
**
*
碳
效
应
研
究
*
**

黄土高原植被恢复过程中土壤碳固存 变化及其驱动因素

郝旺林^{1,4}, 李宗善², 李彬彬^{3,4}

(1. 吕梁学院 生物与食品工程系, 山西 吕梁 033000; 2. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原旱地农业与土壤侵蚀国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 分析黄土高原区域尺度不同植被类型、不同气候带土壤固碳速率变化, 厘定不同影响因素的相对重要性, 为黄土高原植被恢复过程中的土壤碳汇评估及管理提供理论依据。[方法] 基于最新的土壤固碳数据库, 整合 1992—2023 年发表的 100 篇文献(935 条观测数据, 55 个地区), 分析干旱半干旱黄土高原区域尺度植被恢复(人工乔木、人工灌木和撂荒草地)过程中土壤碳固存变化及其驱动因素。[结果] ①人工乔木和灌木固碳速率均为 0.30 Mg/(hm²·a), 高于撂荒草地[0.10 Mg/(hm²·a)]; 常绿人工林固碳速率[0.45 Mg/(hm²·a)] 高于落叶人工林[0.33 Mg/(hm²·a)], 但后者具有更高固碳量, 恢复约 51 a 后, 常绿人工林具有更大固碳效益; ②土壤固碳速率随降雨量的增加而增加, 但变化程度受植被类型和恢复年限影响; ③区域尺度上, 土壤固碳速率先增加(<30 a)后稳定(>30 a), 0~10 a, 10~20 a, 20~30 a, >30 a 土壤固碳平均速率分别为 0.02, 0.13, 0.19 和 0.18 Mg/(hm²·a); ④在植被恢复过程中, 不同恢复阶段土壤碳固存的主要影响因子不同, 总体来说, 主要受气候因子调控(降雨和温度)。降雨量、温度、恢复年限、植被类型和初始碳储量对土壤碳固存变化的相对重要度分别为 31.8%, 16.3%, 17.7%, 15.9% 和 18.3%。[结论] 建议建立基于固碳速率大小及固碳能力可持续性的生态恢复模式。通过可持续的科学管理增加植被数量和质量, 可有效增加生态脆弱区土壤固碳量。

关键词: 土壤固碳; 植被恢复; 干旱半干旱; 驱动因素; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0233-09

中图分类号: S714

文献参数: 郝旺林, 李宗善, 李彬彬. 黄土高原植被恢复过程中土壤碳固存变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 233-241. Hao Wanglin, Li Zongshan, Li Binbin. Dynamics and driving factors of soil organic carbon sequestration during vegetation restoration on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 233-241. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.014; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.014.

Dynamics and driving factors of soil organic carbon sequestration during vegetation restoration on Loess Plateau

Hao Wanglin^{1,4}, Li Zongshan², Li Binbin^{3,4}

(1. Department of Biological and Food Engineering, Lyuliang University, Lüliang, Shanxi 033000, China;

2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objectives] The changes in soil carbon sequestration rates in different vegetation types and climatic zones at regional scales on the Loess Plateau were analyzed, and the relative importance of different influencing factors was determined to provide a theoretical basis for soil carbon sink assessment and management during vegetation restoration. [Methods] Based on the latest soil carbon sequestration database, by integrating 100

收稿日期: 2024-12-11

修回日期: 2025-01-13

采用日期: 2025-01-14

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“黄土区刺槐人工林疏伐对深剖面土壤水、碳变化及其耦合关系的影响”(42201099); 国家重点研发计划项目“黄土高原缓坡丘陵区油松和柠条林水土保持及碳汇功能提升技术”(2022YFF1300403); 中央高校科研启动经费(2452024023); 吕梁市高层次科技人才项目(2022RC22)

第一作者: 郝旺林(1984—), 男(汉族), 山西省五寨县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤碳排放与碳固存研究。Email: haowang2000@163.com。

通信作者: 李彬彬(1991—), 男(汉族), 山东省德州市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤碳固存研究。Email: bbli@nwfufu.edu.cn。

published studies (935 observational data points, 55 regions) from 1992 to 2023, changes in soil carbon sequestration and their driving factors during vegetation restoration (afforestation, shrub planting, and abandoned grassland) in the arid and semi-arid Loess Plateau were analyzed. [Results] ① The carbon sequestration rates of afforestation and shrub planting [$0.30 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$] were higher than those of abandoned grassland [$0.10 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]. Evergreen plantations had a higher carbon sequestration rate [$0.45 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$] than deciduous plantations [$0.33 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; however, the latter had a higher total carbon sequestration. After approximately 51 years of restoration, evergreen plantations showed greater carbon sequestration benefits. ② Soil carbon sequestration rates increased with precipitation; however, the extent of change was influenced by vegetation type and restoration duration. ③ At the regional scale, soil carbon sequestration rates initially increased (<30 years) and then stabilized (>30 years). The average carbon sequestration rates for 0—10, 10—20, 20—30 years, and >30 years were 0.02, 0.13, 0.19, and $0.18 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, respectively. ④ During vegetation restoration, the main influencing factors of soil carbon sequestration varied across different restoration stages. Overall, it was primarily regulated by climatic factors (precipitation and temperature). The relative contributions of precipitation, temperature, restoration duration, vegetation type, and initial carbon stock to changes in soil carbon sequestration were 31.8%, 16.3%, 17.7%, 15.9%, and 18.3%, respectively. [Conclusion] Establishing an ecological restoration model based on carbon sequestration rates and the sustainability of carbon sequestration capacity is recommended. Increasing the quantity and quality of vegetation through sustainable scientific management can effectively enhance soil carbon sequestration in ecologically fragile areas.

