

子午岭地区植被演替的土壤碳汇效应

许小明¹, 田起隆², 孙景梅³, 王浩嘉¹, 王妙倩¹, 易海杰², 何亮¹, 张晓萍^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨陵 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨陵 712100;

3.国家林业和草原局西北林业调查规划设计院,旱区生态水文与灾害防治重点实验室,西安 710048)

摘要:为明确黄土高原地区植被长期恢复的土壤碳汇效应,采用时空互代的方法,研究子午岭地区 150 年以来 8 个植被演替序列的土壤有机碳含量及储量的变化特征,分析影响土壤有机碳储量变化的植被因素。结果表明:从农地演替到气候顶级辽东栎(*Quercus wutaishanica* Mary.)群落,土壤有机碳含量和储量明显增加,表现为演替前期(草本群落)快速增加,后期(乔木群落)趋向稳定的变化特征。剖面上来看,随着土层加深,土壤有机碳含量迅速减少。0—5 cm 土层土壤有机碳含量与 5—20,20—40 cm 土层差异显著($P < 0.05$),表明土壤有机碳积累存在明显的表聚效应。枯落物蓄积量与细根生物量均随演替时间呈现出增加的变化特征,前者更有利于提高土壤有机碳储量。0—5 cm 土层与 0—20 cm 土层土壤有机碳储量与演替时间均存在极显著的幂函数关系,不同土层之间土壤有机碳储量线性相关关系显著($P < 0.001$)。植被长期演替具有显著的土壤碳汇功能。未来黄土高原地区林、草地的恢复应根据植被带的分异规律,促进自然演替,以进一步提升该地区的土壤碳汇潜能。

关键词: 植被演替; 土壤有机碳密度; 枯落物; 植被根系; 子午岭地区; 黄土高原

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)03-0159-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.023

Effects on Soil Carbon Sink of Vegetation Succession in the Ziwuling Area

XU Xiaoming¹, TIAN Qilong², SUN Jingmei³, WANG Haojia¹,

WANG Miaoqian¹, YI Haijie², HE Liang¹, ZHANG Xiaoping^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100; 3.Key Laboratory on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Northwest

Surveying, Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048)

Abstract: The purpose of this study was to evaluate the soil carbon sink effects of long-term vegetation restoration on the Loess Plateau. A commonly method of spatial and temporal substitution was applied to study the change characteristics of soil organic carbon content and corresponding reserves of eight vegetation succession sequences in the Ziwuling area among nearly 150 years, also analyzed vegetation factors affecting the soil organic carbon reserves changes. The results showed that from slope farmland to *Quercus wutaishanica* Mary. communities, which was in its highest climatic stage, soil organic carbon contents and corresponding reserves increased significantly, showing a rapid increase in the early stage of succession (grassland communities) and a stable change in the later stage (arbor communities). Soil organic carbon content decreased rapidly as the soil layers deepened in profile. The soil organic carbon content in 0—5 cm soil layer differed significantly from those in 5—20 and 20—40 cm soil layers ($P < 0.05$), indicating a significant surface aggregation effect of soil organic carbon accumulation. Both litter biomass and fine root biomass were increased with succession time, while litter biomass was more conducive to increasing soil organic carbon reserves. A highly significant power function relationship was found between soil organic carbon reserves and vegetation restoration time for 0—5 and 0—20 cm soil layers, also soil organic carbon storage in different soil layers showed a

significant linear correlation ($P < 0.001$). Long-term vegetation succession had a significant soil carbon sink function. The forests and grasslands restoration in the Loess Plateau should be premised on the distribution patterns of natural vegetation zones and promote its natural succession in the future, thus could further enhance the potential of soil carbon sinks capacity in the region.

Keywords: vegetation succession; soil organic carbon density; litter; plant roots; Ziwuling area; Loess Plateau

陆地生态系统碳库与全球气候变化的关系是当前科学界广泛关注和研究的热点环境问题之一^[1]。土壤碳库构成了陆地生态系统碳库的主体,大部分以土壤有机碳的形式存在^[2]。森林土壤碳库约占全球土壤有机碳碳库的 73%^[3],对维持陆地生态系统碳库的稳定与生态平衡,调节因化石燃料大量燃烧、毁林和土地利用方式转变排放的 CO₂ 所导致的全球气候变暖意义重大^[4]。植树造林和植被恢复等措施以及积极的土地利用方式变化能够有效吸收大气中的 CO₂,减少温室气体在大气中浓度的过程和活动,是实现碳中和的主要生态碳汇途径^[5]。因此,陆地生态系统固碳效能评估、变化和潜力分析是目前全球气候环境变化研究的热点问题^[6],也是实现生态环境保护和高质量发展的必由之路。

