

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

林 枫¹, 王丽芳², 文 琦³

(1. 农业农村局, 山东 平邑 273300; 2. 白彦镇农村经济管理站, 山东 平邑 273300; 3. 宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021)

摘 要: 量化黄土高原区域尺度土壤有机碳固存对生态修复的动态响应及其碳汇价值转化, 为区域生态修复、碳汇交易、生态补偿等提供理论依据。以黄土高原地区有机碳变化相关文献为基础, 采用文献整合分析方法量化了有机碳固存对黄土高原不同植被类型、树种、恢复阶段、气候、坡度、坡向的动态响应, 并采用经济价值理论货币化碳汇价值。结果表明: 与农田相比, 黄土高原退耕还林工程增加了 61.60% 的碳固存, 退耕还乔、灌、草分别增加 88.20%, 55.15% 和 43.18%。其中, 常绿乔木优于落叶乔木, 沙棘优于柠条, 天然草地优于人工草地。3 种植被类型(乔、灌、草)有机碳在不同恢复阶段的变化范围分别为 38.87%~154.80%, 21.59%~98.07%, 32.80%~85.65%, 恢复后期固碳最佳。气候条件、坡度、坡向对土壤固碳具有显著影响, 在降雨量较高(>550 mm)的地区种植乔、灌, 而在降雨量低(<450 mm)的地区以草地恢复为主。且阴坡、陡坡植被恢复能够有效增加有机碳含量。综合当前固碳价值以及未来固碳价值潜力, 黄土高原 0—20 cm, 0—100 cm 土壤总固碳价值分别为 3 601.5 万元/年, 9 089.5 万元/年。退耕还林深刻改变了黄土高原的土壤碳固存, 在植被管理过程中, 应充分重视植被类型、树种、恢复阶段、气候及立地因子的影响, 并在碳交易及生态补偿中应将土壤固碳效益考虑在内。

关键词: 土壤有机碳; 生态修复; 整合分析; 碳汇价值; 黄土高原; 生态补偿

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)03-0053-06

Dynamic Responses of Sequestration of Soil Organic Carbon to Vegetation Restoration and the Values of Carbon Sink in the Loess Plateau

LIN Feng¹, WANG Lifang², WEN Qi³

(1. Agriculture and Rural Bureau, Pingyi County, Shandong 273300, China; 2. Baiyan Rural Economic Management Station, Pingyi County, Shandong 273300, China; 3. College of Resources and Environmental Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Quantifying the responses of soil organic carbon (SOC) sequestration in Loess Plateau to vegetation restoration and the carbon sink value conversion can provide a theoretical basis for ‘Grain for Green’ project, carbon sink trade, and ecological compensation. Based on the literatures related to the changes of SOC in the Loess Plateau, the synthesis analysis was used to analyze the dynamic response of SOC sequestration to different vegetation types, tree species, restoration stages, slopes, and aspects, and the economic value theory was used to monetize the carbon sink value. Compared with cropland, ‘Grain for Green’ increased SOC sequestration by 61.60%, and SOC sequestration resulting from conversions of croplands to forest, shrub and grassland increased by 88.20%, 55.15% and 43.18%, respectively, among which SOC sequestration of evergreen trees was better than that of the deciduous trees, SOC sequestration of sea buckthorn was better than Caragana, and SOC sequestration of natural grassland was better than artificial grassland. The SOC sequestration of the three vegetation types (forest, shrub, and grassland) varied in different restoration stages from 38.87%~154.80%, 21.59%~98.07%, and 32.80%~85.65%, respectively, and SOC sequestration was the best in the later restoration stage. Climatic condition, slope, and aspect had the significant effects on SOC sequestration. Planting trees and shrubs should be carried out in areas with high rainfall, and grassland restoration should be adopted in areas with low rainfall. Moreover, vegetation restoration on shady slopes and steep slopes can effectively increase SOC. Based on the current values of SOC sequestration and

收稿日期: 2020-07-03

修回日期: 2020-08-06

资助项目: 国家自然科学基金“陕甘宁蒙能源富集区产业同构及跨区域协同发展研究”(341661042)

第一作者: 林枫(1971—), 男, 山东临沂人, 高级农业经济师, 主要从事农业经济管理研究。E-mail: linfeng20080606@163.com

通信作者: 文琦(1979—), 男, 宁夏彭阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为乡村发展与资源环境评价。E-mail: wenq98@163.com

the potential of future SOC sequestration, the total SOC sequestration values of 0—20 cm and 0—100 cm soil layers in the Loess Plateau are 3.6×10^6 yuan and 9.09×10^6 yuan per year, respectively. ‘Green for Grain’ had profoundly changed the SOC sequestration in the Loess Plateau. In the process of vegetation management, more attention should be paid to the effects of vegetation types, tree species, restoration stages, climate, and topography factors. In addition, SOC sequestration benefits should be taken into account in carbon trade and ecological compensation.

