

DOI: 10.20103/j.stxb.202306241340

衣鹏慧, 吴会峰, 胡保安, 温馨, 韩海荣, 程小琴. 黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素. 生态学报, 2023, 43(24): 10054-10064.

Yi P H, Wu H F, Hu B A, Wen X, Han H R, Cheng X Q. Variation characteristics and influencing factors of soil organic carbon storage after returning farmland to forest on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10054-10064.

黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素

衣鹏慧, 吴会峰, 胡保安, 温馨, 韩海荣, 程小琴*

北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

摘要: 土壤有机碳(SOC)固存效应与影响因素识别是当前研究的焦点和前沿议题。然而,在退耕还林后,SOC的固存效应以及各影响因素之间的协同变化规律尚不明确。对于基于气候、植被、土壤等多重因素综合作用的定量归因,仍需加强研究。搜集了1999到2022年黄土高原地区有关退耕还林后植被恢复对SOC储量影响的117篇文献,共获得了1140组SOC数据。通过对不同条件下(气候因素、植被因素、土壤因素)植被恢复对SOC储量的影响程度的分析,揭示植被恢复类型对SOC储量的影响。同时,采用地理探测器模型探讨不同植被恢复类型SOC储量增加效应的主要驱动因素及其交互作用。研究结果表明,植被恢复显著提高了该地区的SOC储量。林地的固碳效应优于灌木地和草地,分别显著提高了36.21%,32.41%和15.57%。植被恢复对SOC储量的增加效应随着植被恢复年限和植被覆盖率的增加而增强,特别是在低土壤容重($<1\text{ g/cm}^3$)条件下,植被恢复对SOC储量的增加效应更为显著,但随着土壤深度增加植被恢复对SOC储量的增加效应减弱。在年平均气温(MAT)为7—10℃、年平均降雨量(MAP)为450—550 mm条件下,林地恢复有助于促进SOC储量的增加效应。在MAT $<7^\circ\text{C}$ 、MAP为450—550 mm条件下,灌木地的SOC储量增加效应更明显,但受植被覆盖率的限制。在MAT $<7^\circ\text{C}$ 、MAP $>550\text{ mm}$ 条件下,草地的SOC储量增加效应更为显著。地理探测器模型分析表明,植被恢复年限、植被覆盖率和MAP分别是影响林地、灌木地和草地SOC固存的主要驱动因素。因素间交互作用通常比单一因素对SOC储量的影响更为显著。具体而言,MAP与植被恢复年限的交互作用对林地SOC储量的增加效应最高,达到了33.46%;MAT与土壤容重的交互作用对灌木地SOC储量的增加效应最高,达到了86.77%;MAP与植被覆盖率的交互作用对草地SOC储量的增加效应最高,达到了60.59%。研究结果可为不同恢复条件下选择合理的植被配置方式提供参考。

关键词: 土壤有机碳;植被恢复;Meta分析;驱动因素;定量评估

Variation characteristics and influencing factors of soil organic carbon storage after returning farmland to forest on the Loess Plateau

YI Penghui, WU Hui Feng, HU Baoan, WEN Xin, HAN Hairong, CHENG Xiaoqin*

School of Ecology and Conservation of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The carbon sequestration effect of soil organic carbon (SOC) and identification of the influencing factors are the core and frontier issues of current research. However, the retention of SOC after returning farmland to forests and the synergistic effect of various influencing factors are still unclear. The quantitative attribution based on climate, vegetation, soil, and other factors still needs to be strengthened. By collecting 117 papers about the influence of vegetation restoration on SOC storage after returning farmland to forests on the Loess Plateau from 1999 to 2022, 1140 pairs of valid data were obtained, and the influence of vegetation restoration on SOC storage under different conditions (climate factors, vegetation

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0607304)

收稿日期:2023-06-24; 网络出版日期:2023-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxq_200074@163.com

factors, and soil factors) were analyzed. At the same time, the main driving factors affecting SOC storage of different vegetation restoration types and their interaction were identified and quantified through the modeling of geographic detector. The results showed that vegetation restoration could significantly increase SOC storage on the Loess Plateau, and the effect of forest land restoration on soil carbon sequestration was better than that of shrub land and grassland, which were significantly increased by 36.21%, 32.41%, and 15.57%, respectively. The effect of vegetation restoration on the SOC storage increased with the increases of vegetation restoration age and vegetation coverage, but decreased with the increase of soil depth. When soil bulk density was low ($<1\text{g}/\text{cm}^{-3}$), it was more likely to promote the increase of SOC storage. In addition, when mean annual temperature (MAT) was $7\text{--}10^{\circ}\text{C}$ and mean annual precipitation (MAP) was $450\text{--}550\text{ mm}$, the restoration of forest land was more conducive to increasing SOC storage. When MAT was $<7^{\circ}\text{C}$ and MAP was $450\text{--}550\text{ mm}$, the effect of shrub land on SOC storage was more significant, but it was limited by vegetation coverage. When MAT was $<7^{\circ}\text{C}$ and MAP was $>550\text{ mm}$, the effect of grassland restoration on SOC storage increased significantly. The geographic detector model showed that vegetation restoration age, vegetation coverage, and MAP were main driving factors for SOC storage in forest land, shrub land, and grassland, respectively. In the aspect of increasing SOC storage, the interaction between various factors was better than that of single factor. Specifically, the interaction between MAP and vegetation restoration age made the most significant contribution to SOC storage of forest land, which was 33.46%. In shrub land, the interaction between MAT and soil bulk density contributed the most to SOC storage (86.77%). The interaction between MAP and vegetation coverage contributed the most to SOC storage of grassland (60.59%). It provides a reference for selecting reasonable vegetation allocation under different restoration conditions.