Keywords: soil carbon sequestration; vegetation restoration; arid and semi-arid; driving factors; Loess Plateau

土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库,在粮食安全和气候变化方面发挥关键作用^[1]。目前估算的陆地生态系统0—100 cm土壤有机碳库的含量约为1 500 Pg,是植被碳库和大气碳库的2~3倍,其微小的变化可引起大气二氧化碳的剧烈波动^[2]。土地利用变化通过改变土壤侵蚀过程、碳周转速率以及植被生物量从而影响土壤有机碳库从而影响全球碳循环^[3-4]。在过去的两个世纪中,大量的原生植被被开垦为耕地,土壤有机碳在微生物和土壤侵蚀的作用下迅速流失^[5]。Lal^[6]研究表明,在耕地开垦的前20 a中,土壤有机碳的损失量就高达50%。与耕地开垦相反的是,将耕地转变为永久植被(例如人工乔木、人工灌木或撂荒草地),则可以通过减少土壤侵蚀、增加地上地下碳归还量^[7],从而促进土壤有机碳的积累。因此,通过植被恢复来增加土壤固碳被认为是一种可行且能够有效缓解气候变化的方式之一^[8]。

黄土高原属于典型的干旱半干旱地区,由于不合理的土地利用方式以及脆弱的生态环境,使其成为全球范围内生态系统退化最为严重的地区之一^[9]。20世纪末,为了遏制环境恶化,中国政府在黄土高原实施了大规模的植被恢复(如退耕还林(草)工程),大量耕地转变为人工乔木(例如刺槐、油松等)、人工灌木(例如柠条、沙棘等)和撂荒草地^[3]。尽管实施退耕还林(草)工程的初衷是为了防治土壤侵蚀,但随着生态环境的改善,其碳汇效应引起了广泛关注^[10]。诸多学者从不同空间尺度^[4,11]、不同植被类型^[12]以及

不同深度探讨了植被恢复过程中土壤固碳速率^[4,13]及其与恢复年限、气候等^[14]因素的关系。然而,受采样成本等限制,大部分研究多集中在小尺度上,大尺度研究仍然较少。此外,对植被恢复过程中不同植被类型下的土壤固碳能力、固碳速率以及影响因素的认识仍然存在争议。例如,Fu Xiaoli等^[15]研究表明,灌木的固碳能力高于草地,而Wang Jun等^[16]则表明这两种植被类型固碳无差异。Wang Yunqiang等^[17]发现由于较强的光合能力及碳周转速率,草地的固碳强于灌木,这与Deng Lei等^[4]研究结果相似。而在不同气候带,Chang等^[18]研究表明当降雨量小于450 mm时,乔、灌、草固碳无显著差异,当降雨量在450~550 mm时,乔木固碳强于灌木和草地,当大于550 mm时,乔灌固碳均优于草地。然而,植被恢复并不一定总是促进有机碳的增加,这取决于降雨量与植被类型^[14]。与之相反的是,Deng Lei等^[4]则研究发现初始碳储量和年均温是影响土壤碳固存的主要因素,而植被类型、气候带、年均降雨量影响不显著。目前,对黄土高原植被恢复过程中土壤固碳速率的探讨也存在较大差异。Zhang等^[11]报道了黄土高原区域尺度表层土壤(0—20 cm)碳固存速率为 $0.37 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,Deng Lei等^[4]研究则将这一数值减小为 $0.29 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。然而,Chang Ruiying等^[18]研究表明该区土壤固碳速率为 $0.17 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。此外,根据Feng Xiaoming等^[19]估算得出的碳固存速率为 $0.09 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。上述固碳速率变化范围从

0.09~0.37 Mg/(hm²·a),其差异达4倍之多。综上所述,当前对黄土高原植被恢复过程中土壤碳固存的认知还存在较大不确定性。受气候条件、恢复年限、植被类型等因素的影响,土壤有机碳对生态恢复的响应机制极为复杂,并呈现多样性结果。因此,基于更大样本量、更大尺度的土壤固碳研究显得尤为必要。

基于此,本研究整合近30 a黄土高原植被恢复过程中的土壤固碳数据。与已有成果相比,本研究数据集的样本量是Deng Lei等^[4]、Chang Ruiying等^[18]研究的2~3倍,且数据集具有更广的覆盖范围以及更长的年限梯度。并基于最新的土壤固碳数据库分析黄土高原区域尺度不同植被类型、不同气候带土壤固碳速率变化,并厘定不同影响因素的相对重要性,以期为黄土高原植被恢复过程中的土壤碳汇评估及管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据获取

所用文献均来自中国知网(www.cnki.net)和科睿唯安(www.webofknowledge.com)两个文献数据库,发表年份在1992—2023年。在进行文献检索时采用的关键词为“黄土高原”“植被恢复”“土壤”“有机碳”等,通过分析、整理,获取100篇可用于数据提取的文献。在检索过程中,所筛选的文献需要满足标准:①文献中包含土壤碳储量(Mg/hm²)数据或可以通过土壤容重(g/cm³)、有机碳含量(Mg/hm²)以及土层厚度(cm)计算;②文献中需同时包含对照组(农田)与试验组(人工乔木、人工灌木、撂荒草地);③文献中具有明确的恢复年限信息;④文献中所有数据需要完全来自野外样品实测数据,室内模拟数据排除在外。最终,本研究共获取935组观测数据,分布在黄土高原的5个省份(图1)。

使用Getdata Graph Digitizer对图片进行数字化并提取文献数据。此外,每篇文献所需记录的信息包括:①题录信息(作者、期刊名称、发表年限等);②年均降雨量和年均温;③植被类型(人工乔木、人工灌木、撂荒草地、耕地);④恢复年限;⑤土壤容重;⑥土壤有机碳储量或土壤有机碳含量。根据Deng Lei等研究^[3-4],将黄土高原划分为<450,450~550,>550 mm共3个降雨带。这3个降雨带也是划分黄土高原植被类型的主要依据之一。此外,根据黄土高原退耕还林(草)工程实施的时间以及该地区已有的一些研究成果^[20],将不同恢复阶段划分为<10 a,10~20 a,20~30 a和>30 a。根据人工林的树种特