Keywords: soil organic carbon; ecological restoration; synthesis analysis; carbon sink value; Loess Plateau; ecological compensation

土壤侵蚀是导致土壤有机碳流失进而引起土地退化的重要原因^[1]。黄土高原是世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一,严重的土壤侵蚀导致该区土壤质量和生产力低下^[2]。此外,不合理的土地利用加剧了该区的土地退化趋势。为了遏制这种现象,我国政府在 1999 年在黄土高原地区全面实施了退耕还林(草)工程^[3]。尽管工程实施的最初目标是为了防治土壤侵蚀,但是经过二十年的治理,已对该区土壤碳库产生了深刻的影响^[4-5]。

大量研究已经针对退耕还林草后土壤有机碳如何响应进行了广泛而深入的研究,然而,退耕还林后,有机碳固存效应仍存在争议。例如,Zhang 等^[6]研究表明退耕还林对中国碳汇贡献巨大,不仅改变了区域养分循环,也显著影响了其他生态过程,而 Tuot 等^[7]报道了植被恢复并不总是能够增加碳汇,这受到了气候与植被类型的严格控制。此外,Zhang 等^[6]研究发现,黄土高原退耕还林后表层土壤有机碳固存速率为 0.37 Mg/hm^2 ,而 Chang 等^[5]表明该区表层土壤固碳速率为 0.173 Mg/hm^2 。与二者不同,Feng 等^[8]计算的该结果为 $0.085 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。这个数值远低于前两位学者所计算的结果。这意味着当前黄土高原碳固存速率的估算还存在较大不确定性。受气候条件、恢复年限、地形、树种的影响,土壤有机碳对生态修复的响应极为复杂,并呈现多样性结果^[5,9]。因此,基于更大样本量的碳固存速率评估显得尤为必要,这对进一步分析诸多因子的影响效应提供了可靠基础。

文献整合分析是解决这一问题行之有效的方法^[10]。Deng 等^[11]利用该方法探讨了全国尺度上有机碳对禁牧的动态响应;而 Su 等^[12]利用该方法量化了黄土高原水分对植被恢复的响应。然而,仅有少数研究采用该方法系统分析了黄土高原土壤有机碳的变化^[10]。在量化有机碳固存对植被恢复响应的基础上,评估其经济价值转化的潜力,这有利于区域的碳交易评估。当前,关注碳汇价值的研究多采用参数衍生等办法获取数据,并采用相关模型进行模拟^[13-14]。但是这种方法缺少详实可靠的本地化参数。因此,基于文献整合获取最为可靠详实

的本地参数,并借助相关理论,在量化土壤有机碳生态过程的基础上,进一步获取其经济转化价值,不仅为两种学科的交叉发展提供了可行路径,也为区域生态修复提供了借鉴。基于此,本研究整合近 20 a 来黄土高原土壤有机碳相关研究,全面探讨不同土地利用、树种、坡度、坡向、恢复阶段、气候带等对土壤有机碳的影响,并在此基础上分析该区土壤碳汇价值,以期为区域碳汇、生态补偿提供重要科学依据。