Key Words: soil organic carbon; vegetation restoration; meta-analysis; driving factors; quantitative assessment

土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库,土壤有机碳(SOC)储量约为大气碳库的 3.3 倍,植被碳库的 4.5 倍^[1-2]。SOC 作为土壤碳库的重要组成部分,其动态平衡在全球气候变化和碳循环中的作用尤为重要。黄土高原位于干旱与半干旱地区,地质破碎,土壤侵蚀严重,长期以来面临着严重的生态环境问题^[3],土壤侵蚀造成的 SOC 损失是大气 CO_2 浓度加剧的驱动因素之一^[4]。植被恢复通过促进植物和土壤中碳的吸收和利用,被认为是实现“双碳目标”下的生态修复的一种有效途径,SOC 储量的提升可能会降低大气中 CO_2 浓度的增加。在日益严峻的生态环境问题和气候变化威胁的双重背景下,如何最大限度地提高黄土高原地区 SOC 储量来恢复脆弱的生态系统以及降低土壤侵蚀带来的消极影响已成为许多生态学者共同关切的热点议题。

自退耕还林工程实施以来,尽管已有大量研究表明植被恢复措施对提高 SOC 储量具有显著成效^[5-8],但由于不同植被类型光合及生物残体等有机物质的输入,以及植物和土壤微生物分解作用为主的有机物质的损失之间的复杂生态过程对 SOC 动态平衡的作用机制的响应不同^[9],有机质的输入和输出过程因受到气候、植被、土壤等多方面因素的综合影响,导致不同区域植被恢复对 SOC 储量作用规律表现不同的特征^[10]。相关研究表明草地 SOC 固存对年平均气温(MAT)和年平均降雨量(MAP)的响应比林地更敏感^[11]。在 MAP 较少($<550\text{ mm}$)的地区进行草地和灌木地恢复,在 MAP 较多($>550\text{ mm}$)的地区进行林地恢复可以减少 SOC 的损失^[12]。除气候因素,SOC 储量的变化特征还可不同程度地被植被恢复年限所解释。例如,草地恢复需 >30 年才可达农田 SOC 储量水平^[13],但是也有研究表明需要约 100 年的恢复年限^[14]。同时,在植被恢复过程中,植被覆盖率的增加改变了地表覆被情况,土壤特性发生变化,使得 SOC 储量得到了提升^[15]。此外,有研究表明 SOC 储量在幼林中(<15 年)随 MAP 的增加而增加,但在中老林(>15 年)中呈现减少的趋势^[16]。因此,植被恢复后 SOC 储量的增加或减少在很大程度上取决各种因素的相互作用,而这些因素之间的复杂相互作用还缺少定量评估。目前,退耕还林后关于植被恢复对土壤固碳效应的研究尺度多基于黄土高原有限试验点,难以充分代表该地区,所得出的结论在更大区域范围内普适性较差,明确 SOC 储量的总体变化趋势和多因素间复杂的作用机制是十分必要的。

本文旨在:(1)明确退耕还林后植被恢复是否会增加黄土高原地区 SOC 储量;(2)探讨气候因素、植被因素和土壤因素下 SOC 储量的变化特征;(3)揭示和量化评估影响 SOC 储量的关键因子及其相互作用。以期为黄土高原不同气候区及不同恢复条件下选择合理的植被配置方式提供参考,发挥退耕还林生态工程的最大效益。

1 材料与方法

1.1 文献检索

本文通过中国知网、万方和 Web of Science 中英文数据库对 1999—2022 年的相关论文进行检索。中文以“黄土高原”、“植被恢复”、“植被恢复类型”、“土地利用”、“土地利用方式”、“土壤有机碳”、“土壤有机碳储量”和“土壤养分”等关键词进行检索。英文以“the Loess Plateau”、“vegetation restoration”、“vegetation restoration types”、“land use”、“land use pattern”、“soil organic carbon”、“soil carbon storage”和“soil nutrient”等关键词进行检索。为保证研究的准确性,尽可能全面搜索黄土高原地区“植被恢复与 SOC 固存”的相关文献。

为满足筛选和分析数据时的准确性,采用以下标准筛选文献:(1)确定文献研究的所需指标均来自黄土高原地区试验位点;(2)文献中至少包含一种以农田为对照组的植被恢复类型(林地、灌木地、草地);(3)SOC 储量可以直接或间接由土壤有机质、SOC 以及容重计算得到。(4)文献中对样本数、平均值等数据记录清晰,图表数据采用 GetData Graph Digitize 2.26 软件提取。

最终获得 117 篇符合标准的文献:中文 79 篇,英文 38 篇,共 1140 组 SOC 数据。检索后对 SOC 储量数据进行偏移检验,结果显示失安全数(Fail-safe number)为 19967.3,远远大于临界值 595(5N+10),不存在文献偏移。检索的指标有经度、纬度、MAT、MAP、植被恢复年限、植被覆盖率、SOC 储量、SOC 含量、土壤有机质、土壤容重和土壤采样深度。

1.2 数据分类

为了更全面探讨影响退耕还林后植被恢复对 SOC 储量的因素,本文根据黄土高原地区基本特征和所收集数据的均匀性对指标进行分组,具体分组情况如下(表 1)所示。

表 1 因素分组信息
Table 1 Factor classification information

因素 Factor	分组 Grouping		
年平均气温 Mean annual temperature/℃	<7	7—10	>10
年平均降雨量 Mean annual precipitation/mm	<450	450—550	>550
植被恢复年限 Vegetation restoration age/a	<10	10—30	>30
植被覆盖率 Vegetation coverage/%	≤60	>60	—
土壤深度 Soil depth/cm	0—20	20—40	40—60
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	<1	1—1.3	>1.3

—代表没有相关因素分组

1.3 数据分析

土壤有机质采用 0.58 为系数进行有机碳含量换算,计算公式为^[17]:

SOC=SOM×0.58 (1)

式中,SOC 为土壤有机碳含量(g/kg);SOM 为土壤有机质含量(g/kg)。

将数据中不同土壤深度分类的 SOC 含量归一化处理:比如 0—5cm、5—10cm、10—20cm 等,按照土壤深度分别加权平均到相同土壤深度。对于只给出单层 SOC 含量的数据根据杨睿哲等^[11]和 Li 等^[18]方法调整到 0—20cm 土层,计算公式为:

SOC_t = $\frac{1 - 0.9928^{20}}{1 - 0.9928^H}$ × SOC_H (2)

式中, SOC_t 为0—20 cm 土壤深度的 SOC 含量(g/kg);0.9928 为 SOC 含量随土壤深度变化的相对减少率; H 为原始采样深度(cm); SOC_H 为原始土壤深度的 SOC 含量。