性,将人工林划分为落叶人工林和常绿人工林,落叶人工林主要由落叶树种组成,这些树种在冬季会落叶,进入休眠状态;黄土高原常见的落叶树种包括杨树、柳树、刺槐等。常绿人工林主要由常绿树种组成,这些树种全年保持绿色,冬季不落叶;黄土高原常见的常绿树种包括松树、柏树等。

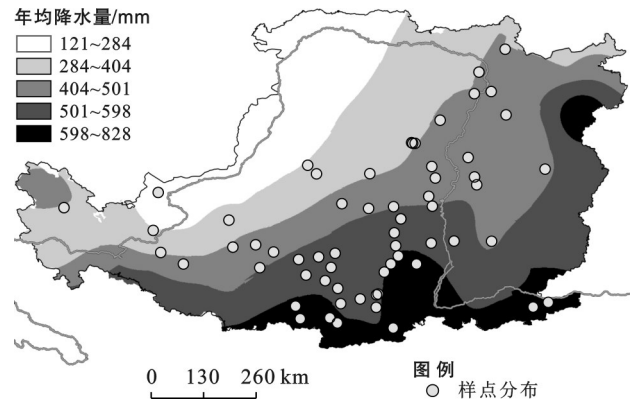


图1 黄土高原降水及样点空间分布

Fig.1 Distribution of precipitation and sampling sites on Loess Plateau

1.2 数据计算

土壤有机碳与有机质的转换系数采用0.58,有机质与有机碳的转换公式为:

$$\text{SOC} = \text{SOM} \times 0.58 \quad (1)$$

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

对于文献中未报道土壤容重信息则采用Wu Haibin等^[21]建立的方法对容重进行计算[公式(2)~(3)]。该方法在黄土高原区域尺度容重估算中被多个研究所采纳^[3-4,13],可有效解决容重数据的缺失问题。

$$\text{BD} = -0.1229 \ln(\text{SOC}) + 1.2901 \quad (2)$$

(有机碳含量 < 60 g/kg)

$$\text{BD} = 1.3774 e^{-0.0413 \text{SOC}} \quad (3)$$

(有机碳含量 > 60 g/kg)

式中: BD为土壤容重(g/cm³)。

土壤有机碳储量的计算公式为:

$$\text{SOC}_{\text{stock}} = \text{SOC} \times \text{BD} \times D/10 \quad (4)$$

式中: SOC_{stock}为有机碳储量(Mg/hm²); D为土层厚度(cm)。

本研究采用Deng Lei等^[3]建立的方法计算土壤碳固存速率,即土壤有机碳储量在单位时间内的变化量(ΔC_s)。土壤碳固存速率的计算分为两步:

①以农田土壤碳储量为本底值,计算植被恢复后(人工乔木、人工灌木、撂荒草地)的土壤有机碳储

量与农田土壤碳储量的差值(公式 5):

$$\Delta C_s = C_{LU_n} - C_{LU_0} \quad (5)$$

式中: ΔC_s 代表土壤碳固存变化量(Mg/hm^2); C_{LU_n} 代表植被恢复后有机碳储量(Mg/hm^2); C_{LU_0} 代表农田土壤碳储量(Mg/hm^2)。

②构建土壤碳固存变化量与恢复年限的线性回归方程:

$$\Delta C_s = f(\Delta age) = y_0 + k \times \Delta age \quad (6)$$

式中: k 值即为土壤有机碳固存速率[$Mg/(hm^2 \cdot a)$]; y_0 为常数项; Δage 为时间间隔(a)。

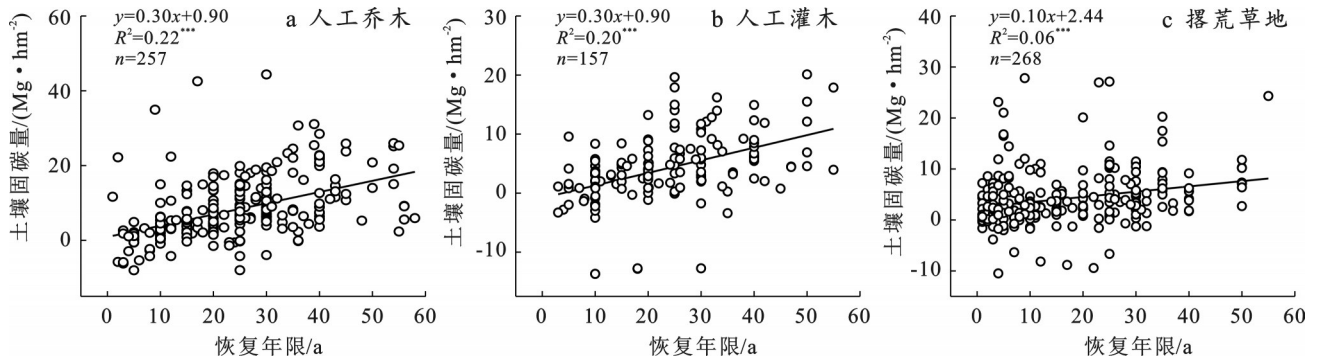
1.3 数理统计方法

本研究所有统计分析均采用 R 语言 4.1 版本进行。其中,采用 R 语言包 agricolae 中的 kruskal 函数进行方差分析;使用 base 包中的 lm 函数计算土壤固碳量随恢复年限变化的回归系数;使用 randomForest 包中的 randomForest 函数量化植被类型、恢复年限、