1 材料与方法

本研究中所用数据均来自发表于中国知网和 Web of Science 数据库中 1999—2020 年的文献。在进行文献检索时,以“黄土”、“有机碳”、“植被恢复”等为关键词,共检索文献 1 254 篇,并进一步阅读、分析,整理得到 99 篇可用文献。在整理文献时,遵循以下标准:(1) 土壤有机碳储量可以直接或间接由土壤有机质、土壤有机碳以及容重计算得到;(2) 所有的试验必须含有对照组和控制组;(3) 同一组数据(对照和控制)必须具有统一的土壤类型、地形等基本一致的背景;(4) 恢复年限可直接或间接得出。基于以上标准,本研究所用数据库包含来自于 5 个省、自治区的 935 个观测样本(图 1)。原始数据由图或表中获取,其中图片数字化所用的软件为 Getdata Graph Digitizer。每篇文献记录如下信息:(1) 文献来源;(2) 气候条件(年均温、年均降雨量);(3) 植被类型(人工乔木、人工灌木、自然草地);(4) 树种(常绿、落叶);(5) 恢复年限;(6) 土壤容重;(7) 0—20 cm 有机碳或有机质含量。根据黄土高原的实际生态背景与相关研究^[3],本研究将气候带分为 $<450 \text{ mm}$, $450 \sim 550 \text{ mm}$, $>550 \text{ mm}$ 3 个降雨带。值得一提的是,本研究所有样本的恢复年限位于 $>0 \text{ a}$ 和 $<60 \text{ a}$ 之间,因此,本研究中的固碳效应截止年限为 $<60 \text{ a}$ 。更为长期的固碳效应还需要更多的数据作为支撑。本研究样点的空间分布见图 1。

土壤碳储量单位全部统一转换为“ Mg/hm^2 ”,土壤有机质与土壤有机碳的转换系数采用 0.58。如果文献中并未报道土壤容重,本研究采用邓蕾^[10]、Wu^[15]等报道过的方法对容重进行计算:

$$BD=-0.1229\ln(\text{SOC})+1.2901 \quad (\text{有机碳含量}<6\%)$$

(1)

$$BD=1.377e^{-0.0413\text{SOC}} \quad (\text{有机碳含量}>6\%)$$

(2)

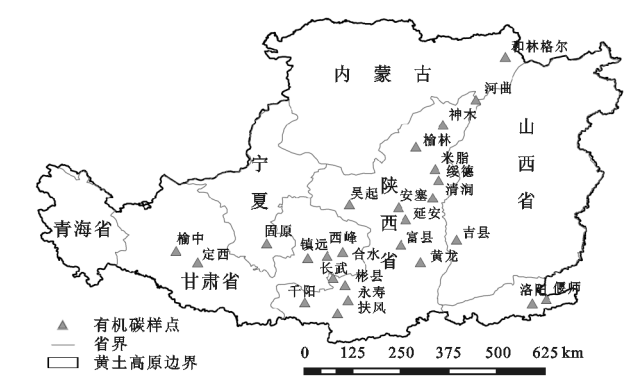


图 1 土壤有机碳样点空间分布

土壤有机碳储量使用下式进行计算:

$$\text{SOC}_{\text{stock}}=\text{SOC}\cdot\text{BD}\cdot D/10 \quad (3)$$

式中: $\text{SOC}_{\text{stock}}$ 为有机碳储量(Mg/hm^2); SOC 为土壤有机碳含量(g/kg); BD 为土壤容重(g/cm^3); D 为土层厚度(cm)。

本研究采用 meta 分析来量化退耕还林后土壤有机碳的变化程度。由于标准的 meta 分析需要同时具备均值、标准差、样本量等信息,但是大部分的研究并未报道这些变量。因此,为了扩大样本量,本研究采用非标准 meta 分析的方法进行数据计算。非标准 meta 分析在生态学中已有广泛应用。本研究计算了响应比(响应比= x_e/x_c-1),其中 x_e 指植被恢复后的有机碳储量; x_c 指的是退耕前农田有机碳储量。同时采用 Luo 等^[16]建立的方法计算 95% 置信区间。如果响应比的置信区间包含 0 在内,那么本研究认为有机碳增加不显著,如果置信区间不包含 0,则认为有机碳显著增加($p<0.05$)。

在本研究中,参照国家林业局《退耕还林工程生态效益监测国家报告》中的方法,土壤有机碳固存价值量评估由物质质量转价值量时,所采用的价格参数并非实时价格参数,因此需要使用贴现率将以前的价格参数换算为当前价格参数以计算土壤固碳效益价值量的体现。本评估中所使用的贴现率指将未来现金收益折合成当前收益的比率。贴现率是一种存贷款均衡利率,利率的大小,主要根据金融市场利率来决定,其计算公式为:

$$t=(D_r+L_r)/2 \quad (4)$$

式中: t 是指存贷款均衡利率(%); D_r 是指银行的平均存款利率(%); L_r 是指银行的平均贷款利率(%)。

贴现率利用存贷款均衡利率,将非当年价格参数逐年贴现至当前价格参数。贴现率的计算公式为:

$$d=(1+t_{n+1})(1+t_{n+2})\cdots(1+t_m) \quad (5)$$

式中: d 为贴现率; t 为存贷款均衡利率; n 为价格参

数可获得年份; m 为当前年份。

土壤碳固存价值量的计算采用以下公式:

