

DOI: 10.20103/j.stxb.202506061427

梁海斌, 安泉旭, 王佩将, 李宗善. 黄土高原植被恢复对土壤有机碳的影响 Meta 分析. 生态学报, 2025, 45(24): 12148-12159.

Liang H B, An X X, Wang P J, Li Z S. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon in the Loess Plateau, China: a meta-analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12148-12159.

黄土高原植被恢复对土壤有机碳的影响 Meta 分析

梁海斌¹, 安泉旭², 王佩将¹, 李宗善^{3,*}

¹ 太原师范学院地理科学学院, 晋中 030619

² 福建师范大学地理科学学院, 福州 350117

³ 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

摘要: 退耕还林工程实施以来, 黄土高原生态环境得到明显改善, 土壤有机碳含量(SOC)发生显著变化。为科学评估黄土高原植被恢复的土壤固碳效益, 应用 Meta 分析方法, 以农田为对照, 选取乔木、灌木、草地为研究对象, 通过提取配对实验数据, 构建黄土高原植被恢复背景下的土壤有机碳数据库, 对不同植被类型、气候条件、地形因素、土壤深度、土壤容重与土壤有机碳含量之间的关系进行讨论。结果表明: 三种植被类型土壤有机碳含量随土层深度的增加先逐渐降低而后略有回升; 年均温、土壤容重、海拔高度、植被生长年限与土壤有机碳之间存在着显著的相关性; 同时, 不同的植被类型中, 土壤剖面有机碳总体表现为灌木>乔木>草地。此外, 结构方程模型表明, 土壤容重是乔灌木土壤有机碳含量变化的正向主控因子; 坡度对灌木土壤有机碳的负向影响最强; 年均温和生长年限分别对草地土壤有机碳产生负效应和正效应。综上, 退耕还林能够显著提高土壤有机碳含量, 且地理因子对不同植被类型土壤有机碳的作用程度存在差异, 所得结果对于全面厘清植被恢复的土壤固碳效应具有重要科学意义, 也为后续植被恢复的提质增效行动提供数据支持。

关键词: 植被恢复; 土壤有机碳; 固碳效应; Meta 分析; 黄土高原

Effects of vegetation restoration on soil organic carbon in the Loess Plateau, China: a meta-analysis

LIANG Haibin¹, AN Xiaoxu², WANG Peijiang¹, LI Zongshan^{3,*}

¹ Institute of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China

² School of Geographic Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

³ State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Since the implementation of Grain for Green project in the Loess Plateau, the ecological environment has been improved significantly, and the soil organic carbon content (SOC) has dramatically changed. In order to scientifically evaluate the soil carbon sequestration benefits from vegetation restoration, this study applied the paired experiments that simultaneously contained experimental group and control group to develop the SOC database. Subsequently, taking farmland as the control plot, a meta-analysis was conducted by selecting forestland, shrubland and grassland as research objects, to explore the relationships between different vegetation types, climatic conditions, topographic factors, soil depth, soil bulk density, and soil organic carbon content. The results showed that the SOC, in general, first gradually decreased and then increased slightly as the soil depth increased within the three vegetation types. Average annual temperature, soil bulk density, altitude and vegetation growth years were significantly correlated with SOC. Meanwhile, among different vegetation

基金项目: 鄂尔多斯市科技重大专项项目 (ZD20232324); 山西省基础研发计划项目 (202403021211203); 国家自然科学基金 (42101104); 国家重点研发计划项目 (2022YFF1300400)

收稿日期: 2025-06-06; 网络出版日期: 2025-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zsls_st@rcees.ac.cn

types, the overall profile SOC was sequenced as shrubland>forestland>grassland. In addition, the structural equation model showed that soil bulk density was a positive controlling factor for SOC sequestration in the forestland. Slope generated the strongest negative effect on shrub SOC. Average annual temperature and growth years played negative and positive effects on SOC in grassland, respectively. In conclusion, the vegetation restoration project could significantly increase SOC content, and the effects of geographical factors on SOC were varied by different vegetation types. The results are of important scientific significance for comprehensively illustrating the effect of vegetation restoration on SOC and also provide data support for improving the quality and efficiency of regional vegetation restoration.

Key Words: vegetation restoration; soil organic carbon; carbon sequestration effect; meta-analysis; the Loess Plateau

全球气候变化背景下,世界各国为适应与减缓气候变化,纷纷加入碳减排阵营^[1-2]。《京都议定书》中也明确指出:各国经济发展过程中所产生的碳排放可以通过增加陆地生态系统碳汇予以抵消^[3]。同时,我国正面临碳减排、碳增汇的巨大压力^[4]。如何增强陆地碳汇效应、减少陆地碳排放和减缓气候变化已成为我国新时期面临的重要生态课题。陆地生态系统是地球表面重要的生态系统类型,是人类生存发展的物质基础,其土壤碳库容量约为大气碳库的 3 倍^[5]。大量研究得出,土壤有机碳(SOC)在改良土壤结构、维持水分、防止土壤侵蚀与退化以及供给植物养分等方面都具有不可或缺的作用^[6]。由此可见,土壤有机碳是土壤养分循环和转化过程中的重要组成部分,是关键的土壤质量评价指标^[7],其固存与释放对全球碳循环及气候变化产生重要影响^[8]。因此,研究植被恢复对土壤有机碳的影响对于国家“双碳战略”目标下的生态系统增汇具有重要意义。

黄土高原地处我国半湿润半干旱地区,是全球土壤侵蚀最为严重的区域之一,生态环境脆弱,土壤有机碳总量相对缺乏^[9],不合理的土地利用方式是导致其生态环境不断恶化的首要胁迫因子^[10]。植被恢复作为该区域生态重建的核心措施,通过对土地利用方式进行调整,改变地表覆盖和土壤环境,显著影响着土壤有机碳的积累与转化过程^[11-12],其碳汇效应也成为评估植被恢复成效的重要依据^[13]。自退耕还林(草)工程实施以来,黄土高原生态环境状况明显改善,生态系统固碳能力得到显著提升^[14]。因此,在全球气候变化及大规模植被恢复背景下,开展黄土高原地区的土壤固碳效应研究,有助于明晰区域碳汇能力,为优化区域生态修复措施和实现碳中和目标提供科学支持。