过去陆地生态系统土壤碳汇的研究主要聚焦全球^[1]、国家^[7-8]、地区^[9-14]和流域^[15]等不同尺度范围内土地利用类型转变情景下,以及人工林和天保林在不同恢复时间下土壤固碳能力的估算;影响土壤固碳能力因素(气候、土地利用方式、植被类型、根系、土壤微生物、枯落物和林分管理等因素)的分析^[16-18];土壤碳汇的环境效应评价^[16]等方面。这些研究有助于明晰植被恢复过程中土壤有机碳储量的时空分布规律和理解其增加土壤碳汇的重要作用及机理机制。天然林具有丰富的生物多样性和良好的生态功能,在维持陆地生态系统平衡方面发挥主导作用^[8]。从植被演替的角度分析植被恢复的土壤固碳功能及其变化有助于深入理解典型黄土区植被长期恢复过程中的重要生态意义,揭示天保工程的环境效应,促进黄土高原半干旱、半湿润地区人工水土保持林建设和自然恢复,推进国家双碳目标的落实。姚小萌^[12]和 Fu 等^[13]虽然对子午岭林区植被恢复的土壤固碳功能进行了研究,但在演替阶段、分层土壤碳汇效应以及影响因素分析等方面不够精细。其精细化研究是黄土高原生态保护和高质量发展的需要,仍应深入研究和探讨。

从评估植被演替对土壤碳汇效应影响的角度出发,本研究旨在回答 2 个科学问题:(1)黄土高原天然次生林区不同植被演替阶段的土壤碳汇效应呈现怎样的变化特征?(2)哪些植被因素影响了土壤有机碳储量的时空变化?子午岭地区覆盖了完整的植被演替序列^[19],对于开展植被恢复的长期固碳效应研究

具有很好的代表性。基于此,本文以子午岭地区为例,定量评估和对比分析了该区 150 年以来 8 个演替阶段的不同植被类型对增加土壤碳储量的作用,植被长期恢复的环境效益评价为科学、有效管理黄土高原生态系统碳库,制定相应政策,实现国家碳达峰与碳中和的目标提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

子午岭地处黄土高原中部偏南位置,为泾河与洛河两大水系的分水岭,总面积约为 2.3 万 km²。属暖温带半干旱、半湿润气候区,多年平均气温 7.4℃,年均降水量 576.7 mm,7—9 月降水量占全年降水总量的 60%以上。土壤类型以灰褐土为主,土层浅薄,山区一般在 1 m 以下,部分地区可达 1.5—2.0 m^[19]。

1866 年以来,子午岭地区经历了 150 多年的自然恢复过程,形成了森林茂密的天然次生林景观,部分地区已经演替到气候顶级阶段,是研究黄土覆盖区植被演替规律的天然场所。林分郁闭度一般在 0.7 以上,主要林分类型包括山杨(*Populus davidiana* Dode.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)和辽东栎(*Quercus wutaishanica* Mary.)等。林下草灌发育,主要灌木种类有白刺花(*Sophora davidii* (Franch.) Skeels.)、黄蔷薇(*Rosa hugonis* Hemsl.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)和绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)等;草本种类主要包括白羊草(*Bothriochloa ischemum* (L.) Keng.)、披针苔草(*Carex lancifolia* C. B. Clarke.)和长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)等。林地枯落物盖度接近 100%,厚度在 2~5 cm^[20]。本研究所指范围即为子午岭在北洛河流域中游的区域(35°13'06"—37°04'02" N,108°11'03"—109°72'05"E),属于典型的黄土高原丘陵沟壑地貌,海拔 598~1 805 m(图 1)。