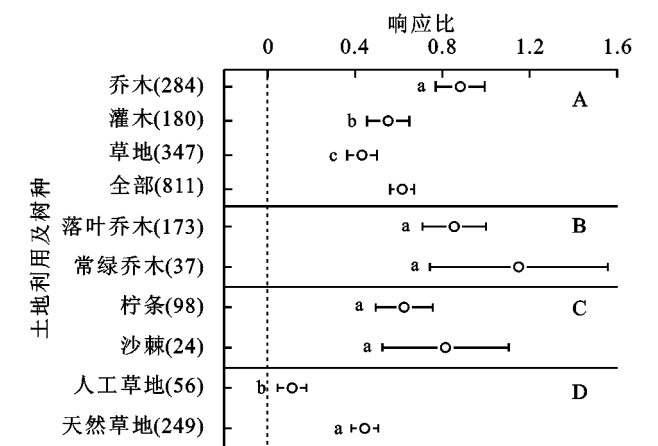
$$U_{\text{土壤碳}}=AC_{\text{碳}}(1.63B_{\text{年}})Fd \quad (6)$$

式中: $U_{\text{土壤碳}}$ 为土壤碳总固碳价值(元/a); $B_{\text{年}}$ 为单位面积土壤年固碳量 [$\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$]; $C_{\text{碳}}$ 为固碳价格(元/t); A 为退耕面积(hm^2); F 为生态功能修正系数; d 为贴现率。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳对不同植被类型的响应

退耕还乔、灌、草显著提高了土壤有机碳固存,与农田相比,分别提高 88.20%,55.15% 和 43.18%,整体来看,黄土高原植被恢复平均增加了 61.60% 的碳固存(图 2A)。本研究结果显示,不同乔木树种(落叶乔木、常绿乔木,图 2B)和灌木树种(柠条、沙棘,图 2C)在增加有机碳固存方面没有显著差异。相对来讲,常绿乔木土壤固碳(114.86%)要优于落叶乔木(85.39%),沙棘土壤固碳(81.43%)优于柠条(62.50%)。不同类型草地(自然恢复草地、人工草地)土壤碳固存变化存在显著差异,天然草地碳固存量约为人工草地的 4 倍(图 2D)。

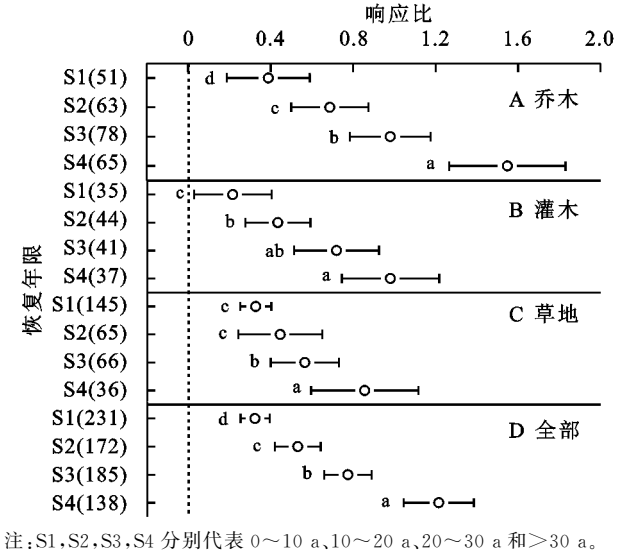


注:图中圆点为平均响应值,误差棒为 95% 置信区间;左侧括号内数字为样本量;图中小写字母代表单幅图表内不同土地利用类型之间的差异性,字母不同代表具有显著性差异, $p<0.05$;(A),(B),(C),(D) 分别代表不同土地利用、乔木树种、灌木树种、草地类型,下同。

图 2 土壤有机碳固存对不同植被及树种的响应特征

2.2 不同恢复阶段土壤有机碳对植被类型的响应

随着植被恢复时间的增加,不同植被类型下土壤有机碳固存均显著增加,各植被类型的固碳效应在恢复后期得到显著提升,乔木、灌木、草地土壤有机碳增加幅度的变化范围分别为 38.87%~154.80%,21.59%~98.07%,32.80%~85.65%。显然,退耕还乔后土壤具有更高的固碳速率。值得注意的是,在恢复初期($<10\text{ a}$),并没有出现有机碳的显著降低。不同恢复阶段($<10\text{ a}$, $10\sim20\text{ a}$, $20\sim30\text{ a}$ 和 $>30\text{ a}$)的土壤有机碳固存增加量分别为 32.44%,53.16%,77.45% 和 121.55%(图 3)。



