soil-plant system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(9):1966-1974.
- [19] 肖胜生,房焕英,徐佳文,等.侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳稳定性的研究进展[J].水土保持学报,2022,36(5):1-8.  
Xiao S S, Fang H Y, Xu J W, et al. Advances of the soil organic carbon stability under vegetation restoration in eroded areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(5):1-8.
- [20] Hu P L, Liu S J, Ye Y Y, et al. Effects of environmental factors on soil organic carbon under natural or managed vegetation restoration [J]. Land Degradation & Development, 2018,29(3):387-397.
- [21] Liu M Y, Li P, Liu M M, et al. The trend of soil organic carbon fractions related to the successions of different vegetation types on the tableland of the Loess Plateau of China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(1):203-214.
- [22] Groenendijk F M, Condron L M, Rijkse W C. Effects of afforestation on organic carbon, nitrogen and sulfur concentrations in New Zealand hill country soils [J]. Geoderma, 2002,108(1/2):91-100.
- [23] Zhang L, Zhao W, Zhang R, et al. Profile distribution of soil organic and inorganic carbon following revegetation on the Loess Plateau, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25(30):30301-30314.
- [24] 史利江,高杉,姚晓军,等.晋西北黄土丘陵区不同植被恢复下的土壤碳氮累积特征[J].生态环境学报,2021,30(9):1787-1796.  
Shi L J, Gao S, Yao X J, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen accumulation under different vegetation restoration in the Loess Hilly Region of northwest Shanxi Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(9):1787-1796.
- [25] 张增悦,姜准,李甜江,等.毛乌素沙地中国沙棘人工林早衰原因与特点[J].西北林学院学报,2016,31(6):1-6.  
Zhang Z Y, Jiang Z, Li T J, et al. Causes and features of *Hippophae rhamnoides* ssp. sinensis plantation premature aging in Mu Us sandland [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(6):1-6.