利用文献整合分析方法,国内外学者通过不同的研究尺度、影响因子和调查手段分析了自然因子对土壤有机碳含量的响应^[15-16]。如巩杰等^[17]基于整合分析方法,研究了我国干旱半干旱地区土地利用变化与土壤碳、氮的关系,得出不同土地利用方式对表层土壤碳、氮含量的影响十分显著,且草地和灌木植被类型在保持土壤肥力和改善土壤质量方面有较好的效果。Paul 等^[18]通过梳理 43 篇相关文献研究发现,土壤有机碳随退耕年限而发生变化,退耕前五年土壤有机碳含量与初始土壤有机碳相比,年均降低 3.16%,随后下降速率减小并最终恢复至初始土壤有机碳含量水平。邓蕾^[13]通过收集历史文献资料并结合野外调查,得出黄土高原地区植被恢复工程具有较大的碳汇效应,其中退耕年限是影响土壤固碳效应的主要因素,而年均温度对土壤固碳量影响显著。然而,受气候因素、退耕年限、植被恢复类型和土层深度等因素的影响,不同生态系统的土壤固碳效应呈现多样性结果,大规模生态恢复背景下土壤有机碳在土壤剖面中的潜在驱动因素仍不清楚^[19]。因此,基于统一标准的大尺度土壤固碳效应研究,对于厘清黄土高原地区陆地生态系统土壤有机碳的影响机制,明晰植被提质增汇途径及区域碳汇管理具有重要指导意义。为此,本文采取配对实验方法,构建黄土高原地区植被恢复背景下的土壤有机碳数据库,利用 Meta 分析方法,整合分析土壤有机碳含量变化及其影响因素。拟回答以下科学问题:(1)区域尺度上,不同植被类型土壤有机碳随土层深度如何变化?(2)驱动不同植被类型土壤有机碳变化的因素是什么?旨在为未来气候变化下区域生态恢复及陆地生态系统固碳增汇提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于我国黄河中上游地区,从太行山向西延伸至乌鞘岭和日月山,南达秦岭,北至阴山,介于 $100^{\circ}54'—114^{\circ}53'E$, $33^{\circ}43'—41^{\circ}16'N$ 之间,主要由青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省7省(区)组成,约占我国国土总面积的6.54%,是全球最大的黄土覆盖地区,也是土壤侵蚀严重的典型区域。该区域地貌、气候、植被和土壤类型均表现出显著的空间分异特征^[20]。从南至北,地貌由河谷平原区逐渐向黄土台塬区、丘陵山地区及黄土塬区过渡,平均海拔1000—1500 m,地势自西北向东南呈波状倾斜之势。黄土高原地区属于典型的温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季暖热多雨,雨热同季,气候从东南部暖温带亚湿润区逐渐转变为中部暖温带亚干旱区和西北部中温带亚干旱区,年均气温为 $7.3^{\circ}C$,年均降水量为447 mm,降水量年际及年内变化大,主要集中在夏季,约占年降水总量的70%,温度和降水量空间上呈现东南高西北低的变化趋势^[20]。受气候条件的差异性作用,自东南至西北,植被类型依次呈现由森林、森林草原、草原向荒漠草原过渡^[21];土壤类型从娄土逐渐转变为黑垆土、黄绵土及风沙土,同时土壤质地也由细逐渐变粗^[2]。

1.2 数据来源

在“中国知网(CNKI)”和“Web of Science”数据库中以“黄土高原”“退耕还林”“土壤有机碳”“土壤碳汇”“土壤碳储量”“soil organic carbon”“carbon sequestration”“Grain for Green Project”“the Loess Plateau”等为关键词检索相关中英文文献。同时,通过 GetData Graph Digitizer 软件提取文献资料中相关图表数据,包括采样点、地理位置(经度、纬度)、气候条件(年均温、年均降水量)、植被类型(乔木、灌木、草地)、地形(海拔、坡度)、恢复年限、土壤有机碳含量、土层深度、土壤容重和文献来源等^[21]。在各采样点中,选取植被恢复后的地块作为实验组,邻近的农田作为对照组,确保配对实验样地地理条件相似,以降低外界因素对土壤有机碳含量评价的干扰。利用 Microsoft Excel 2010 软件构建黄土高原植被恢复的土壤有机碳数据库,全面分析生态恢复工程对土壤有机碳含量的影响。

本研究最终从62篇文献中,整理出44个采样点,建立了共计1263条土壤有机碳样本数据库,其中采样深度均为100 cm,并且在土壤剖面上以20 cm为间隔进行土层划分。土壤有机碳野外调查样地分布图如图1所示。

1.3 数据分析

1.3.1 整合分析

基于 Liang 等^[21]分析模式,本研究中将实验组土壤有机碳含量(X_e)与对照组土壤有机碳(X_c)的比值定义为 r ,用于表示各采样点的效应值,计算公式为:

$$r = X_e / X_c$$

式中, X_e 代表植被恢复后的土壤有机碳含量, X_c 表示植被恢复前的土壤有机碳含量背景值。本研究中以农田作为植被恢复前的对照样地,其中,所有农田均为天然雨养农田,无任何人工灌溉及施肥处理,可以近似地视为土壤有机碳含量的背景值。与 Liang 等^[21]研究类似,本研究采用未加权的整合分析方法,计算得出每个土壤有机碳含量的平均效应值($R = r - 1$),并在 MetaWin 软件中确定95%置信区间范围。当95%置信区间的值不与零刻度线相交时,则认为统计差异显著;反之,则表示统计差异并不显著。

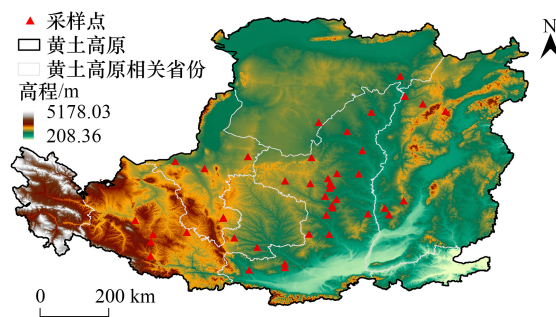


图1 黄土高原土壤有机碳野外调查样地分布图

Fig.1 Locations of selected soil sampling sites of soil organic carbon in the datasets across the transect of the Loess Plateau

1.3.2 结构方程模型

基于科学文献中的因果关系理论,使用 IBM SPSS Amos 软件构建结构方程模型(SEM),探讨地理因子对土壤有机碳含量变化的驱动作用。该模型囊括了气候、植被类型、恢复年限、地形、土壤容重、土层深度和土壤有机碳含量之间所有合理的影响路径,并根据 SEM 技术对模型进行完善,有效解释各因子间的因果关系。最后,通过卡方(χ^2)检验对构建的模型进行拟合优度评估,当卡方检验 $P>0.05$,各参数中 CFI >0.9 ,GFI >0.9 ,RMSE <0.08 时,表明模型的构建较为理想^[22]。

1.3.3 统计分析

采用 Pearson 相关分析方法,对每种植被类型的不同土层土壤有机碳含量与气候、植被恢复年限、地形条件和土壤容重之间的关系进行分析。另外,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)对各植被类型下不同土层深度的土壤有机碳含量进行方差分析和差异性检验。所有统计分析均采用 IBM SPSS Statistics 25.0 进行,通过 Origin 2018 绘制统计图,采样点位置分布图由 ArcGIS 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 植被类型对土壤有机碳的影响