注: S1, S2, S3, S4 分别代表 0~10 a、10~20 a、20~30 a 和 >30 a。

图 3 土壤有机碳固存对不同恢复阶段的响应特征

2.3 土壤有机碳固存对气候因子与地形因子的响应

不同植被类型在不同降雨带下的土壤碳固存存在显著差异(图 4A)。例如, 乔木林地与灌木林地的固碳量分别表现为 450~550 mm 降雨带最高, >550 mm 次之, <450 mm 降雨最低, 而草地却表现为 <450 mm 降雨带固碳量最高, 而随着降雨量的增加, 固碳量逐渐减少。

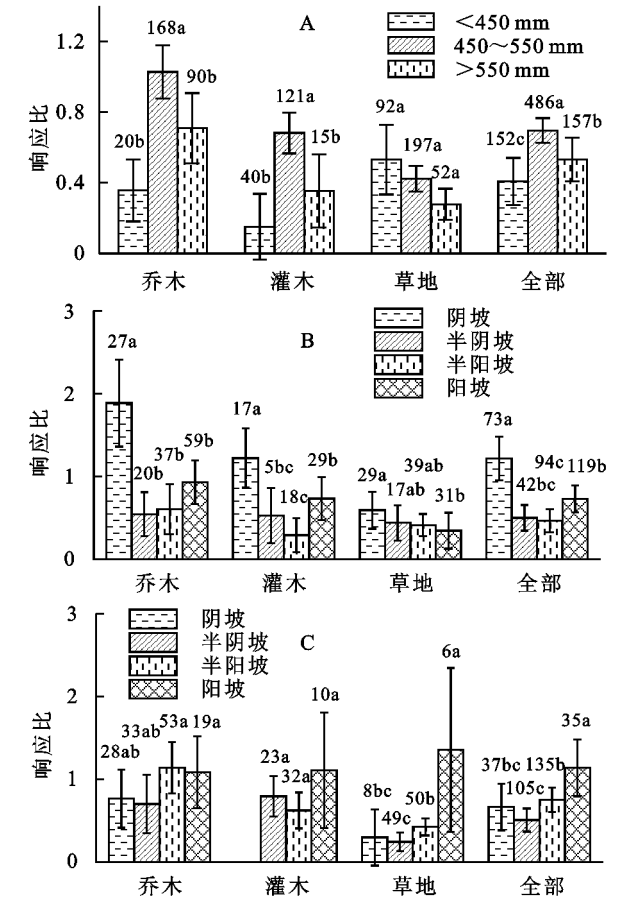
坡向和坡度显著影响了土壤有机碳固存(图 4B, 图 4C)。3 种植被在阴坡的固碳量均最高。阴坡植被恢复能够产生更多的碳收益, 且以乔、灌为最优。从不同坡度来看, 整体呈现坡度越大, 有机碳增加的幅度越高。其中, >30° 的坡有机碳增加最为明显。这可能与初始碳含量有关。

2.4 区域尺度土壤有机碳固存速率及其货币转化潜力

本研究表明, 黄土高原土壤有机碳固存平均速率为 0.21 Mg/(hm²·a)(图 5), 基于本研究结果以及可获取的面积数据, 截至 2008 年, 黄土高原已退耕 483 万 hm², 按照本研究所计算的固碳速率, 当前碳汇效益为 2 535.75 万元/年。然而, 如果根据 Deng 等人^[4]建立的 0—20 cm 与 0—100 cm 碳固存的关系式($y=2.46x+0.01, R^2=0.95$), 黄土高原 0—100 cm 土壤碳固存速率约为 0.53 Mg/(hm²·a), 那么其碳汇效益将为 6 399.75 万元/年。