将文献中检索的 SOC 数据全部转换成 SOC 储量,计算公式为:

$$SOCS = \frac{SOC \times BD \times H}{10} \quad (3)$$

式中,SOCS 为 SOC 储量(Mg/hm²);BD 为土壤容重(g/cm³); H 为土壤深度(cm)。

使用 WU 等^[19]的方法估算未给出的土壤容重(BD),计算公式为:

$$BD = -0.1229 \times \ln(SOC) + 1.2901 \quad (SOC > 60 \text{ g/kg}) \quad (4)$$

$$BD = 1.3774e^{-0.0413 \times SOC} \quad (SOC < 60 \text{ g/kg}) \quad (5)$$

如果文献没有提供数据的标准差(SD),则用数据的 $\frac{1}{10}$ 代替^[20]。若文献提供的数据包括标准误(SE)和样本量(N),计算公式为:

$$SD = \sqrt{N} \times SE \quad (6)$$

进行 Meta 分析时,用效应值($\ln R$)反映不同植被恢复类型对 SOC 储量的影响,Var 为 $\ln R$ 的方差,计算公式为^[21]:

$$\ln R = \ln\left(\frac{\bar{X}_t}{\bar{X}_c}\right) = \ln \bar{X}_t - \ln \bar{X}_c \quad (7)$$

$$\text{Var} = \frac{SD_t^2}{N_t \bar{X}_t^2} + \frac{SD_c^2}{N_c \bar{X}_c^2} \quad (8)$$

式中, $\bar{X}_t$ 和 $\bar{X}_c$ 分别表示处理组和对照组的 SOC 储量的平均值; N_t 、 N_c 、 SD_t 和 SD_c 分别表示处理组和对照组 SOC 储量的样本数和标准差。

综合效应值($\ln R_{++}$)、 $\ln R_{++}$ 的标准误差(SE)和权重(W)的计算详见参考文献^[22];为了更直观地反映 SOC 储量对植被恢复的响应,将结合效应值转化为 SOC 储量的变化率(X),计算公式为^[23]:

$$X = (e^{\ln R_{++}} - 1) \times 100\% \quad (9)$$

如果 X 的 95%置信区间在零刻线右侧,则表示相对于实验组(农田),处理组(植被恢复)显著增加 SOC 储量;反之则显著减少;若 X 的 95%置信区间包含零刻线,则表示处理组对 SOC 储量无显著作用。进行 Meta 分析时,对收集的数据进行异质性检验,若 $P < 0.05$,使用随机效应模型进行亚组分析;若 $P > 0.05$,则采用固定效应模型^[24]。

地理探测器是一种基于空间分异性来探索变量驱动机制的一种统计学方法,该方法将连续性变量进行离散化处理后,通过建立自变量与因变量之间的模型,分别计算和比较自变量的 q 值及两个自变量叠加后的 q 值,判断每个因变量对自变量的影响程度以及因变量间是否存在交互作用以及交互作用的强弱^[25]。因此本文运用地理探测器方法对退耕还林后黄土高原地区 SOC 储量变化特征进行多因子定量归因,甄别不同植被恢复类型下 SOC 储量变化的主要驱动因素及其交互作用。

本文使用 MetaWin 2.1 计算效应值及其 95%置信区间;并运用 R 4.1.3 进行地理探测器分析影响因素对 SOC 储量的相对贡献率及交互作用;最后用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 植被恢复对 SOC 储量影响的总体特征

与农田相比,植被恢复下 SOC 储量效应值 $\ln R$ 的频数分布呈显著性正态分布($P < 0.01$),满足 Meta 分析的必要条件(图 1)。其中,林地 SOC 储量的效应值 $\ln R$ 主要分布在 0.00—0.50,均值为 0.335;灌木地 SOC 储量的效应值 $\ln R$ 主要分布在 -0.20—0.50,均值为 0.299;草地 SOC 储量的效应值 $\ln R$ 主要分布 0.00—0.30,均值为 0.146)。

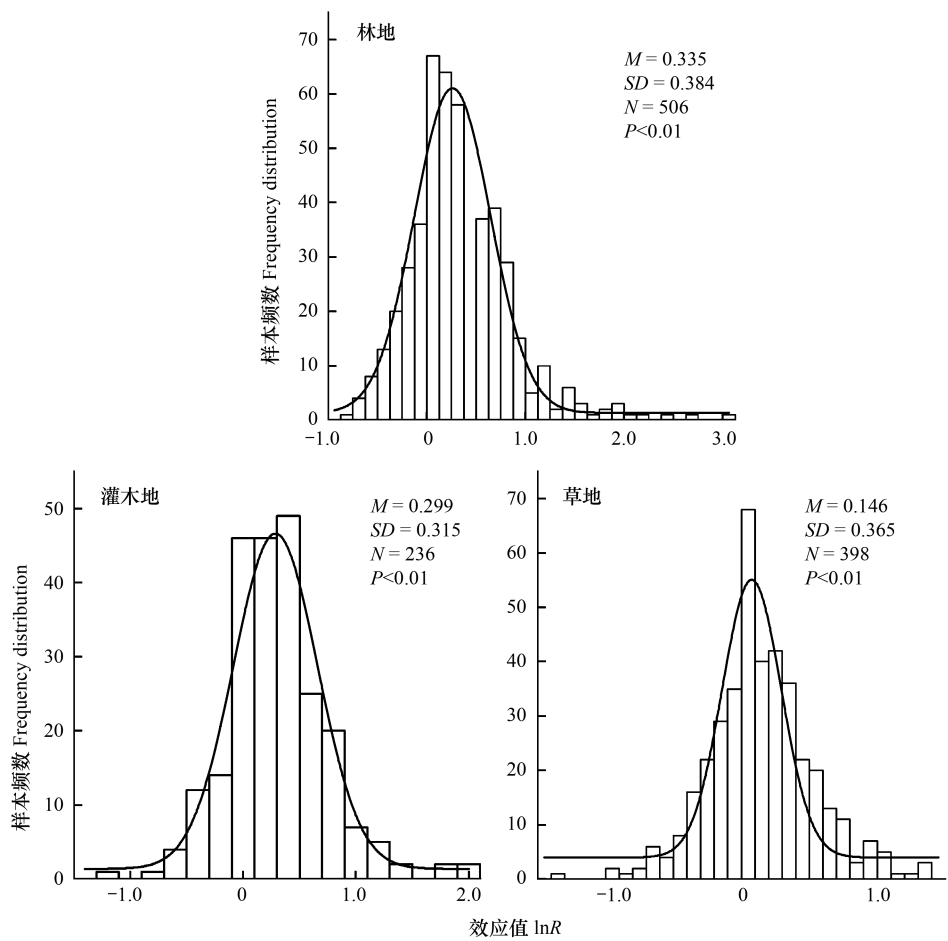


图1 SOC 储量效应值的频率分布

Fig.1 Frequency distribution of the effect size of SOC storage

M、SD 和 N 分别为平均值、标准差和样本量;曲线为拟合高斯分布函数,P 为显著性检验概率水平

总体来看,植被恢复可显著提高 SOC 储量 (27.83%)。SOC 储量的增加效应以林地最大 (36.21%),灌木地次之 (32.41%),草地最小 (15.57%)。其中,林地、灌木地与草地呈现显著差异,林地与灌木地间无显著差异(图 2)。