同一植被类型内,不同土层深度土壤有机碳含量具有明显的空间变异性。整体上,各植被类型剖面土壤有机碳含量均呈现出随着土层深度的增加先逐渐减少再略有升高的变化趋势,其中 0—80 cm 土层深度的土壤有机碳含量显著下降,之后在 80 cm 土层以下有小幅度的上升,同时 0—40 cm 土层中的土壤有机碳含量显著高于 40 cm 以下其他三个土层的土壤有机碳含量(图 2),具有明显的表聚性。

植被恢复有利于土壤有机碳在土壤剖面中的积累。乔木和草地在 0—40 cm 土层深度内土壤有机碳含量相较于退耕前明显增加(分别增加约 31%和 16%),而 40—100 cm 土层有机碳含量则相对减少(图 2)。灌木在 0—60 cm 土层深度内土壤有机碳含量相较于退耕前明显增加,而 60—100 cm 土层土壤有机碳含量则相对减少(图 2)。因此,从整体上来看,植被恢复显著促进了 0—40 cm 土层土壤有机碳含量的增加(约增加 26%)。

2.2 气候因素对土壤有机碳的影响

由图 3 可以看出,研究区年均温多在 4—12℃,年降水量介于 250—700 mm 之间。通过对 0—100 cm 内不同土层土壤有机碳与气候因素进行 Pearson 相关分析,结果表明土壤有机碳整体上与年均温具有显著的负相关关系($P<0.01$),即随着年平均温度的增加,土壤有机碳含量呈下降趋势(图 3)。但就灌木植被类型而言,受年均温变化的影响与其他两种植被类型结果并不一致,灌木土壤有机碳与年均温相关性并不显著($P>0.05$)(图 3)。另外,年降水量对各植被类型土壤有机碳的影响均不显著($P>0.05$)(图 3),这表明黄土高原土壤有机碳含量的关键气候因素是年均温度,而年均降水量与土壤有机碳之间没有明显关联。

2.3 地形对土壤有机碳的影响

由图 4 可见,地形条件对植被恢复下的土壤有机碳含量影响显著。土壤有机碳与海拔高度呈极显著正相关关系($P<0.01$),其中乔木和草地土壤有机碳与海拔高度的相关性达极显著水平($P<0.01$),而在灌木植被内,其相关性不显著($P>0.05$)(图 4)。土壤有机碳含量总体上表现为随着坡度增大而小幅增加的趋势,其中坡度的变化与灌木有机碳含量呈显著的正相关($P<0.05$),乔木与草地土壤有机碳含量受坡度影响不显著($P>0.05$),乔木为正相关,草地为负相关(图 4)。

2.4 植被恢复年限对土壤有机碳的影响

植被恢复年限与土壤有机碳存在极显著正相关关系($P<0.01$)(图 5)。各植被类型中,除乔木恢复年限与土壤有机碳含量相关性显著外($P<0.01$),灌木和草地的相关性并不显著($P>0.05$)(图 5)。结果表明,黄土高原地区各植被类型均对提高土壤有机碳含量产生正向效应,且植被恢复的长期固碳效应十分显著,在退耕后期乔木相较于灌木和草地具有更好的固碳效应。

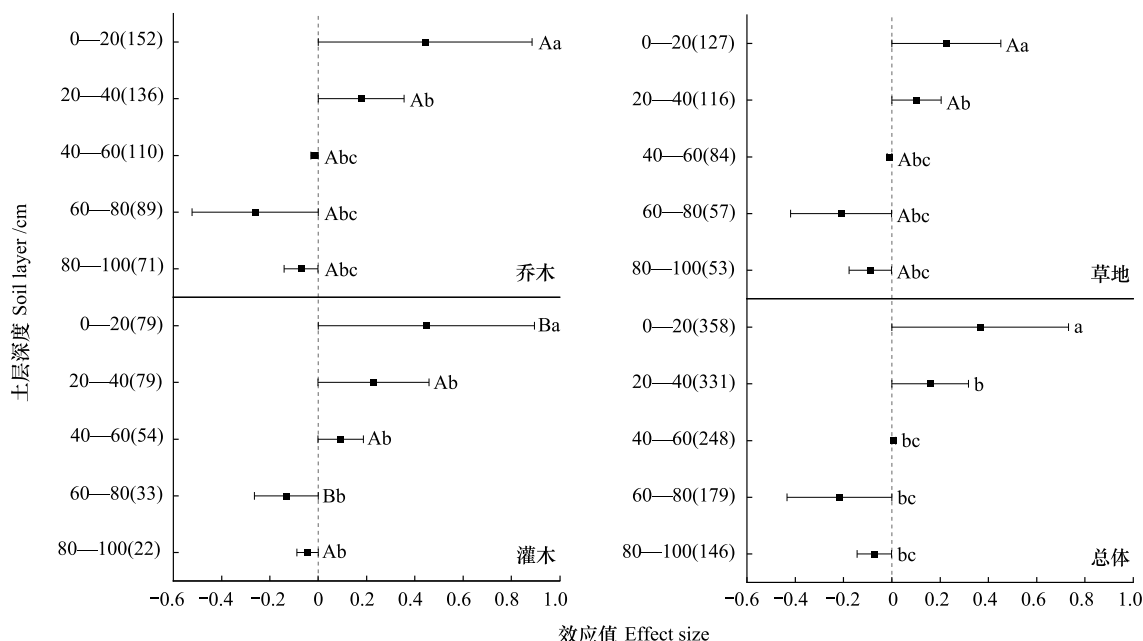


图2 不同植被类型对剖面土壤有机碳的影响

Fig.2 The impact of vegetation restoration with different vegetation types (forest, shrub and grassland) on the SOC of different soil layers (0—20, 20—40, 40—60, 60—80 and 80—100 cm) on the Loess Plateau

带误差棒的点表示土壤有机碳效应值大小(平均值和95%置信区间),括号中的数字是样本大小,不同土层深度和植被类型下土壤有机碳差异分别用不同的小写和大写字母表示($P < 0.05$)

2.5 土壤容重对土壤有机碳的影响

如图6所示,黄土高原地区土壤容重变化范围为 $0.6—2.0 \text{ g/cm}^3$,从总体来看,土壤有机碳与土壤容重之间存在极显著的负相关关系($P < 0.01$),即各植被类型土壤有机碳含量均随土壤容重的增加而逐渐减少(图6)。但就草地植被而言,土壤有机碳与土壤容重之间的相关差异并不显著($P < 0.05$),而乔木和灌木植被土壤有机碳与土壤容重之间的相关性达到极显著水平($P < 0.01$)(图6)。