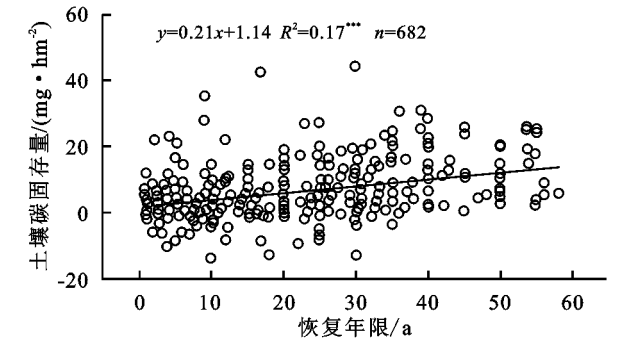
Chang 等^[5]根据黄土高原地区 2000 年的 TM 和 ETM 的遥感影像, 分辨率为 200 m, 解译出黄土高原大约有 2.03×10⁶ hm² 坡度大于 15° 的坡耕地可以退耕为林地和草地, 所以我们就用该数据作为黄土高原地区退耕还林(草)工程实施的理想面积, 然后结合退耕还林(草)后的平均固碳速率对黄土高原退耕还林(草)工程覆盖区域的年平均固碳潜力进行评估, 结果表明, 黄土高原地区整个退耕还林(草)工程的 0—20 cm 固碳潜力为 0.43Tg C/a, 0—100 cm 固碳潜力为 1.08 Tg C/hm²。这

意味着黄土高原的 0—20 cm、0—100 cm 土壤固碳价值潜力为 1 065.75 万元/年、2 689.75 万元/年。若全部坡耕地完成退耕还林, 该区每年 0—20 cm 和 0—100 cm 的碳汇效益将分别为 3 601.5 万元/年、9 089.5 万元/年。



注: 图中小写字母代表同一植被类型下不同降雨带之间的差异, 不同字母代表具有显著性差异, $p<0.05$ 。

图 4 土壤碳固存对不同降雨带、坡向以及坡度的响应特征



注: R^2 代表模型拟合度; *** 代表 $p<0.001$; n 代表样本量。

图 5 黄土高原土壤固碳平均速率

3 讨论及结论

3.1 植被类型对土壤碳固存的影响

本研究表明, 退耕还林显著提升了土壤有机碳固存量(图 2)。这与以前的相关研究^[10, 17-18]一致。将农地转变为多年生植被后, 有效的防控了土壤侵蚀, 并改善了土壤物理(土壤孔隙、水稳性团聚体、土壤入

渗等)、化学(全氮等)以及生物学(微生物量碳)质量^[19-21]。此外,不同植被类型固碳效益存在差异(图2)。一般来说,乔木能够比灌木和草地产生更多的枯落物归还量^[21],且许明祥^[22]报道了退耕还乔后土壤质量提升最大。与灌木相比,草地根系较浅,因此,其生物量和枯落物归还量相对较低。尽管如此,乔灌草均显著提升了有机碳固存量。本研究表明,树种对土壤有机碳并没有显著影响(图2A,B,C)。落叶乔木在增加枯落物归还量等方面明显优于常绿乔木,这在诸多研究中均有报道^[23],然而,与落叶乔木相比,常绿乔木能够形成长期有效的遮阴,降低了林下温度,减慢了有机碳的矿化速率^[24]。有研究显示,常绿树种具有更为发达的细根系统,且与落叶林相比,常绿树种具有将更多光合产物固定到根部的能力,这可以有效增加土壤有机碳含量^[25]。然而,黄土高原是干旱半干旱地区,受水分等条件限制,常绿树种与落叶树种的生理特性可能没有其他区域显著,导致二者在增加有机碳方面没有显著差异。此外,我们的研究表明,自然恢复草地在土壤固碳方面具有更大的优势(图2D)。这可能与人工草地刈割以及自然衰退有关,且人工草地的耗水量显著高于天然草地,其可持续性明显低于天然草地。综上,在黄土高原地区,在植被承载力范围内,优先配置适宜树种或草种将有利于优化土壤固碳格局,增加固碳潜力。

3.2 土壤有机碳固存影响因素

3.2.1 恢复年限 多项研究报道了在恢复初期,由于没有了施肥等管理措施,加之植被没有形成有效的侵蚀防控机制,在恢复初期往往有机碳为负增长^[10]。这与本研究不同。这可能是与选取的不同时间段有关^[4]。随着植被恢复年限的增加,枯落物及植被根系生物量的输入量也呈增加趋势^[10]。诸多研究表明,土壤质量(土壤物理、化学、生物质量)均随恢复年限的增加显著提升^[22]。这意味着恢复年限是土壤碳固存评估中应该考虑的重要因素之一。然而,值得一提的是,本研究将恢复年限分为0~10 a、10~20 a、20~30 a和>30 a,在更长久的恢复过程中(>30 a),有机碳固存是否持续增加值得商榷。可以预见的是,受干旱半干旱区域人工造林的影响,土壤水分的可持续性成为目前关注的焦点。如何识别水分与固碳的转折关系将是一个重要议题。水分与植被生长、根系生物量增加显著相关,水分的降低势必会阻碍植被的发育。