2.2 植被恢复对 SOC 储量的影响因素分析

对不同植被恢复类型的 SOC 储量效应值 lnR 进行异质性检验,结果显示在各因素影响下 SOC 储量均存在异质性 ($P < 0.01$) (表 2)。

在不同 MAT 条件下,植被恢复对 SOC 储量的增加效应存在差异。林地 SOC 储量的增加效应呈现先升高后降低的趋势,增加程度由大到小顺序表现为 39.46% (7—10℃)、29.55% (<7℃)、23.97% (>10℃);灌木地和草地恢复对 SOC 的增加效应呈现逐渐降低的趋势,在 MAT<7℃ 条件下最高,分别显著增加了 37.88% 和 22.85%;而 MAT>10℃ 时,草地 SOC 储量无显著增加效应。随着 MAP 的增加,林地和灌木地对 SOC 储量提高

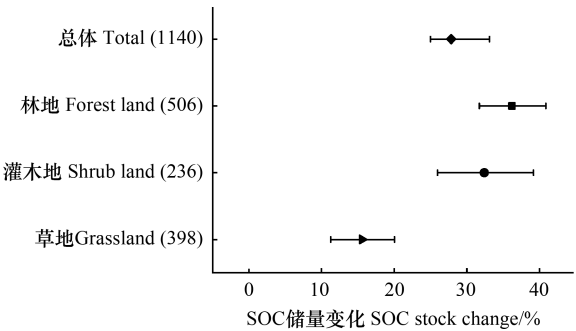


图2 SOC 储量对植被恢复的响应

Fig.2 Response of SOC Storage to vegetation restoration

SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;括号中数值表示相关样本量;图中误差线表示 95%的置信区间

的变化趋势为先升高后降低,在 MAP 为 450—550 mm 条件下的增幅最大,分别显著提高了 41.09% 和 38.64%;而草地呈现逐渐升高的趋势,在 MAP>550 mm 条件下的增幅最大,显著提高了 36.79%(图 3)。

表 2 异质性检验结果

Table 2 Result of heterogeneity test

植被恢复类型 Vegetation restoration type	影响因素 Effect factor					
	年平均气温 Mean annual temperature	年平均降雨量 Mean annual precipitation	植被恢复年限 Vegetation restoration age	植被覆盖率 Vegetation coverage	土壤容重 Soil bulk density	土壤深度 Soil depth
林地 Forest land	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$
灌木地 Shrub land	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$
草地 Grassland	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$

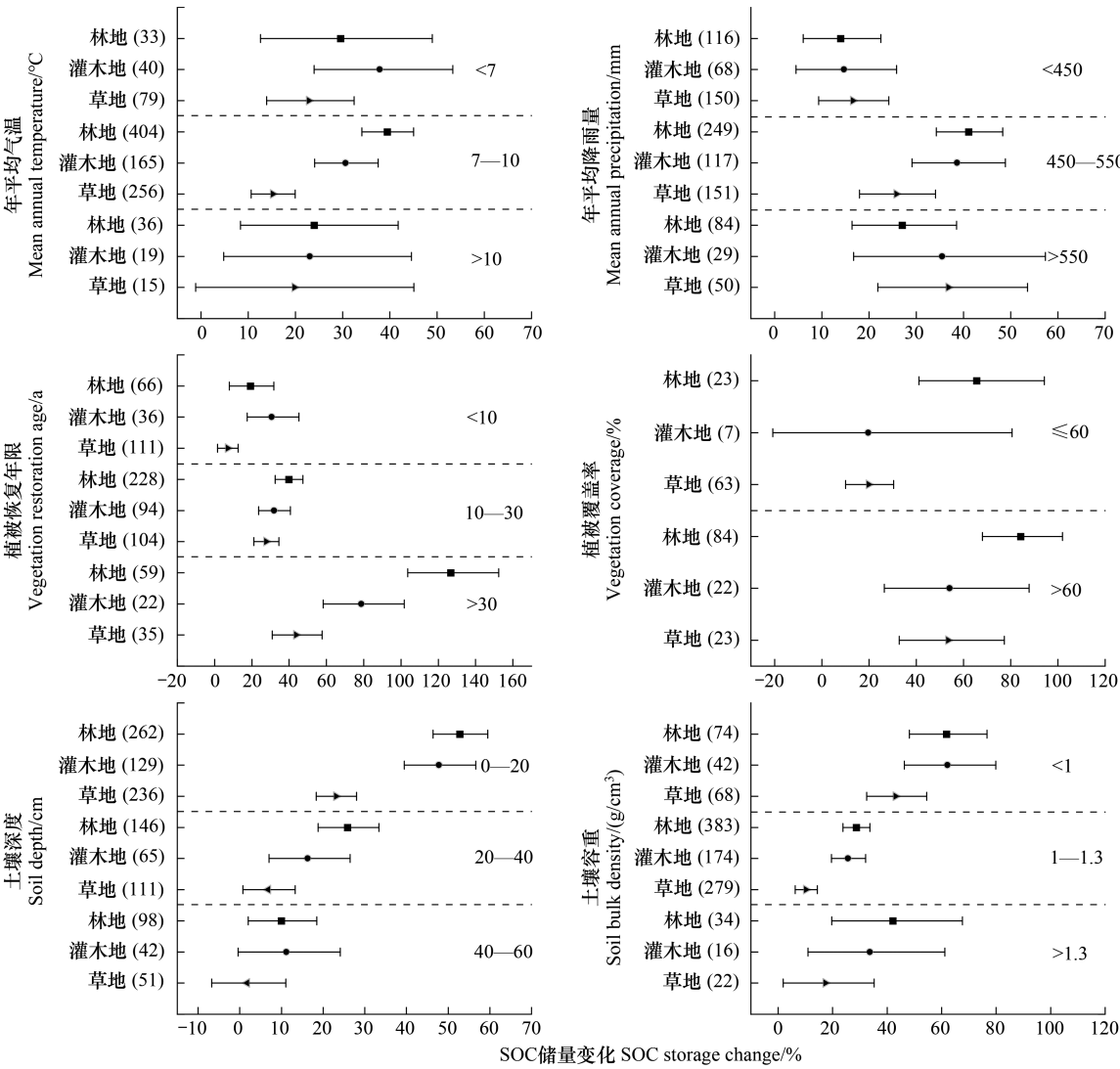


图 3 SOC 储量在不同因素下的变化特征

Fig.3 Change characteristics of SOC storage under different factors

在不同植被恢复年限条件下,植被恢复对 SOC 储量的增加效应表现为植被恢复年限越长,SOC 储量的增加效应越大;且植被恢复年限<30 a 的林地和灌木地 SOC 储量的增幅显著低于植被恢复年限>30 a 的林地和灌木地;植被恢复年限<10 a 的草地 SOC 储量的增幅显著低于植被恢复年限>10 a 的草地。植被覆盖率≤60%时,林地和草地 SOC 储量分别显著提高了 65.55%和 19.83%,而灌木地无显著变化;植被覆盖率>60%时,