2.6 土壤有机碳含量的综合影响因素

采用结构方程模型对黄土高原区域0—100 cm土层的土壤有机碳数据进行拟合(图7),总体上,研究区各植被类型的土壤有机碳含量主要受年降水量、年均温、土壤容重、土层深度、生长年限和坡度的影响,而各因素对不同植被类型土壤有机碳含量的影响程度存在差异。

乔木植被SEM模型显示(图7),土壤容重、年降水量和土层深度对土壤有机碳含量产生显著负效应,标准路径系数依次为 -0.45 ($P < 0.001$)、 -0.17 ($P < 0.05$)和 -0.16 ($P < 0.01$);而其他影响因素与土壤有机碳的相关性不显著。此外,年均温、年降水量和土层深度对土壤有机碳的间接效应是通过土壤容重的影响来介导的。由此可见,土壤容重主导了乔木植被中土壤有机碳含量大小。

在灌木植被模型中,土壤有机碳主要受土壤容重、土层深度和坡度的显著影响,且土壤容重和土层深度表现为显著的负向效应,坡度为显著的正向效应,其标准路径系数分别为 -0.41 ($P < 0.01$)、 -0.26 ($P < 0.01$)和 0.24 ($P < 0.05$),而年降水量、年均温和恢复年限对土壤有机碳的总体影响不显著,且年降水量对土壤容重产生极显著的负向反馈(图7)。因此,土壤容重对灌木植被土壤有机碳的负效应最大,而坡度则对其土壤有机碳的正效应最大。

草地SEM模型拟合结果发现(图7),恢复年限对土壤有机碳产生积极效应,其标准路径系数为 0.32 ($P < 0.01$);年均温和土层深度均对土壤有机碳产生显著负向影响,其标准路径系数分别为 -0.35 ($P < 0.001$)和 -0.24 ($P < 0.01$);而年降水量、土壤容重和坡度对土壤有机碳的影响不明显。总体而言,草地土壤有机碳主要

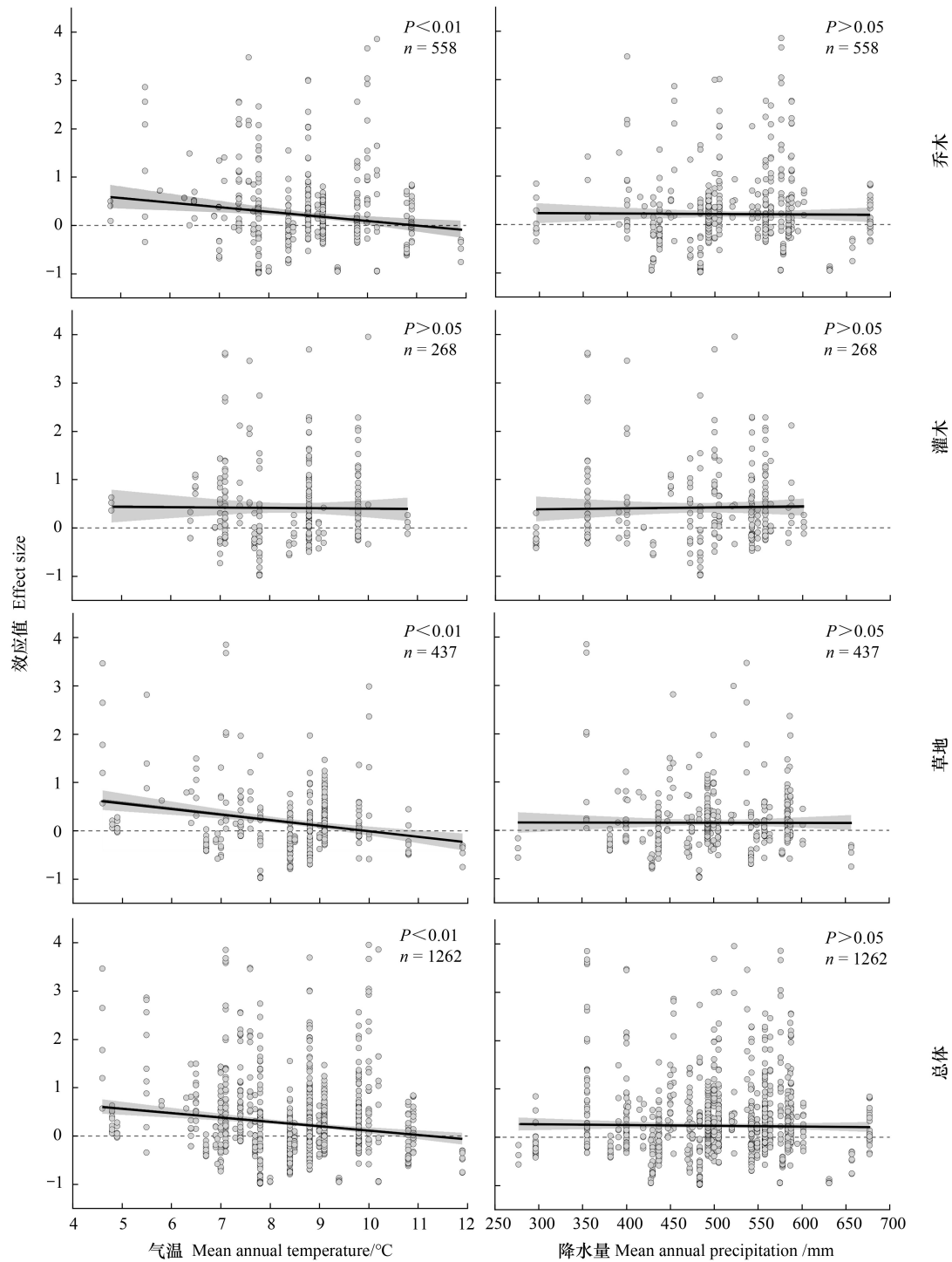


图3 土壤有机碳与年均温和年降水量的关系

Fig.3 The general relationship between SOC effect size and climatic factors (MAP and MAT)