年均降雨量、年均温及初始碳储量等因素的相对重要度。

2 结果与分析

随着恢复年限的增加,不同植被类型土壤固碳量显著增加(图 2)。其中,将农田转变为人工乔木(图 2a)、人工灌木(图 2b)和撂荒草地(图 2c)后,其固碳速率分别为 0.30, 0.30 和 0.10 $Mg/(hm^2 \cdot a)$ 。由此可知,人工乔木和人工灌木的固碳速率一致,而撂荒草地固碳速率约为乔、灌植被的 1/3。此外,土壤固碳速率受树种的影响(图 3)。在干旱半干旱黄土高原,人工常绿树种[0.45 $Mg/(hm^2 \cdot a)$]较落叶树种[0.33 $Mg/(hm^2 \cdot a)$]具有更高的固碳速率,但是后者却具有更高的固碳量。根据回归方程可以发现,当恢复年限超过 51 a 后,人工常绿树种比落叶树种具有更高的固碳效益(图 3)。



注:①*表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$, ***表示 $p < 0.001$ 。②n 为样本量。下同。

图 2 黄土高原不同植被类型土壤有机碳固存随恢复年限变化

Fig.2 Changes of soil carbon sequestration with ages in different vegetation types on Loess Plateau

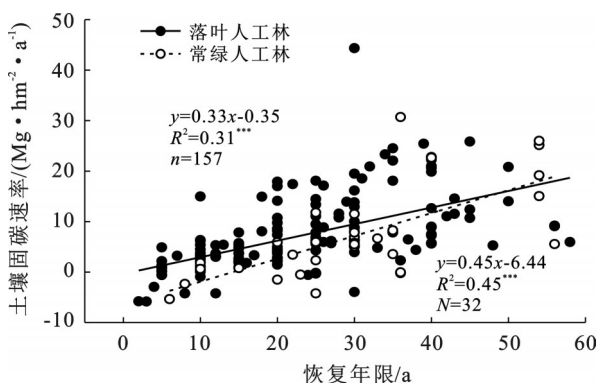


图 3 黄土高原常绿与落叶人工林固碳速率对比
Fig.3 Comparison of carbon sequestration rates between planted evergreen and deciduous tree species on Loess Plateau

不同降雨带显著影响土壤固碳速率(图 4)。整体而言,土壤固碳速率随降雨量的增加而增加(图 4)。其中, < 450 mm 降雨带土壤固碳速率最低[0.12 $Mg/(hm^2 \cdot a)$](图 4a), 450~550 mm 降雨带次之[0.20 $Mg/(hm^2 \cdot a)$](图 4b), 以 > 550 mm 降雨带固

碳速率为最高[0.28 $Mg/(hm^2 \cdot a)$](图 4c)。 > 550 mm 降雨带土壤固碳速率分别是 450~550 mm 和 < 450 mm 降雨带的 2.33, 1.40 倍。

不同植被类型在各个气候带均表现为正向固碳效应,然而其固碳速率呈现出差异化特征(图 5)。在 450~550 mm 和 > 550 mm 雨量带,土壤固碳速率均表现为:人工乔木 $>$ 人工灌木 $>$ 撂荒草地,而在 < 450 mm 降雨带,人工灌木固碳速率高于人工乔木和撂荒草地(图 5)。在 > 550 mm 降雨带,3 种植被土壤固碳速率差异相对较小,其变化范围为 0.23~0.28 $Mg/(hm^2 \cdot a)$ 。不同植被类型固碳速率在 450~550 mm 降雨带差异较大,人工乔木、人工灌木和撂荒草地土壤固碳速率分别为 0.31, 0.17 和 0.08 $Mg/(hm^2 \cdot a)$ 。在低降雨带(< 450 mm),人工乔木[0.18 $Mg/(hm^2 \cdot a)$]与撂荒草地[0.13 $Mg/(hm^2 \cdot a)$]的固碳速率低于灌木固碳速率[0.23 $Mg/(hm^2 \cdot a)$](图 5)。

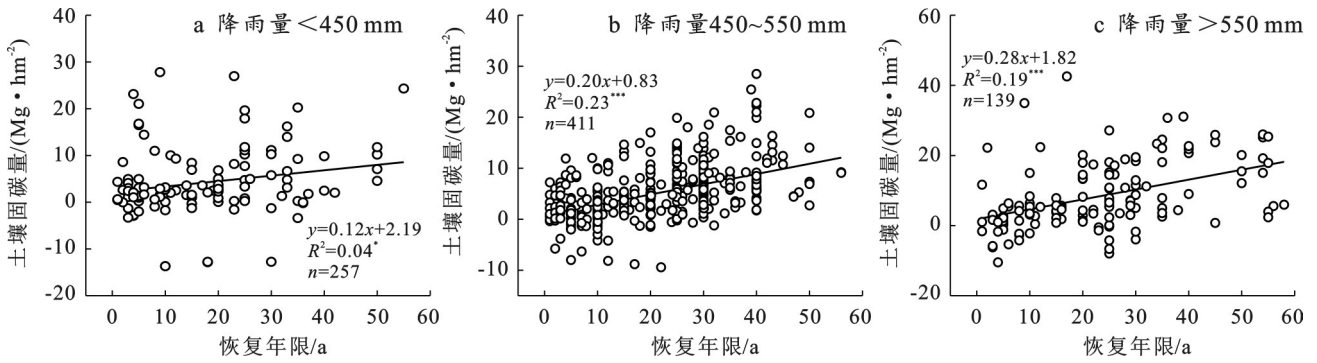


图4 黄土高原不同降雨带土壤有机碳固存随恢复年限的变化

Fig.4 Changes of soil carbon sequestration with ages in different rainfall zones on Loess Plateau

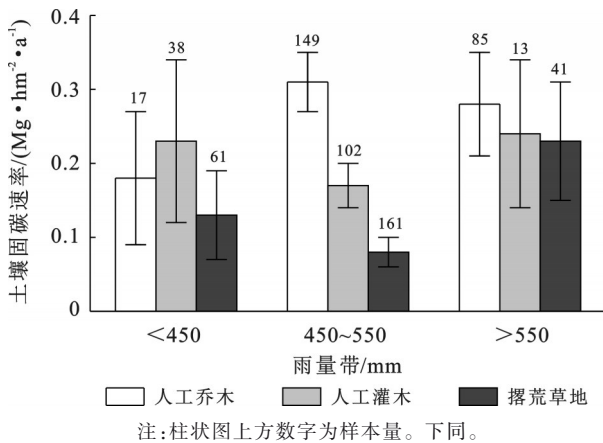


图5 不同降雨带下不同植被类型土壤固碳速率特征

Fig.5 Rate of SOC sequestration for different vegetation types under three rainfall zones