各植被恢复类型均可显著提高 SOC 储量,分别提高了 84.21%、54.13%和 53.45%(图 3)。

图 3 所示,随着土层的加深,植被恢复对 SOC 储量提高的幅度呈现降低的趋势。林地恢复可显著提高 0—60 cm 各土层 SOC 储量,灌木地和草地恢复可显著提高 0—40 cm 各土层 SOC 储量,而在 40—60 cm 土层中无显著增加效应。不同植被恢复类型 SOC 储量增幅的最高值出现在低土壤容重(<1 g/cm³)条件下,显著高于中土壤容重(1—1.3 g/cm³)条件下对 SOC 的增加效应(图 3)。

2.3 多因素对 SOC 储量的贡献率及交互作用

通过地理探测器模型分析了各因素对 SOC 储量的相对贡献率(图 4)。植被恢复年限对林地 SOC 储量的贡献率最大(21.44%),其次是 MAT(20.95%)。各因素对灌木地 SOC 储量的贡献率表现为植被覆盖率(59.93%)> MAT(53.44%)> MAP(49.72%)> 土壤容重(42.66%)> 植被恢复年限(42.46%)> 土壤深度(10.94%)。MAP 对草地 SOC 储量的贡献率最大(32.63%),其余因素分别为:植被覆盖率(18.18%)> MAT(15.67%)> 植被恢复年限(8.62%)> 土壤容重(5.15%)> 土壤深度(0.19%)。

地理探测器模型交互作用的分析结果表明,MAP 与植被恢复年限的交互作用对林地 SOC 储量的增加效应最大(33.46%)。MAT 与土壤容重的交互作用对灌木地 SOC 储量的增加效应最大(86.77%)。MAP 与植被覆盖率的交互作用对草地 SOC 储量的增加效应最大(60.59%)(图 4)。

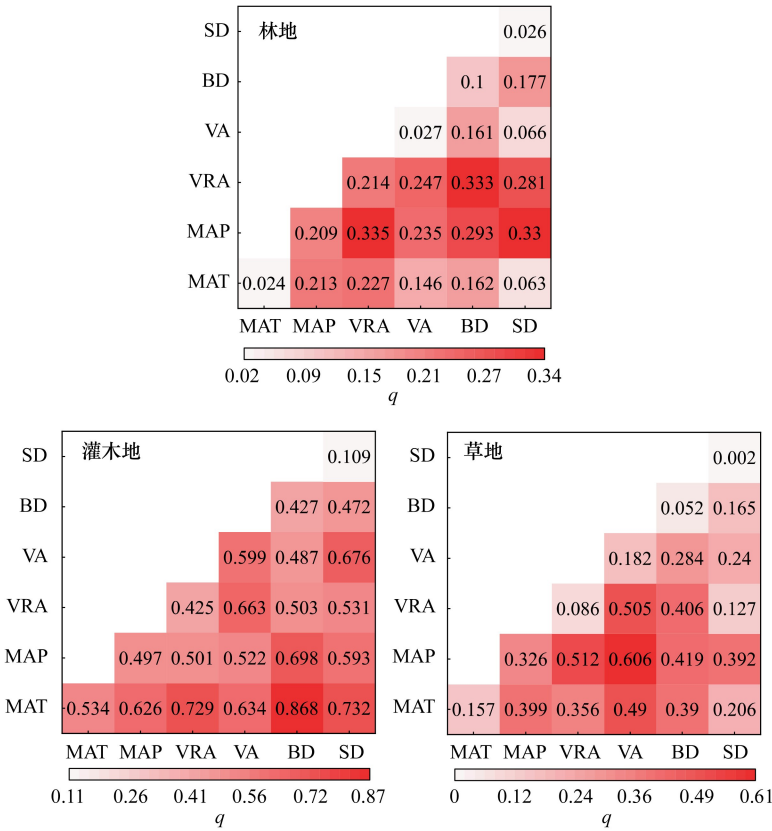


图 4 SOC 储量影响因素的贡献率及交互作用
Fig.4 Contribution rate and interaction of influencing factors of SOC storage

MAT: 年平均气温 Mean annual temperature; MAP: 年平均降雨量 Mean annual precipitation; VRA: 植被恢复年限 Vegetation restoration age; VC: 植被覆盖率 Vegetation coverage; SD: 土壤深度 Soil depth; BD: 土壤容重 Soil bulk density

3 讨论

3.1 气候因素对 SOC 储量的影响解析

温度和降雨量是影响 SOC 固存和分解的重要因素^[26],在黄土高原地区有明显的空间分布特征,通过光

合作用产生的净初级生产力对植被分布进行调控^[27],较高的 SOC 储量往往更频繁地出现在潮湿和较冷的地区,因为这些条件减缓了解和矿化的过程。灌木地和草地 SOC 储量在 MAT<7℃ 条件下的增量最大,而林地 SOC 储量在 MAT 为 7—10℃ 的条件下增量最大,其原因是低温会抑制 SOC 的降解速率,林地的冠层更为茂盛,在一定程度上可抵御温度升高对 SOC 固存的消极影响^[11]。SOC 储量的变化主要由植物碳输入量和微生物分解量来调控,最终影响 SOC 的输出过程,因此 SOC 储量随 MAT 升高而降低的现象可以用与植物碳输入量相比,微生物分解作用对温度的响应更大来解释^[28],所以在 MAT>10℃ 条件下 SOC 储量的增加效应较小。由于微生物的温度敏感性,温度升高可使草地土壤细菌和真菌群落活性提高加速土壤碳分解^[29],因此在温度较低的环境中进行草地恢复,可能更利于草地 SOC 储量的固存。