图中阴影部分表示 95% 置信带区间

受年均温的负向影响和恢复年限的正向影响。

3 讨论

本研究揭示了黄土高原不同植被类型下土壤有机碳的垂直分布规律及其驱动机制。多层证据表明,土壤

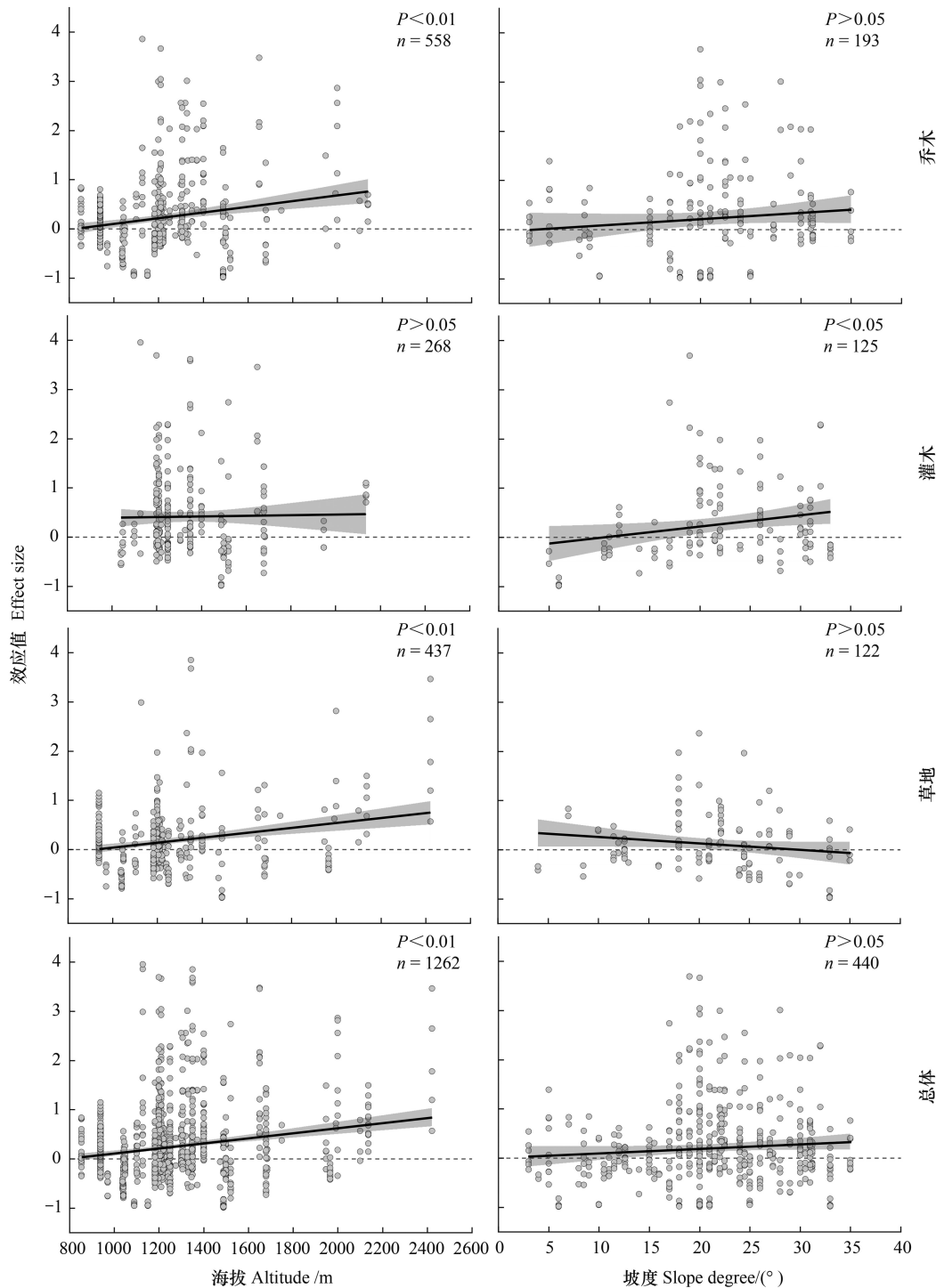


图4 土壤有机碳与海拔和坡度的关系

Fig.4 The general relationship between SOC effect size and altitude and slope degree

图中阴影部分表示 95% 置信带区间

有机碳含量随土层深度呈现先减少后缓慢回升的非线性变化^[23],其中 0—40 cm 浅层土壤表现出显著的碳聚集特征,这与沙国良等^[24]和朱柳霏等^[25]所得研究结论相符。其形成机制可从三重维度解析:(1)生物输入维度:表层土壤同时接收地表凋落物输入与浅层根系分泌物,形成双向碳源补给^[26—27];(2)物理保护维度:表层土壤结构疏松、孔隙度适宜,为微生物活动创造有利环境^[28—30];(3)历史遗留效应:退耕前农田施肥的残留有

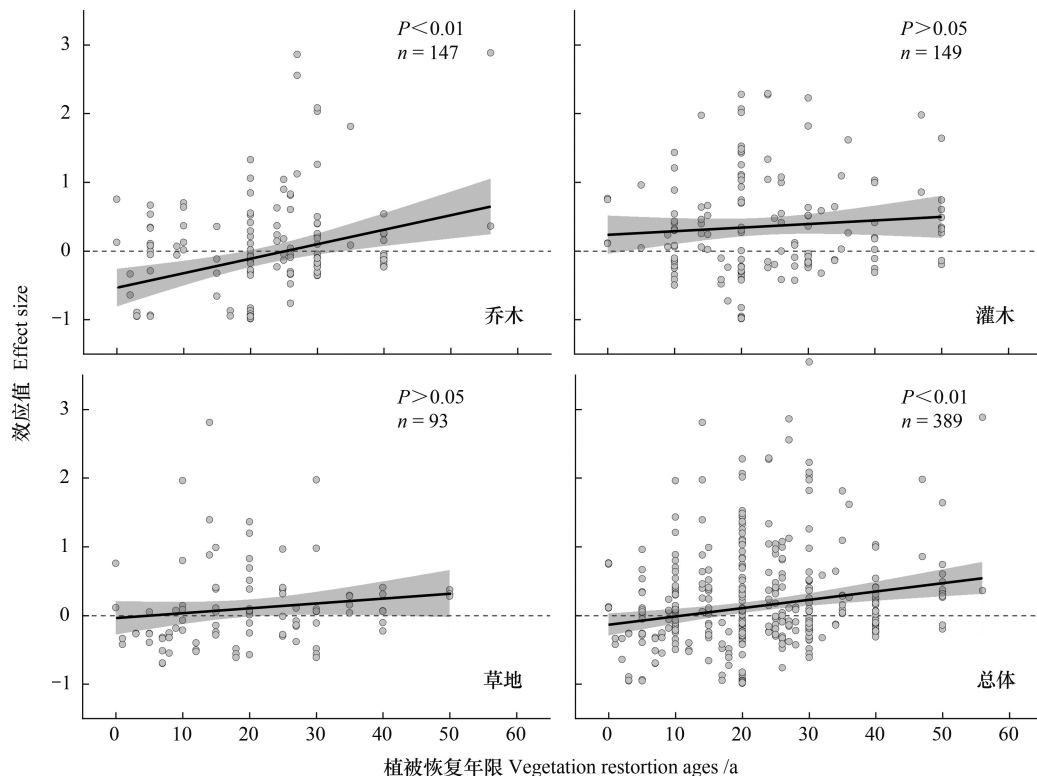


图5 土壤有机碳与植被恢复年限的关系

Fig.5 The general relationship between SOC effect size and vegetation restoration ages