土壤固碳速率在不同气候带的不同恢复阶段差异明显(图6)。在<450 mm降雨带,土壤固碳速率随恢复年限的增加逐渐降低,其降低速率由恢复初期的-0.26 Mg/(hm²·a)增加到恢复中后期的-0.97 Mg/(hm²·a),呈现碳亏损趋势,这一趋势在大于30 a后由负值变为正值[0.34 Mg/(hm²·a)](图6)。在450~550 mm降雨带,土壤固碳速率在恢复的前30 a逐渐增加,在20~30 a达到最大[0.39 Mg/(hm²·a)],在大于30 a后稳定[0.06 mg/(hm²·a)]。>550 mm降雨带在恢复的前30 a具有相似的固碳速率[0.47~0.62 Mg/(hm²·a)],在30 a后变化较小[-0.06 Mg/(hm²·a)]。

整体来看,黄土高原植被恢复过程中土壤固碳速率先增加(0~30 a)后稳定(>30 a)(见图7)。在不同恢复阶段,土壤固碳平均速率分别为0.02,0.13,0.19,0.18 Mg/(hm²·a)。在恢复前期,土壤固碳速率较小,且变异性较大,在恢复中后期,土壤固碳速率快速增加并达到稳定。

基于随机森林模型分析发现,年均降雨量、年均温、恢复年限、植被类型和初始碳储量在植被恢复的

不同阶段对土壤碳固存的影响存在差异(图8)。具体而言,随着恢复年限的增加,植被类型的影响程度逐渐增加,其相对重要度由恢复初期的8.9%到恢复后期的31.2%。而年均温和恢复年限仅在恢复初期重要度较高,随着恢复年限的增加,其重要度降低并保持稳定。初始碳储量对土壤碳固存的影响程度先升高后降低。值得注意的是,年均降雨量在不同恢复阶段均具有较高且稳定的重要度。从整个恢复过程来看,年均降雨量、年均温、恢复年限、植被类型和初始碳储量的重要度分别占31.8%,16.3%,17.7%,15.9%和18.3%。

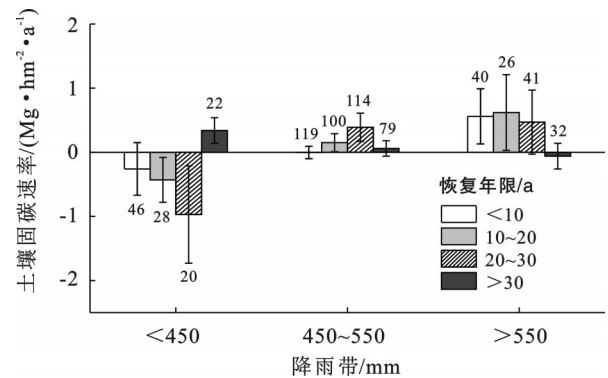


图6 黄土高原不同降雨带下不同恢复阶段土壤固碳速率
Fig.6 Rate of SOC sequestration for different restoration periods under three rainfall zones

3 讨论

3.1 植被恢复过程中土壤固碳驱动因素

3.1.1 植被类型 本研究结果表明,将农地转为乔、灌、草后,土壤有机碳均显著增加(图1)。这可以归因为3个方面原因:①将农地转为永久性植被后,水土保持能力增强,土壤抗蚀力增加;②地表枯落物归还量增加,促进了有机碳的积累;③植被根系生物量输入增加。本研究表明,人工乔木和人工灌木具有相同的固碳速率[0.30 Mg/(hm²·a)],约为撂荒草地的3倍[0.10 Mg/(hm²·a)](图2)。在干旱半干旱黄

土高原,与撂荒草地相比,人工乔木和人工灌木具有更为发达的根系系统和枯落物归还量,从而提供了更多的地上(枯落物等)和地下(根系分泌物根系生物量)有机物质的输入。这与Chang Xiaofeng等^[22]研究一致。然而,Deng Lei等^[4]整合分析发现,区域尺度上草地土壤固碳速率强于乔、灌。这可能与草地类型有关,Deng Lei等^[3]研究中包含有人工草地。人工草地一般生长快速,能够积累大量的有机物质,促进有机碳的快速积累。而本研究中的草地均为撂荒的天然草地,Chang Xiaofeng等^[22]研究表明,受水分等环境条件的限制,半干旱黄土高原区的自然恢复草地的固碳速率一般较低。此外,草地土壤固碳功能变异性较大。例如,Chang Ruiying等^[18]报道了在黄土高原北部地区,草地固碳能力优于乔木和灌木。而Tuo Dengfeng等^[14]则报道了在大于510 mm降雨带,草地固碳呈现亏损状态。