降雨量是黄土高原地区土壤水分的主要限制因素,决定了土壤水分与 SOC 之间的权衡关系。各植被恢复类型在 MAP 条件下不同的响应可归因于不同植物物种的性质以及它们与土壤水分条件和微生物之间复杂的相互作用^[30]。在干旱地区,降雨量不足(MAP<450 mm)时,植物固定的碳多用于增加其生物量而不是 SOC 储量;而在降雨量较为充沛的地区(MAP>550 mm),加速了 SOC 的矿化,导致其固存量相对低于 MAP 为 450—550 mm 的地区^[31]。但草地在 MAP>550 mm 条件下的固碳效应最好,与 Deng 等^[12]研究不同,这一差异可能与草地植被覆盖率的交互作用有关。虽然较大的降雨量可能会由于溶出有机碳造成淋溶损失而减少有机层中碳的积累,但草地覆盖层为土壤提供更多的渗透通道,从而降低径流系数抑制碳矿化带来的损失^[32]。MAP 是草地 SOC 储量增加效应的主要驱动因素,降雨量的差异性直接或间接影响了 SOC 储量^[33]。

3.2 植被因素对 SOC 储量的影响解析

本研究表明,植被恢复年限越长对 SOC 储量的增加效应越大,主要是因为 SOC 储量与凋落物和根系生物量密切相关^[34]。植被在恢复初期(<10 a)固碳能力较弱,而灌木在短期内能够迅速成林,相对于乔木和草本具有更高的植被生产力和较高的根系固氮能力维持生长发育,从而促进 SOC 的快速积累^[35]。草地在恢复初期由于群落的种间竞争作用加速土壤养分的争夺使其植被盖度下降,物种多样性减少,不利于 SOC 固存^[36]。即使如此,在恢复初期草地 SOC 储量依然增加的原因是根系较浅的植物往往寿命较短并且会不断生长出新的根系,较高的根系生产率通过细根周转诱导了有机质的输入^[37]。但相较于林地和灌木地,恢复初期草地 SOC 的增加效应较低。恢复时间越长,林、灌、草地植被群落变得更加复杂和稳定,地表覆盖面积增加,大量凋落物、根系和根系分泌物进入土壤^[38—39],较高数量的植被凋落物输入可以通过增加微生物坏死体的积累来增加 SOC 储量在土壤中的持续蓄积。植被恢复年限是影响林地 SOC 储量的主要驱动因子,由于凋落物和根的高碳量输入,在长期恢复中木本植物具有较高的 SOC 固存潜力^[40]。因此进行长期恢复时,林地和灌木地可能是提高黄土高原地区 SOC 储量的更好恢复选择。

本研究表明,植被覆盖率越高对 SOC 储量的增加效应越大,主要是因为植被覆盖率增加后,土壤湿度、温度及土壤理化性质等发生变化。植被覆盖率增加有利于保持土壤湿度,提高植物初级生产力,而植物初级生产力的提高会反过来促使植物产生更多的凋落物来增加 SOC 积累^[41]。林地每年产生大量凋落物,腐殖质层较厚,其分解过程中约有 67% 的碳输入土壤,因此在较高植被覆盖率下,林地的土壤固碳能力较强^[42]。同时,凋落物覆盖层可以避免表层 SOC 过度暴露于氧气中而抑制碳的分解和矿化过程^[43],减少降雨对土壤大团聚体的破坏,进而减缓团聚体内部 SOC 矿化速度,并通过降低地表温度减缓土壤的呼吸速率,从而增加 SOC 储量。此外,相关研究指出土壤颗粒中砂粒与植被覆盖率呈负相关,而粘粒与植被覆盖率呈正相关^[44],砂质土壤对 SOC 的截获能力明显低于粘质土壤。植被覆盖率是影响灌木地 SOC 储量的主要驱动因子,然而在低覆盖率下(≤60%)灌木地 SOC 储量无显著增加的原因可能是灌木种植在黄土高原地区含砂粒较多的土壤中^[45],而砂质土壤比粘质土壤积累碳更少^[46];此外,灌木可能没有足够的冠层结构来拦截降雨以保护土壤免受侵蚀,因此在种植灌木时应考虑初始植被覆盖率对 SOC 固存的影响。

3.3 土壤因素对 SOC 储量的影响解析

植被恢复对 SOC 储量的增加效应随土壤深度而变化。由于碳源输入存在表聚现象^[47],植被恢复更有利

于提高 0—20 cm 土层 SOC 储量。土壤表面覆盖着由糖类、酚类和半纤维素构成的凋落物层^[48],丰富了土壤微生物群落物种多样性^[49],从而促进营养物质在表层的周转;当养分不足时,土壤微生物会分泌养分矿化酶分解养分进而影响 SOC 的固存。Jiao 等^[50]研究发现植被恢复后土壤养分的可用性增加,木本植物表层(0—20 cm)土壤有机质、全氮、速效氮和速效钾等养分含量高于草地,增强了土壤的抗干扰能力,进而利于 SOC 的固存。林地和灌木地在 0—20 cm 土层 SOC 储量高于草地,更利于提高表层 SOC 储量,这与 Wang 等^[8]研究结果一致。但植被恢复对 40 cm 以下深度 SOC 储量的影响较小^[51],地下根系垂直分布格局变化^[52]和土壤水分^[36]的消耗也相应限制了 SOC 的固定。林地根系分布较深,为深层 SOC 提供了关键碳源^[53],同时土壤矿物随土壤深度加深而升高,而深层 SOC 更多以有机质和矿物质的复合体形式呈现^[54],土壤中富含的丛枝菌根产生的多种分解产物通过菌丝的连接被吸附到矿物表面后形成了稳定的有机物质^[55],从而显著提高了 0—60 cm 土层 SOC 储量。

土壤容重是土壤养分储存、水分输送和气体渗透的重要物理参数^[56],是影响 SOC 储量的重要指标。大量研究表明土壤容重与 SOC 呈负相关^[57–58],不同植被恢复类型 SOC 储量在低土壤容重($<1\text{ g/cm}^3$)条件下的增加效应最大,可能与 SOC 的物理保护机制有关。低土壤容重可以增加土壤孔隙度,有利于形成水稳性团聚体并提高其稳定性。植被恢复过程提高了 $>0.25\text{ mm}$ 粒级水稳性团聚体在黄土高原地区土壤增碳中的作用,土壤抗侵蚀能力增强^[37]。同时,低土壤容重环境为根际营造了良好的微生境,促使氨基酸等根系分泌物的产生,氨基酸通过抑制微生物的降解作用,改变了碳氮比和 pH,从而促进了 SOC 的积累^[59]。