图中阴影部分表示 95% 置信带区间

机质与浅根农作物根系共同构成持续碳库^[23,27]。值得注意的是,40—100 cm 土层中各植被类型的土壤有机碳无显著差异,再次表明土壤表层是储存土壤有机碳的关键层次^[26—27],同时也印证了深层土壤碳库的稳定性特征^[26],这一发现为评估黄土高原碳汇潜力提供了关键深度参数。

植被类型对土壤有机碳的调控呈现灌木>乔木>草地的梯度格局(图2),该结果既验证了韩新辉等^[31]的发现,又与马帅等^[32]提出的乔灌木土壤有机碳分别比耕地提高 73.6%、41.5%、36.6% 形成互证。形成这种差异的生态机制在于:乔灌木具有三维碳输入优势,即冠层凋落物、根系横生辐射、深层(>60 cm)根系分泌物共同构成多通道碳源^[33—34],而草地仅依赖浅层(<30 cm)根系周转的单向输入^[35]。然而,部分研究结果表明退耕还林后,土壤有机碳的固碳效应大小为:乔木>灌木>草地,这可能是由于在对比不同植被类型时,所选用的植被生长年限以及地形因子存在差异造成的^[36]。乔木在恢复后期(>15a)才显现固碳优势,与其冠幅扩展系数、地上生物量积累速率、根系生物量与凋落物带来的外源有机质存在显著时滞效应有关^[32—33],这也解释了短期研究(<10a)可能低估乔木固碳潜力的现象。

气候因子对土壤有机碳的影响呈现温度主导型特征。本研究发现年均温与土壤有机碳含量呈显著负相关($P < 0.01$),这与 Lemenih 等^[37]构建的温度—碳积累理论模型一致,即较高的年均温,容易引起干旱,使得植被初级生产力下降,促进土壤有机质的矿化分解,进而降低土壤有机碳含量^[38—40]。值得注意的是,年降水量与土壤有机碳无显著相关性(图3)。然而,Gansert^[41]研究指出,土壤有机碳含量与降水量呈负相关,其原因可能是低降水造成土壤湿度降低,并导致根呼吸作用下降,土壤孔隙度改善,有利于有机质在土层间的转移,从而增加土壤有机碳含量^[42—43]。而在本研究中,土壤湿度随着降水量的增加而增加,可能导致土壤的固碳效应降低,从而对土壤有机碳含量的影响并不显著。

地形因子通过改变微环境深刻影响土壤有机碳分布。海拔对水热状况产生直接影响,温度随海拔升高而

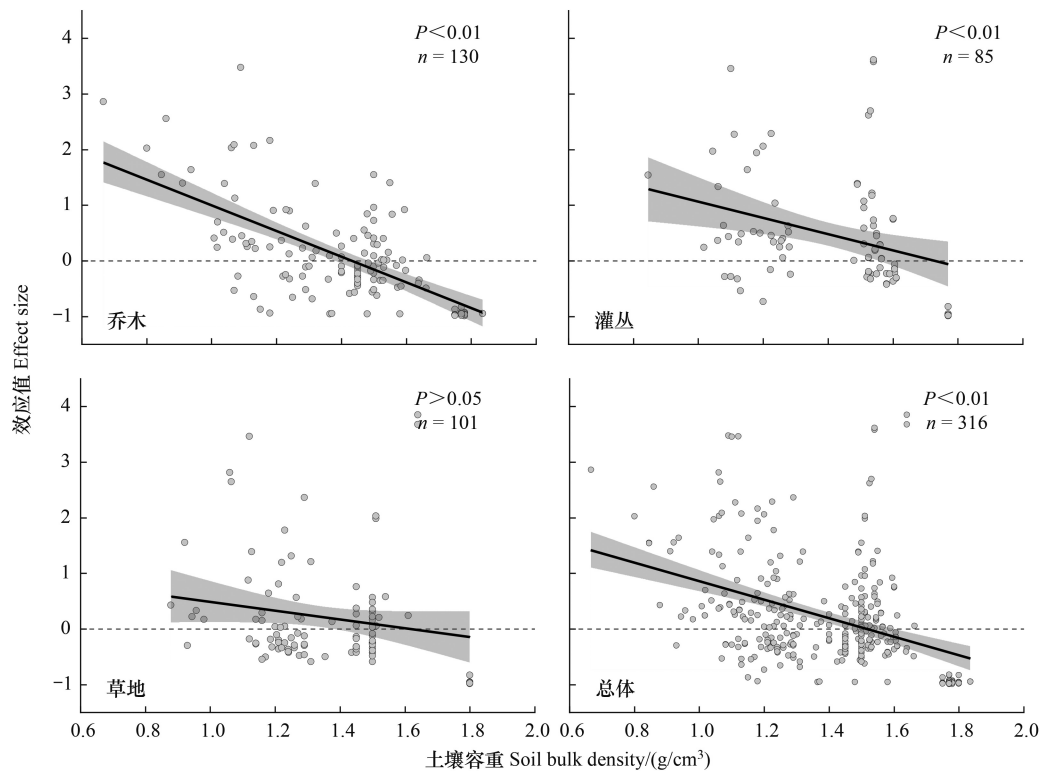


图 6 土壤有机碳与土壤容重的关系

Fig.6 The general relationship between SOC effect size and soil bulk density

图中阴影部分表示 95%置信带区间

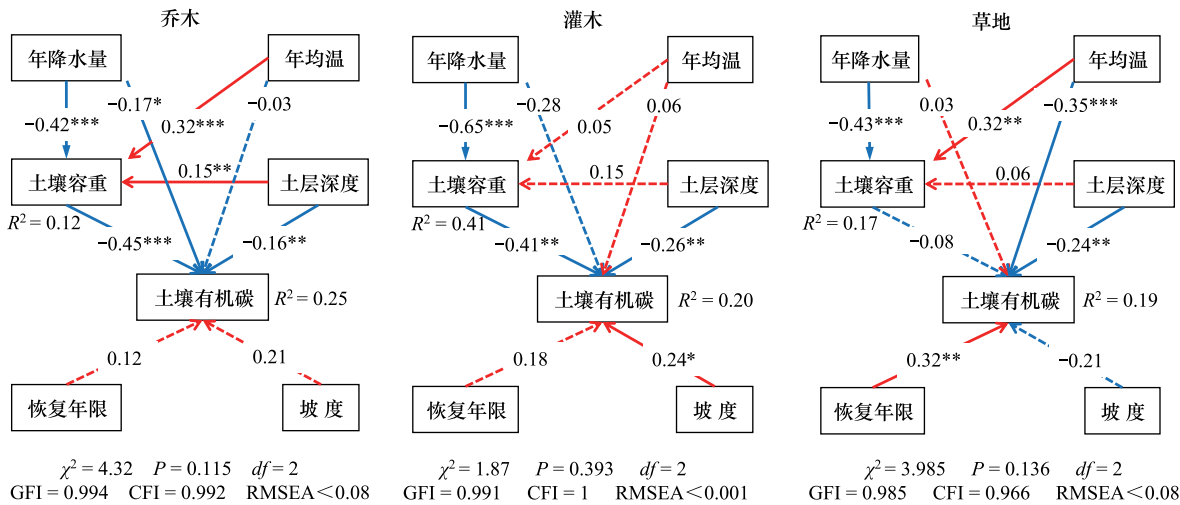


图 7 基于结构方程模型的不同植被类型土壤有机碳的影响因素分析

Fig.7 Influencing factors of SOC in different community types based on structural equation models