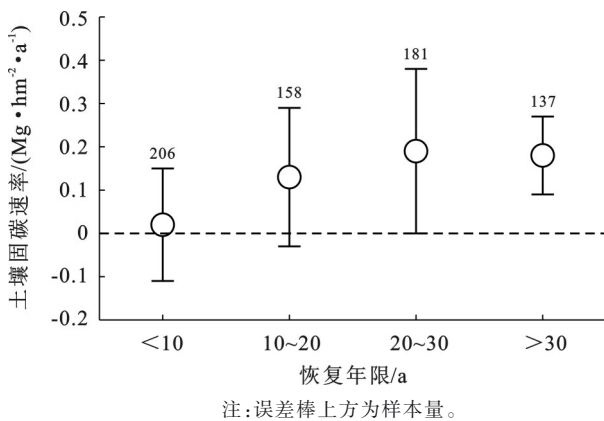
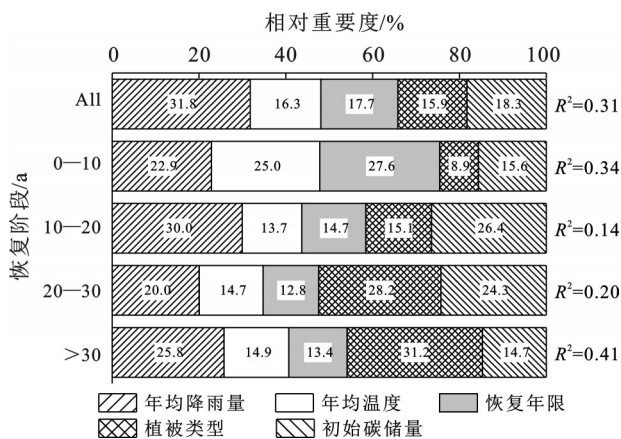


图7 黄土高原不同植被恢复阶段土壤固碳速率

Fig.7 Rate of SOC sequestration of different restoration periods of vegetation on Loess Plateau



注:R²为随机森林模型可以解释的方差比例。

图8 不同植被恢复阶段年均降雨量、年均温度、恢复年限、植被类型、初始碳储量的相对重要度

Fig.8 Relative importance of annual mean precipitation, temperature, restoration ages and vegetation types in different periods of vegetation restoration

不同树种通过改变有机物质输入的数量或质量(根系、凋落物等)进而改变固碳速率^[23]。本研究发现,不同乔木树种(常绿人工林与落叶人工林)固碳速率之间存在差异(图3)。常绿树种具有更高的固碳速率[0.45 Mg/(hm²·a)],但是落叶树种似乎具有更大的固碳量,而在种植约50 a后,常绿树种显示出更强更快的固碳能力(图3)。这可能与二者的群落特征有关。黄土高原常绿树种一般为油松、侧柏等植物,而落叶树种多为刺槐等植物^[20]。与落叶树种相比,常绿树种具有更大的细根生物量和生产力,Vogt K A等^[24]研究证明常绿树种会将更多的光合产物投入到根系生物量生产中。此外,常绿树种由于常年荫蔽,林下温度相对较低,有利于有机质的积累^[25]。与常绿树种相比,落叶树种具有更大的枯落物归还量^[26]。然而,在黄土高原地区,落叶树种受自身及环境的影响,在恢复后期逐渐衰退^[20],其固碳能力逐渐降低。这与本研究得到的现象较为一致。基于本研究结果,在进行碳评估时,树种的差异应被纳入评估指标中。在指导植被恢复方面,种植常绿树种能够获取长期的固碳效益,而落叶树种则具有更高的短期效益。

3.1.2 不同气候带 不同气候带通过影响生物(微生物活性等)及非生物环境(温度、水分等),进而影响植被生长,从而改变土壤固碳速率^[3]。本研究表明,不同气候带土壤固碳速率存在差异,且降雨量越大的区域,碳固存的速率越高,这与Deng Lei等^[26]研究一致。Deng Lei等^[26]认为,在植被恢复过程中,降雨量越高,土壤碳、氮固存速率越高;Shi Shengwei等^[27]研究表明0—20 cm土壤碳氮固存对降雨十分敏感。Berthrong等^[28]研究也支持了该观点,即在土地利用转换后,有机碳的变化与降雨量显著相关。在全球范围内,土壤固碳速率由寒冷地带向暖湿地带的过渡中不断增强^[2]。在降雨量增加过程中,土壤水分逐渐增加,植被的生产力增强,输入到土壤中的有机物质不断增多,碳周转速率加快^[3]。这与本研究结果一致,<450 mm,450~550 mm和>550 mm降雨带土壤固碳速率分别为0.12,0.20和0.28 Mg/(hm²·a),且恢复年限在高降雨带对碳固存变化的解释度高于低降雨带。在低降雨带,植被生长较慢,有机物质的输入较低,因此在时间尺度上呈现的变化趋势并不强烈^[14]。此外,土壤固碳速率的变化也受到不同气候带不同植被类型的影响。例如,在本研究中,乔木的固碳速率在<450 mm降雨带最低,而以450~550 mm和>550 mm较高。这与不同植被在不同降雨条件下的生长有关。Tuo Dengfeng等^[14]报道了区域尺度

上,尽管有机碳固存随降雨量的增加而增加,但是不同植被类型存在差异,在低降雨带乔灌的固碳能力甚至弱于草地。而Chang Shengwei等^[27]也报道了乔、灌、草固碳能力在不同气候带有差异。整体而言,黄土高原植被恢复过程中土壤固碳能力随降雨的增加而增加,表明根据降雨带配置植被类型是提高有机碳固存的有效措施,尤其是在降雨量相对较高的地区(例如, > 450 mm区域)。

3.1.3 恢复年限 本研究结果表明,区域尺度上,不同植被类型、不同气候带土壤碳固存均随恢复年限的增加而显著增加。一般来讲,将农田转变为乔木林地、灌木林地和草地以后,随着恢复年限的增加,植被的生长一方面会改善土壤物理、化学、生物性质,提高土壤质量,进而减少土壤侵蚀;另一方面促进有机物质的输入与积累(枯落物、根系分泌物、根系生物量等)^[28]。