3.4 多因素对 SOC 储量的交互作用的定量评估

在植被恢复过程中,SOC 储量变化的复杂性导致影响因素并不是单独起作用,而是多因素耦合驱动的结果。Xiang 等^[10]研究表明不同 MAP 条件下林地 SOC 固存效应存在差异,且随恢复年限的增加 SOC 储量明显增加,与本文交互作用的结果相符。气候和土壤性质是影响灌木生长的重要因素^[60–61],它们的交互作用可能会对灌木的生长和生理特性产生复杂的影响,例如,在温度和容重较高的环境中可能会抑制植被的生长,而在低温和低容重的条件下可能会为植被提供适合生长的环境,进而影响植物—土壤间的碳循环过程。正如本文结果显示在 $\text{MAT}<7^\circ\text{C}$ 和低土壤容重的条件下,灌木地 SOC 储量的增加效应更高(图 3),由于 SOC 储量的调节过程非常复杂,内在机理需要进一步分析。MAP 与植被覆盖率的交互作用促进了草地 SOC 储量的增加。首先,草地碳输入会随 MAP 增加相应地增加^[37],然而草地植被覆盖率较低,即使 MAP 较高,植被生长和分解代谢也可能会降低,从而限制碳的积累。另一方面,如果草地植被覆盖率较高,那么碳的输入和积累将更加频繁和充分。MAP ($\text{MAP}>550\text{ mm}$) 和植被覆盖率 ($>60\%$) 较高的情况下,它们的交互作用可能会促进 SOC 固存。

4 结论

与农田相比,退耕还林后植被恢复(林地、灌木地、草地)显著提高了黄土高原地区 SOC 储量,林地的固碳效应最好。植被恢复对 SOC 储量的增加效应随恢复年限、植被覆盖率的增加而增强,随土壤深度增加而减弱,且在低容重条件下有利于促进 SOC 储量的增加效应。林地恢复在 MAT 为 $7\text{—}10^\circ\text{C}$ 条件下更利于提高 SOC 储量的增加效应,在 $\text{MAT}<7^\circ\text{C}$ 条件下更易促进灌木地 SOC 储量的增加效应,且二者在 MAP 为 $450\text{—}550\text{ mm}$ 条件下利于 SOC 储量的增加。而草地 SOC 储量的增加效应在 $\text{MAT}<7^\circ\text{C}$ 、 $\text{MAP}>550\text{ mm}$ 条件下较为明显。植被恢复年限、植被覆盖率和 MAP 分别是影响林地、灌木地和草地固碳效应的主要驱动因子。同时,在黄土高原地区进行植被恢复时应综合考虑因子间交互作用或共同驱动作用对土壤固碳效应的影响。

参考文献 (References):

- [1] Jandl R, Rodeghiero M, Martinez C, Cotrufo M F, Bampa F, van Wesemael B, Harrison R B, Guerrini I A, Richter D D, Rustad L, Lorenz K, Chabbi A, Miglietta F. Current status, uncertainty and future needs in soil organic carbon monitoring. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 376–383.

- [2] Tifafi M, Guenet B, Hatté C. Large differences in global and regional total soil carbon stock estimates based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: intercomparison and evaluation based on field data from USA, England, Wales, and France. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(1): 42-56.
- [3] Jamal S, Javed A, Khanday Y. Evaluation of land degradation and so-cio-environmental issues: a case study of semi arid watershed in western Rajasthan. *Journal of Environmental Protection*, 2016, 7(8): 1132-1147.
- [4] Lal R. Accelerated Soil erosion as a source of atmospheric CO₂. *Soil and Tillage Research*, 2019, 188: 35-40.
- [5] Dong L B, Fan J W, Li J W, Zhang Y, Liu Y L, Wu J Z, Li A, Shangguan Z P, Deng L. Forests have a higher soil C sequestration benefit due to lower C mineralization efficiency: evidence from the central loess plateau case. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 339: 108144.
- [6] Fang X, Xue Z J, Li B C, An S S. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2012, 88(1): 6-13.
- [7] Fu X L, Shao M G, Wei X R, Horton R. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 31-35.
- [8] Wang H H, Yue C, Mao Q Q, Zhao J, Ciais P, Li W, Yu Q, Mu X M. Vegetation and species impacts on soil organic carbon sequestration following ecological restoration over the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 2020, 371: 114389.
- [9] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699.
- [10] Xiang Y Z, Liu Y, Yue X J, Yao B, Zhang L Y, He J, Luo Y, Xu X Y, Zong J Z. Factors controlling soil organic carbon and total nitrogen stocks following afforestation with *Robinia pseudoacacia* on cropland across China. *Forest Ecology and Management*, 2021, 494: 119274.
- [11] 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕. 水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析. *环境科学*, 2023, 44(3): 1542-1552.
- [12] Deng L, Kim D G, Li M Y, Huang C B, Liu Q Y, Cheng M, Shangguan Z P, Peng C H. Land-use changes driven by ‘Grain for Green’ program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China. *Global and Planetary Change*, 2019, 177: 101-115.
- [13] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. Changes in soil carbon and nitrogen following land abandonment of farmland on the Loess Plateau, China. *PLoS One*, 2013, 8(8): e71923.
- [14] Potter K N, Torbert H A, Johnson H B, Tischler C R. Carbon storage after long-term grass establishment on degraded soils. *Soil Science*, 1999, 164(10): 718-725.
- [15] 杨阳, 刘良旭, 张萍萍, 吴凡, 周媛媛, 宋怡, 王云强, 安韶山. 黄土高原土壤水分-有机碳-微生物耦合作用研究进展. *生态学报*, 2023, 43(4): 1714-1725.
- [16] Han X Y, Gao G Y, Li Z S, Chang R Y, Jiao L, Fu B J. Effects of plantation age and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen changes following afforestation in the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(18): 2298-2310.
- [17] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [18] Li D J, Niu S L, Luo Y Q. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2012, 195(1): 172-181.
- [19] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [20] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis. *Ecology*, 2006, 87(1): 53-63.
- [21] Xiao H B, Shi Z H, Li Z W, Wang L, Chen J, Wang J. Responses of soil respiration and its temperature sensitivity to nitrogen addition: a meta-analysis in China. *Applied Soil Ecology*, 2020, 150: 103484.
- [22] 丁文斌, 王飞. 植被建设对黄土高原土壤水分的影响. *生态学报*, 2022, 42(13): 5531-5542.
- [23] Wang L L, Li Q, Coulter J A, Xie J H, Luo Z, Zhang R Z, Deng X P, Li L L. Winter wheat yield and water use efficiency response to organic fertilization in Northern China: a meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 2020, 229: 105934.
- [24] Chen H H, Li X C, Hu F, Shi W. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2956-2964.
- [25] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [26] Triberti L, Nastri A, Giordani G, Comellini F, Baldoni G, Toderi G. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland? *European Journal of Agronomy*, 2008, 29(1): 13-20.
- [27] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846.
- [28] Tan Q Q, Han W X, Li X R, Wang G A. Clarifying the response of soil organic carbon storage to increasing temperature through minimizing the precipitation effect. *Geoderma*, 2020, 374: 114398.
- [29] Birgander J, Olsson P A, Rousk J. The responses of microbial temperature relationships to seasonal change and winter warming in a temperate grassland. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3357-3367.
- [30] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4): 184-194.
- [31] 林枫, 王丽芳, 文琦. 黄土高原土壤有机碳固存对植被恢复的动态响应及其碳汇价值. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 53-58.
- [32] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, Lü Y H, Liu Y, Lü N, Wang S. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2016, 137: 1-11.