图中红色箭头为正相关,蓝色箭头为负相关,箭头上的数字为标准化路径系数,变量旁边的 R^2 为方差解释度, *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$; GFI: 拟合优度指数; CFI: 比较拟合指数; RMSEA: 近似均方根误差

降低,温度降低不仅直接抑制土壤微生物的活性,导致有机质分解速率和分解程度降低^[44],促进土壤固碳效应,同时还通过增强植物多样性间接提升碳输入效率^[44]。并且黄土高原地区独特的地理环境造成海拔跨度大,使得海拔高度对土壤有机碳含量的影响极为显著^[45-46]。然而,坡度对土壤有机碳的影响则呈现植被类型依赖性,通过植被分布、土壤迁移与水分再分布等对土壤有机碳含量产生间接影响。在乔灌林地,植被盖度较

大,地表凋落物丰富,对雨水的截留作用强,同时根系分布较深,水土保持能力较强,能有效减少表层土壤有机碳的流失^[47];而草地土壤有机碳随坡度持续下降,反映侵蚀敏感特性^[34]。黄土高原降水集中且多强降水,草地根系分布较浅,水土保持能力较弱,坡度越大,降水产生的地表径流流速越快,对土壤的冲刷侵蚀能力就越强,因此草地表层土壤有机碳不易储存^[38]。

植被恢复年限对土壤有机碳的促进作用呈现层次性与植被类型特异性^[32,44]。在垂直方向上,不仅表层 0—40 cm 土壤有机碳显著增加,深层土壤也因根系分泌物和有机质淋溶作用获得部分碳累积^[44]。此外,随恢复年限增加,草地植被盖度提高,根系生物量和根系分布深度增加,造成草本植物与土壤的互作效应增强,养分状况比较平衡,可能对提高土壤有机碳含量起促进作用^[48],这与李金芬等^[49]对云雾山地区草地土壤有机碳的研究结果一致。此外,受植物多样性-生物量-土壤有机碳的正反馈循环影响^[44],在植被类型间,乔木随恢复年限的长期固碳优势也印证了高多样性植物群落的碳输入增强机制^[44]。

另外,本研究表明,土壤有机碳与土壤容重之间存在明显的负相关关系,揭示了物理约束对碳循环的深刻影响。低土壤容重不仅有效改善土壤结构,增强根系穿透能力^[28,50],还通过提升孔隙度创造有利于微生物残体积累的微环境^[44]。这种效应在乔灌木植被中更为显著,因其深层根系分布加剧了高容重条件下的碳限制^[51]。这既印证了程浩等^[51]关于植被类型—土壤容重互作效应的发现,又与武小钢等^[29]在芦芽山开展的研究结果一致。由于植物根系数量庞大,且主要分布在土壤表层,使得表层土壤结构疏松多孔,土壤容重下降,土壤质地有所改善,土壤微生物活性增强,因此有利于浅层土壤有机碳的存储^[30]。

总体而言,本研究揭示的“植被—气候—土壤”多维调控框架,深化了对黄土高原土壤固碳机制的认识。不同植被类型通过差异化调节碳输入(生物量)—输出(分解)平衡^[44],形成层级化的固碳模式:灌木在短期恢复中展现快速碳积累优势,而乔木的长期固碳潜力则与物种丰富度驱动的碳输入增强密切相关^[44]。因此,未来研究中,还需重点关注植物功能性状—微生物群落—碳稳定性的级联效应,以更全面评估生态恢复的土壤固碳持续性。

4 结论

黄土高原地区植被恢复与生态恢复项目的实施可以有效提高土壤有机碳含量,增加区域土壤碳汇。研究区 0—100 cm 土层土壤有机碳含量与年均温、土壤容重呈负相关,与海拔高度、植被生长年限、坡度呈正相关,与年降水量相关性不显著。其中,草地土壤有机碳含量与坡度之间呈负相关关系,受土壤容重的变异不显著;乔木植被随退耕年限增加,其土壤增汇效应最为显著。另外,土壤有机碳含量随着土层深度的增加而减少,其中 0—40 cm 的表层土壤有机碳含量的表聚特征显著。总体上,黄土高原地区植被恢复过程中,不同植被类型土壤有机碳含量大小关系为:灌木>乔木>草地,说明灌木具有显著的碳增汇效应,同时植被类型的差异显著影响土壤有机碳含量的剖面分布状况。结构方程模型结果表明,土壤容重对乔木、灌木植被土壤有机碳含量的负向效应最大,坡度对灌木土壤有机碳的正向影响显著,而草地土壤有机碳主要受年均温的负效应和恢复年限的正效应影响。因此,在黄土高原退化生态系统恢复重建过程中,应注意植被恢复过程中土壤有机碳含量的变化,以期稳定提升土壤固碳效益,为双碳目标的实现提供科学支撑。

参考文献(References):

- [1] 孔凡婕,应凌霄,文雯,梁梦茵.基于国土空间生态修复的固碳增汇探讨.中国国土资源经济,2021,34(12):70-76.
- [2] 李妙宇.黄土高原生态系统碳储量现状及固碳潜力评估[D].北京:中国科学院大学,2021.
- [3] 陈泉.林业碳汇经济效益研究[D].成都:四川省社会科学院,2015.
- [4] 党珍珍.黄土高原人工与天然植被恢复下土壤固碳特征及其影响机理[D].西安:陕西师范大学,2015.
- [5] 方精云,朱江玲,石岳.生态系统对全球变暖的响应.科学通报,2018,63(2):136-140.
- [6] 马玉红.黄土区植被类型对土壤有机碳的影响[D].北京:中国科学院研究生院,2008.
- [7] 李玉进,胡澍,焦菊英,吴多洋.黄土丘陵区不同侵蚀环境下土壤有机碳对植被恢复的响应.生态学报,2017,37(12):4100-4107.