目前,植被恢复后土壤碳固存的变化一般可分为4种情况:增加,降低,不变,先降低后增加。在本研究中,不同恢复阶段土壤固碳速率在不同气候带存在明显差异。其中,小于450 mm降雨带有机碳固存在前30 a呈现降低趋势,而在大于30 a后呈现正值。这可以从几个方面来解释:①植被恢复初期,土壤侵蚀未得到有效控制,土壤碳的流失依旧存在;②退耕后,农田不再进行施肥(化肥、有机肥等)等措施,而植被恢复对碳的补充依然低于碳的损失^[4];③植被的碳分配策略。在降雨量较低的地区,土壤中的碳更多地进入到地上生物量中,而不是地下,这与“养分泵”效应有关^[14];④根际激发效应。新鲜碳的输入会刺激原有老碳的分解,造成碳亏损,而新碳的补充量低于激发所引起的矿化量。而到恢复后期,随着生态系统的稳定,土壤侵蚀得到控制,植被对养分的需求降低,有机物质输入增加,促进了有机碳的增加。而在降雨量较高的地区,如450~550 mm,土壤固碳速率在前30 a持续增加,而在 > 550 mm降雨带固碳速率较为稳定。这表明,在较高降雨带植被恢复具有较大的固碳潜力。整体来看,黄土高原土壤碳固存速率呈现先增加后稳定的趋势。在植被恢复的前30 a,土壤固碳速率快速增加,而在30 a后保持稳定。土壤固碳速率的变化并非是线性的,而是随着恢复年限的变化而变化。当前固碳研究一般将黄土高原植被恢复过程中有机碳的变化假设为线性的,这可能在一定程度上会造成高估。因此,对土壤固碳动态变化的认识有助于提高预测模型的精准性。

3.1.4 初始碳储量 初始碳储量是影响植被恢复过程中土壤碳固存动态变化的重要因子。然而,初始

碳储量对土壤固碳的影响还存在争议。Deng Lei等^[3-4]研究采用线性回归厘定了初始碳储量对土壤碳固存的影响效应。而Li Binbin等^[13]发现初始碳储量对土壤碳固存的影响是非线性的,可以用log函数很好地描述。本研究采用随机森林模型厘定初始碳储量的影响效应,可以有效避免线性、非线性或共线性关系带来的影响。本研究表明,初始碳储量对土壤碳固存的影响先增加后降低。Zhang等^[11]研究表明较高的初始碳储量往往会导致较低的土壤固碳量,这是由于不同养分条件下有机碳的分解速率存在差异。Vesterdal等^[8]研究也支持这一观点,土壤肥力越低(有机质含量低)的土壤造林后土壤碳的积累越快。在全球尺度上,Liu Xiang等^[29]研究发现,裸地造林比农田造林能够产生更多的碳积累,这可能是由于不同的底物含量造成的。本研究对此有了进一步的认识,不同恢复阶段初始碳储量的影响效应是不同的,这在分析不同因素贡献度时应给予充分关注。

3.2 管理建议

在全球变暖背景下,固碳成为热点话题,而植被恢复被认为是缓解气候变暖、降低二氧化碳的有效途径之一^[30]。在植被恢复过程中,土壤固碳能力备受国内外学者的关注。2015年,法国巴黎气候变化政府间工作会议提出“千分之四”固碳减排计划^[31],即在全球范围内,2 m深土壤的有机碳储量每1 a增加4‰,即 9.6×10^9 t碳当量,就可以抵消当年全球矿物燃料的碳排放。基于本研究结果,认为“千分之四”计划有两点较大的不确定性:①土壤有机碳的时间演变。本研究结果表明,土壤固碳在恢复的前30 a逐渐增大(图7),大于30 a后保持稳定。表明有机碳在演变过程中会达到一个新的平衡,Smith等^[32]发现这个新平衡建立的时间最长可达100 a。这取决于诸多因素,例如土壤质地,水分、有机物料的添加、降雨和温度等。从全球范围内来看,景观极为复杂,有机碳新的平衡的建立存在极大不确定性;②有机碳固存的估算。本研究表明,即使在黄土高原区域,不同植被类型、不同气候条件下、不同恢复阶段土壤固碳速率的差异很大。Minasny R E等^[31]总结了不同国家和气候条件下的有机碳积累速率:造林 $[0.6 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、转牧 $[0.5 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、有机修复 $[0.5 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、残茬投入 $[0.35 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、免耕或减耕 $[0.3 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 和轮作 $[0.2 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 。不同国家、不同地区、不同措施固碳速率差异巨大^[3-4,13,22,26-27]。因此,从更为保守的角度来讲,需要明确不同气候条件和不同植被类型下土壤固碳最大潜力,从而精准估算土壤固碳动态。

目前,国内外大量关于土地利用变化与有机碳的研究多集中在表层土壤^[8,21]。Danie^[33]总结研究发现,360个案例中90%的研究中土层深度在30 cm以内,而50%的研究在10 cm以内。以黄土高原为例,黄土土层深厚(平均厚度105.7 m),受降雨及土层厚度影响,该区植被一般具有较大的根系深度,而李会杰^[34]研究表明,区域尺度上黄土高原植被根系深度可以达到25 m。在根系的作用下(根系分泌物输入、根系生物量输入),其土壤碳过程必然发生相应变化。Li Binbin等^[13]研究表明,黄土高原0—200 cm土层的固碳能力是显著的,其中人工乔木林固碳能力优于灌木和草地。Deng Lei等^[3]研究表明,中国退耕还林(草)工程实施后,0—20 cm与0—100 cm土壤固碳存在极强的线性关系,即0—20 cm每增加1 Mg/hm²,0—100 cm土层则增加2.46 Mg/hm²。相似的, Li Binbin等^[13]研究发现,0—100 cm与100—400 cm固碳也存在显著的回归关系,0—100 cm土层每增加1 Mg/hm²,100—400 cm则会增加0.45 Mg/hm²。深层土壤在未来全球气候变化背景下可能会扮演重要的碳汇角色。因此,本研究呼吁未来土壤有机碳固存研究不应仅关注浅层土壤,而是应该将浅层与深层土壤碳固存统一,关注整体剖面碳变化,这不仅能够使碳评估模型更为精确,同时可以为区域固碳研究提供理论支持。