- [33] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素. 生态学报, 2021, 41(17): 6786-6799.
- [34] Zhang D, Cai X W, Diao L F, Wang Y Q, Wang J S, An S Q, Cheng X L, Yang W. Changes in soil organic carbon and nitrogen pool sizes, dynamics, and biochemical stability during ~160 years natural vegetation restoration on the Loess Plateau, China. CATENA, 2022, 211:106014.
- [35] 史利江, 高杉, 姚晓军, 张晓龙, 李文刚, 高峰. 晋西北黄土丘陵区不同植被恢复下的土壤碳氮累积特征. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1787-1796.
- [36] 冯棋, 杨磊, 王晶, 石学圆, 汪亚峰. 黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应. 生态学报, 2019, 39(18): 6598-6609.
- [37] Deng L, Kim D G, Peng C H, Shangguan Z P. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China. Land Degradation & Development, 2018, 29(11): 3974-3984.
- [38] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 61: 1-13.
- [39] Xu H W, Qu Q, Lu B B, Zhang Y, Liu G B, Xue S. Variation in soil organic carbon stability and driving factors after vegetation restoration in different vegetation zones on the Loess Plateau, China. Soil and Tillage Research, 2020, 204: 104727.
- [40] Baah-Acheamfour M, Carlyle C N, Bork E W, Chang S X. Trees increase soil carbon and its stability in three agroforestry systems in central Alberta, Canada. Forest Ecology and Management, 2014, 328: 131-139.
- [41] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [42] Rubino M, Dungait J A J, Evershed R P, Bertolini T, De Angelis P, D'Onofrio A, Lagomarsino A, Lubritto C, Merola A, Terrasi F, Cotrufo M F. Carbon input belowground is the major C flux contributing to leaf litter mass loss: Evidences from a ^{13}C labelled-leaf litter experiment. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(7): 1009-1016.
- [43] Mitra S, Wassmann R, Vlek P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. Current Science, 2005, 88(1): 25-35.
- [44] 申哲, 张认连, 龙怀玉, 王转, 朱国龙, 石乾雄, 喻科凡, 徐爱国. 基于 3 种空间预测方法的黄土区土壤颗粒组成空间分布研究——以宁夏海原县为例. 中国农业科学, 2020, 53(18): 3716-3728.
- [45] 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.
- [46] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.
- [47] Bai J H, Zhang G L, Zhao Q Q, Lu Q Q, Jia J, Cui B S, Liu X H. Depth-distribution patterns and control of soil organic carbon in coastal salt marshes with different plant covers. Scientific Reports, 2016, 6: 34835.
- [48] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. Oikos, 1997, 79(3): 439.
- [49] 魏圆云, 崔丽娟, 张曼胤, 潘旭. 土壤有机碳矿化激发效应的微生物机制研究进展. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1202-1211.
- [50] Jiao F, Wen Z M, An S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China. CATENA, 2011, 86(2): 110-116.
- [51] 从怀军, 成毅, 安韶山, 李第红. 黄土丘陵区不同植被恢复措施对土壤养分和微生物量 C、N、P 的影响. 水土保持学报, 2010, 24(4): 217-221.
- [52] 杨昊天, 王增如, 贾荣亮. 腾格里沙漠东南缘荒漠草地不同群落类型土壤有机碳分布及储量特征. 植物生态学报, 2018, 42(3): 288-296.
- [53] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. Plant and Soil, 2005, 269(1/2): 341-356.
- [54] Mayes M A, Heal K R, Brandt C C, Phillips J R, Jardine P M. Relation between soil order and sorption of dissolved organic carbon in temperate subsoils. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3): 1027-1037.
- [55] Raczka N C, Piñeiro J, Tfaily M M, Chu R K, Lipton M S, Pasa-Tolic L, Morrissey E, Brzostek E. Interactions between microbial diversity and substrate chemistry determine the fate of carbon in soil. Scientific Reports, 2021, 11: 19320.
- [56] Wang W J, He H S, Zu Y G, Guan Y, Liu Z G, Zhang Z H, Xu H N, Yu X Y. Addition of HPMA affects seed germination, plant growth and properties of heavy saline-alkali soil in northeastern China: comparison with other agents and determination of the mechanism. Plant and Soil, 2011, 339(1): 177-191.
- [57] Gu C J, Mu X M, Gao P, Zhao G J, Sun W Y, Tatarko J, Tan X J. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2): 716-728.
- [58] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [59] 孙悦, 徐兴良, KUZYSKOV Yakov. 根际激发效应的发生机制及其生态重要性. 植物生态学报, 2014, 38(1): 62-75.
- [60] Tang Z Y, Xu W T, Zhou G Y, Bai Y F, Li J X, Tang X L, Chen D M, Liu Q, Ma W H, Xiong G M, He H L, He N P, Guo Y P, Gio Q A, Zhu J L, Han W X, Hu H F, Fang J Y, Xie Z Q. Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4033-4038.
- [61] Li X Y, Hu X, Zhang Z H, Peng H Y, Zhang S Y, Li G Y, Li L, Ma Y J. Shrub hydropedology: preferential water availability to deep soil layer. Vadose Zone Journal, 2013, 12(4): 1-12.