3.2.2 气候因子 我们的研究表明,不同植被类型在不同降雨带下的土壤碳固存存在显著差异(图4A)。例如,乔木与灌木的固碳量分别表现为450~550 mm降雨带最高,>550 mm次之,<450 mm降雨最低,而草地却表现为<450 mm降雨带固碳量最高,而随着降雨量的增加,固碳量逐渐减少。这与有

机碳的输入与输出有关。例如,在<450 mm降雨带,土壤水分不足以支撑乔灌的正常生长,因此,更多的碳和养分均用于生物量的增加,有研究报道,在水分不足的情况下,生态系统碳的增加多集中在生物量中^[4,26];而在>550 mm降雨带,较为充沛的降雨量加速了有机碳的矿化,导致其存留量相对低于450~550 mm降雨带。草地的枯落物积累量相对较低,然而,在降雨量较低的地区,其根系发达且多集中在地表,而在降雨较高的地区,较低的碳输入以及较高的分解量导致草地的固碳量随降雨量的增加而降低^[7]。基于此,我们建议,气候因素是植被恢复必须考虑的重要因素,且在降雨量较高的地区种植乔、灌植被,而在降雨量低的地区以草地恢复为主。

3.2.3 地形因子 坡向和坡度显著影响了土壤有机碳固存(图4B,图4C)。总体来看,3种植被在阴坡的固碳量均最高。这与阴坡温度相对较低,而湿度相对较高有关。在黄土高原地区,由于较好的水分条件,阴坡植物的郁闭度和长势均优于阳坡,因此能够带来更多的碳输入。这表明,阴坡植被恢复能够产生更多的碳收益,且以乔灌为最高。从不同坡度来看,整体呈现坡度越大,有机碳增加的幅度越高。其中,>30°的坡有机碳增加最为明显。这可能与初始碳含量有关。退耕前,坡度越大,遭受的侵蚀越严重,土壤质量越低,Vesteral等^[27]研究表明,初始养分含量越低,其增加的潜力越大,这也得到了诸多学者的支持^[3,6]。这表明,陡坡植被恢复能够有效增加有机碳含量。

3.2.4 不确定性分析 与其他同类型的研究相比,本研究不仅大量增加了样本量,而且全面分析了不同植被类型、树种、恢复年限、气候因子(降雨)、地形因子(坡度、坡向)对土壤碳固存的影响。然而,本研究仍有不确定性问题需要指出。(1)受文章发表量及研究区的差异影响,样本并非均匀分布。这可能导致不同区域碳固存的权重存在差异,然而,本研究并未对这些样本的权重进行分析;(2)本研究在分析其变化速率时,假定碳固存为线性变化,然而,碳固存的变化并非都是线性变化,而是以非线性方式进行变化;(3)本研究所涉及的有机碳固存恢复年限最大为60 a,缺少更为长期的观测;(4)除有机碳外,影响碳固存的其他土壤因子并未获取,例如pH、土壤质地等。因此,综合以上不确定性因素,未来与大尺度土壤碳固存有关的研究应尽可能充分考虑以上因素,从而更为精准地估算退耕还林过程中土壤碳的动态变化。

3.3 本研究对区域生态恢复及碳交易的启示

本研究表明,黄土高原退耕还林草工程显著增加了土壤碳固存,平均增幅61.61%。而在土壤固碳过程中,植被类型(乔、灌、草)、乔木树种(常绿乔木、落叶乔木)、灌木树种(沙棘、柠条)以及草地类型(人工草地、天然草

地)扮演了重要角色,显著影响了土壤固碳。在不同的恢复阶段,土壤固碳量不同,总体来看,恢复后期固碳效果最佳。此外,不论区域尺度还是坡面尺度,都应重视气候条件、坡向、坡度对土壤固碳的影响。整体来看,在降雨量较高的地区种植乔、灌,而在降雨量低的地区以草地恢复为主。且阴坡、陡坡植被恢复能够有效增加有机碳含量。结合生态学和经济学理论,本研究得出黄土高原 0—20 cm, 0—100 cm 总固碳价值分别为 3 601.5 万元/年, 9 089.5 万元/年。因此,在碳汇交易过程中,黄土高原的土壤固碳效益应该考虑进去,且其长期效益值得更加深入的研究。