3.3 不确定性分析

尽管本研究基于大样本数据库对黄土高原植被恢复过程中土壤碳固存变化进行了评估,但仍然存在以下几个不确定性因素:①由于文献数据的空间异质性较大,所以数据的分布并不均匀。整合分析方法虽然能够解决数据短缺、研究时限短等问题,但是数据的空间分布一直是其短板。这在以往已发表文章中亦有描述。因此,在整合分析中,扩大样本量或许可以减小其不确定性;②受数据获取的限制,本研究中的影响因素仅考虑了降雨量、温度、植被类型、初始碳储量、恢复年限5个因素,而在实际情况中,土壤碳固存受到土壤水分、土壤质地、pH值以及微生物的影响。本研究中,在不同恢复阶段,影响因子的整体解释度也印证了这一点(图8),所获取因子在数量上有待进一步提升。因此,未来的研究应该尽可能多的获取影响因子,以便更精准地分析土壤固碳的动态特征。

4 结论

通过整合黄土高原近30 a来植被恢复过程中土壤固碳数据,在区域尺度上量化该区土壤固碳速率

及其影响因子的相对重要度。研究表明,干旱半干旱黄土高原区人工乔木和人工灌木具有相同的固碳速率,高于撂荒草地固碳速率。常绿人工林固碳速率高于落叶人工林,但是恢复的前51 a,落叶人工林具有更大固碳量;土壤固碳速率随降雨量的增加而增加,但是变化程度受恢复年限和植被类型的影响;整体而言,该区土壤固碳量主要受气候因子的影响(降雨量和温度)。建议建立基于固碳速率大小及固碳能力可持续性的生态恢复模式,通过可持续的科学管理增加植被数量和质量,将有效增加生态脆弱区土壤固碳量。

参考文献(References)

- [1] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils: A review of drivers and indicators at various scales [J]. *Geoderma*, 2019, 333:149-162.
- [2] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3):317-327.
- [3] Deng Lei, Liu Guobin, Shangguan Zhouping. 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.
- [4] Deng Lei, Shangguan Zhouping, Sweeney S. "grain for green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:7039.
- [5] Kassa H, Dondeyne S, Poesen J, et al. Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: The case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247:273-282.
- [6] Lal R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/2/3):242-258.
- [7] Laganière J, Angers D A, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1):439-453.
- [8] 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.
- [9] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1):11-19.
Liu Guobin, Shangguan Zhouping, Yao Wenyi, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1):11-19.
- [10] Chai Qinglin, Ma Zhanying, An Qiqi, et al. Does *Cara-gana korshinskii* plantation increase soil carbon continu-

- ously in a water-limited landscape on the Loess Plateau, China? [J]. *Land Degradation & Development*, 2019,30(14):1691-1698.
- [11] Zhang K, Dang H, Tan S, et al. Change in soil organic carbon following the 'grain-for-green' programme in China [J]. *Land Degradation & Development*, 2010,21(1):13-23.
- [12] Zhang Qian, Wu Junjun, Yang Fan, et al. Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change [J]. *Scientific Reports*, 2016,6:36587.
- [13] Li Binbin, Li Panpan, Yang Xiaomei, et al. Land-use conversion changes deep soil organic carbon stock in the Chinese Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(1):505-517.
- [14] Tuo Dengfeng, Gao Guangyao, Chang Ruiying, 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.
- [15] Fu Xiaoli, Shao Mingan, Wei Xiaorong, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2010,155(1/2):31-35.
- [16] Wang Jun, Fu Bojie, Qiu Yang, et al. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the Loess Plateau in China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2001,48(4):537-550.
- [17] Wang Yunqiang, Han Xiangwei, Jin Zhao, et al. Soil organic carbon stocks in deep soils at a watershed scale on the Chinese Loess Plateau [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016,80(1):157-167.
- [18] Chang Ruiying, Fu Bojie, Liu Guohua, et al. Soil carbon sequestration potential for "grain for green" project in Loess Plateau, China [J]. *Environmental Management*, 2011,48(6):1158-1172.
- [19] Feng Xiaoming, Fu Bojie, Lu Nan, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2013,3:2846.
- [20] Liang Haibin, Xue Yayong, Li Zongshan, et al. Soil moisture decline following the plantation of *Robinia pseudoacacia* forests: Evidence from the Loess Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018,412:62-69.
- [21] Wu Haibin, Guo Zhengtang, Peng Changhui. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [22] Chang Xiaofeng, Chai Qinglin, Wu Gaolin, et al. Soil organic carbon accumulation in abandoned croplands on the Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28(5):1519-1527.
- [23] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002,168(1/2/3):241-257.
- [24] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above-and belowground detritus of world forests [J]. *Advances in Ecological Research*, 1986,15:303-377.
- [25] Gao Han, Huang Yimei. 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] Deng Lei, Shangguan Zhouping. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China [J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28(1):151-165.
- [27] Shi Shengwei, Zhang Wen, Zhang Ping, 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.
- [28] Berthrong S T, Jobbágy E G, Jackson R B. A global Meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation [J]. *Ecological Applications*, 2009,19(8):2228-2241.
- [29] Liu Xiang, Yang Tao, Wang Quan, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: A Meta-analysis [J]. *Science of The Total Environment*, 2018,618:1658-1664.
- [30] Guan Song, An Na, Zong Ning, et al. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,116:224-236.
- [31] White R E, Davidson B, Lam S K, et al. A critique of the paper 'Soil carbon 4 per mille' by Minasny et al. (2017) [J]. *Geoderma*, 2018,309:115-117.
- [32] Smith P, Powlson D, Glendining M. Establishing a European GCTE Soil Organic Matter Network (SOMNET) [C]. *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996:81-97.
- [33] Richter D D, Billings S A. 'One physical system': Tansley's ecosystem as earth's critical zone [J]. *New Phytologist*, 2015,206(3):900-912.
- [34] 李会杰. 黄土高原林地深层土壤根系吸水过程及其对水分胁迫和土壤碳输入的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- Li Huijie. Root water uptake process in deep soil for forest growing on the Loess Plateau and its effect on water stress and soil carbon input [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2019.