- [8] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [9] 王绍强, 刘纪远. 土壤碳蓄积量变化的影响因素研究现状. *地球科学进展*, 2002, 17(4): 528-534.
- [10] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [11] 曾旭婧, 邢艳秋, 单炜, 张毅, 王长青. 基于 Mann-Kendall 法的北黑高速沿线岛状冻土区植被退化分析. *西北林学院学报*, 2017, 32(2): 22-29.
- [12] 王一, 郝利娜, 赵美龄, 许晓露, 李晨辉. 2001—2018 年重庆植被 NDVI 变化及其对气候因子和人类活动的响应. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 222-229.
- [13] 邓蕾. 黄土高原生态系统碳固持对植被恢复的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [14] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [15] Wang X Y, Xu X P, Qiu S J, Zhao S C, He P. Deep tillage enhanced soil organic carbon sequestration in China: a meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 399: 136686.
- [16] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [17] 巩杰, 王玉川, 谢余初, 赵彩霞. 基于 Meta-analysis 的中国干旱半干旱区土地利用变化的土壤碳氮效应研究. *安徽农业科学*, 2011, 39(14): 8408-8411, 8419.
- [18] Paul K I, Polglase P J, Richards G P. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1/2/3): 485-501.
- [19] Chang R Y, Fu B J, Liu G H, Liu S G. Soil carbon sequestration potential for “grain for green” project in Loess Plateau, China. *Environmental Management*, 2011, 48(6): 1158-1172.
- [20] 杨艳芬, 王兵, 王国梁, 李宗善. 黄土高原生态分区及概况. *生态学报*, 2019, 39(20): 7389-7397.
- [21] Liang H B, Xue Y Y, Li Z S, Gao G Y, Liu G H. Afforestation may accelerate the depletion of deep soil moisture on the Loess Plateau: Evidence from a meta-analysis. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(18): 3829-3840.
- [22] 王新源, 马立鹏, 程小云, 张琴, 兰芳芳, 李源, 唐霞, 曲浩, 连杰, 李玉霖. 不同治沙措施对荒漠绿洲过渡带植物群落与土壤因子的影响. *生态学报*, 2022, 42(14): 5869-5883.
- [23] 王晶晶, 魏孝荣, 贾小旭, 黄明斌, 刘志鹏, 姚毓菲, 邵明安. 预测区域尺度深层土壤有机碳的方法. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(3): 561-571.
- [24] 沙国良, 陈宇轩, 魏天兴, 任康, 郭鑫, 傅彦超. 黄土高原丘陵区典型退耕恢复植被土壤碳分布特征及其影响因素. *土壤*, 2022, 54(6): 1265-1272.
- [25] 朱柳霏, 戴艳花, 黎立港, 吴滢, 宋贤冲, 王会利, 覃祚玉, 谭一波, 邓小军. 猫儿山自然保护区不同林分类型土壤有机碳储量及其剖面分配特征. *土壤通报*, 2024, 55(4): 968-973.
- [26] Li M M, Zhang X C, Pang G W, Han F P. The estimation of soil organic carbon distribution and storage in a small catchment area of the Loess Plateau. *Catena*, 2013, 101: 11-16.
- [27] Deng L, Wang G L, Liu G B, Shangguan Z P. Effects of age and land-use changes on soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 105-112.
- [28] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 7-12.
- [29] 武小钢, 郭晋平, 杨秀云, 田旭平. 芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量. *生态学报*, 2011, 31(11): 3009-3019.
- [30] 赵萌捷, 陈云明, 艾泽民, 曹扬, 徐敬华. 黄土丘陵区典型人工林有机碳分布特征及其影响因素. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 270-275.
- [31] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 薛亚龙, 赵发珠. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 223-229.
- [32] 马帅, 赵世伟, 李婷, 李晓晓, 曾宪芳. 子午岭林区不同植被恢复阶段土壤有机碳变化研究. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 94-98, 154.
- [33] 冀瑞瑞, 张强, 杨治平, 张建杰, 王莉. 晋西北黄土高原丘陵区小叶锦鸡儿人工灌丛不同生育阶段土壤肥力特征研究. *山西农业科学*, 2007, 35(3): 51-54.
- [34] Wang Y F, Fu B J, Lü Y H, Chen L D. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 2011, 85(1): 58-66.
- [35] 孟国欣, 查同刚, 张晓霞, 张志强, 朱聿申, 周娅, 刘怡函, 林珠. 植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2447-2454.
- [36] 许明祥, 王征, 张金, 刘国彬. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应. *生态学报*, 2012, 32(17): 5405-5415.

- [37] Lemenih M, Itanna F. Soil carbon stocks and turnovers in various vegetation types and arable lands along an elevation gradient in southern Ethiopia. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 177-188.
- [38] 南雅芳. 退耕条件下黄土丘陵沟壑区坡地土壤固碳能力的空间变化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [39] 张勇, 史学正, 于东升, 王洪杰, 孙维侠, 赵永存. 滇黔桂地区土壤有机碳密度变异的影响因素研究. *土壤学报*, 2009, 46(3): 526-531.
- [40] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 宋明华, 周才平. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布. *土壤学报*, 2008, 45(5): 933-942.
- [41] Gansert D. Root respiration and its importance for the carbon balance of beech saplings (*Fagus sylvatica* L.) in a montane beech forest. *Plant and Soil*, 1994, 167(1): 109-119.
- [42] 郑智超, 满浩然, 臧淑英, 刘超, 董星丰. 大兴安岭呼玛河流域多年冻土区森林土壤有机碳和有效氮分布特征及影响因素. *冰川冻土*, 2023, 45(1): 222-232.
- [43] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 544-550.
- [44] 段晓洋, 兰天翔, 苏日高格, 刘林, 郭钟阳, 吕浩然, 张炜平, 李隆. 植物多样性对土壤有机碳及其稳定性影响的研究进展. *植物生态学报*, 2024, 48(11): 1393-1405.
- [45] 邓蕾, 李继伟, 瞿晴, 石经纬, 上官周平. 退牧还草地土壤有机碳固持动态与驱动机制研究进展. *应用生态学报*, 2024, 35(11): 3208-3216.
- [46] 刘伟, 程积民, 高阳, 程杰, 梁万鹏. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68-76.
- [47] 程金, 黄文卿, 张世昌, 张卫清, 黄功标, 张江周, 吴良泉. 福建省表层土壤有机碳密度空间分布及影响因素分析. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(4): 805-816.
- [48] 周恒. 不同生长年限紫花苜蓿草地土壤有机碳及其组分变化特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [49] 李金芬, 程积民, 刘伟, 古晓林. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征. *草地学报*, 2010, 18(5): 661-668.
- [50] 王志齐, 杜兰兰, 赵慢, 郭胜利. 黄土区不同退耕方式下土壤碳氮的差异及其影响因素. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 716-722.
- [51] 程浩, 张厚喜, 黄智军, 徐自坤, 杨强, 刘爱琴. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳含量变化特征. *森林与环境学报*, 2018, 38(2): 135-141.