参考文献:

- [1] 夏彬,朱世硕,郝旺林,等.黄土丘陵区土壤有机碳含量对侵蚀坡面表层土壤含水量时空变化的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):175-181.
- [2] 李强,许明祥,赵允格,等.黄土高原坡耕地沟蚀土壤质量评价[J].自然资源学报,2012,27(6):1001-1012.
- [3] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. 'Grain for Green' driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China[J]. Scientific Reports, 2014,4:7039.
- [4] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis[J]. Global Change Biology, 2014,20(11):3544-3556.
- [5] Chang R Y, Fu B J, Liu G H, et al. Soil carbon sequestration potential for 'Grain for Green' Project in Loess Plateau, China[J]. Environmental Management, 2011, 48(6):1158-1172.
- [6] Zhang K R, Dang H S, Tan S D, et al. Change in Soil Organic Carbon Following the 'Grain-for-Green' Programme in China [J]. Land Degradation & Development, 2010,21(1):13-23.
- [7] Tuo D F, Gao G Y, Chang R Y, et al. Effects of revegetation and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen variations in deep profiles on the Loess Plateau of China[J]. Science of the Total Environment, 2018,626:399-411.
- [8] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. Scientific Reports, 2013,3:2846.
- [9] Shi S W, Zhang W, Zhang P, et al. A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soils[J]. Forest Ecology and Management, 2013,296:53-63.
- [10] 邓蕾.黄土高原生态系统碳固持对植被恢复的响应机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [11] Deng L, Shangguan Z P, Wu G L, et al. Effects of grazing exclusion on carbon sequestration in China's grassland[J]. Earth-Science Reviews, 2017,173:84-95.
- [12] Su B Q, Shangguan Z P. Decline in soil moisture due to vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2019,30(3):290-299.
- [13] 丁华,程琴.运用实物期权法对林业碳汇项目的价值评估[J].东北林业大学学报,2020,48(5):139-143,147.
- [14] 蒋卓秘,曾维忠,杨帆,等.森林碳汇社区参与功能及其影响因素分析[J].生态经济,2020,36(4):35-38,49.
- [15] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China [J]. Global Change Biology, 2003,9(3):305-315.
- [16] Luo Y Q, Field C B, Jackson R B. Does nitrogen constrain carbon cycling, or does carbon input stimulate nitrogen cycling[J]. Ecology, 2006,87(1):3-4.
- [17] 梁彩群,刘国彬,王国梁,等.黄土高原人工刺槐林土壤团聚体中不同活性有机碳从南到北的变化特征[J].环境科学学报,2020,40(3):1095-1102.
- [18] 董生健,何小谦.黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤系统演变特征[J].水土保持通报,2016,36(5):20-27.
- [19] 张超,马亚亚,刘国彬,等.黄土高原植被恢复过程中土壤微生物的演变特征[J].水土保持通报,2018,38(6):240-247.
- [20] 赵萌捷,陈云明,艾泽民,等.黄土丘陵区典型人工林有机碳分布特征及其影响因素[J].水土保持通报,2013, 33(2):270-275.
- [21] 韩鲁艳,郝乾坤,焦菊英.黄土丘陵沟壑区人工林地的土壤抗蚀性评价[J].水土保持通报,2009,29(3):159-164.
- [22] 许明祥.黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [23] 石亮,舒洋,张波,等.不同龄组兴安落叶松林枯落物的水文效应[J].水土保持通报,2016,36(5):91-95.
- [24] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of aboveground and belowground detritus of world forests[J]. Advances in Ecological Research, 1986,15:303-377.
- [25] Gao H, Huang Y M. Impacts of the Three-North shelter forest program on the main soil nutrients in Northern Shaanxi China: A meta-analysis[J]. Forest Ecology and Management, 2020,458:117808.
- [26] Chai Q L, Ma Z Y, An Q Q, et al. Does *Caragana korshinskii* plantation increase soil carbon continuously in a water-limited landscape on the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(14):1691-1698.
- [27] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land[J]. Forest Ecology and Management, 2002,169(1/2):137-147.