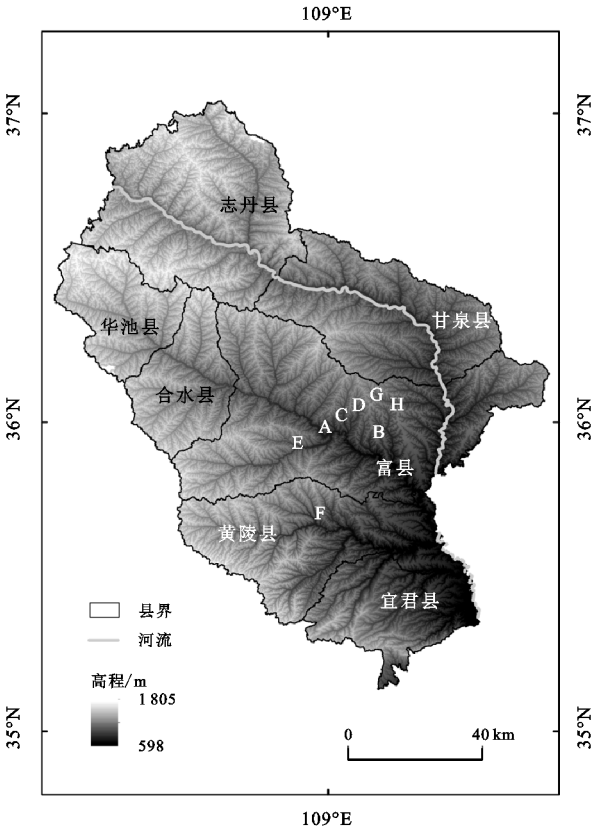
1.2 样地设置与群落调查

据邹厚远等^[19]对子午岭北部近 150 年以来植被演替阶段的调查研究指出,该地区存在完成的植被演替序列,即弃耕地→草本群落→灌丛群落→先锋乔木群落→顶级乔木群落。考虑到草本群落不同恢复时间对群落特征及土壤性质的影响差异,周印东等^[21]将其细分为 2 个阶段,即先锋草本群落和白羊草。此

外,邹厚远等^[19]和雷利平等^[22]研究认为,油松是子午岭地区自然演替的乔木亚顶级阶段,考虑到物种的自身特性及更新条件,油松会逐渐发育为油松—辽东栎混交林,进而向气候顶级辽东栎过渡。基于此,本研究综合考虑了以往研究对子午岭地区 150 年以来 8 个植被演替阶段的划分结果,进行样地设置和野外调查。植物群落的正向演替顺序依次为:坡耕地(0 年)^[19]、撂荒 10 年草地(10 年)^[19]、撂荒 20 年草地(20 年)^[19]、白刺花(30—50 年)^[19]、白桦(70 年)^[19]、油松(120 年)^[19,22]、油松—辽东栎混交林(135 年)^[22]和辽东栎(150 年)^[19,22]。

富县与黄陵县处于北洛河流域中游子午岭核心区,在植被演替过程中具有很好的代表性。2020 年 9 月 2—30 日在设置的 26 块坡位和海拔等立地条件基本相似,处于 8 个不同演替阶段的典型植被类型标准样地内开展了群落特征调查(图 1 和表 1)。这些样地处于相似的降雨、温度和海拔等立地条件下,样地植被与土壤有机碳的关系受空间距离等的影响较弱,与已有研究^[12-13,22]表述一致。利用奥维互动地图软件(版本:8.9.3)获取了样地的地理位置、坡位、坡向和海拔等环境因子信息,基于样带法实测了林分郁闭度和密度。乔木、灌木和草本样方大小依次为 20 m×20 m,10 m×10 m 和 1 m×1 m。分别对标准样地内的乔木或灌木树种选取 3 个典型株,测量树高和胸径(基径),并对林下主要草本种类进行调查记录。草本群落方面,选取 3 个典型小样方进行盖度调查。文章在对比

不同演替阶段数据时,采用同一阶段阴阳坡数据的平均值。在对比不同土地利用类型数据时,2 个撂荒草本群落均值代表草地,4 个乔木群落均值代表乔木。



注:A、B、C、D、E、F、G、H 分别为农地、撂荒 10 年草地、撂荒 20 年草地、白刺花、白桦、油松、辽东栎—油松混交林、辽东栎。下同。

图 1 子午岭地区野外植被调查样地空间分布

表 1 子午岭地区野外植被调查样地基本信息

演替阶段及 样地数量	坡位	坡度/ (°)	海拔/m	郁闭度/ 盖度/%	林分密度/ (株·hm ⁻²)	树高/m	胸径 (基径)/cm	林下主要 灌草种类
农地(玉米)(2 块)	中下坡位	19~22	981~987	—	—	—	—	莖菜、冰草
撂荒 10 年草地(2 块)	上坡位	24~25	1212~1215	87~96	—	—	—	白羊草、胡枝子、白莲蒿
撂荒 20 年草地(2 块)	中坡位	6~8	994~1021	60~90	—	—	—	胡枝子、艾草、龙牙草、芒草
白刺花(2 块)	中坡位	10~30	1028~1169	33~40	1500~3967	1.05~1.58	1.8~7.74	披针苔草、车前草、白莲蒿、艾草
白桦(6 块)	中坡位	19~30	1030~1131	53~81	661~2818	10.7~13.9	9.4~16.1	龙牙草、胡枝子、牛筋草、艾草
油松(6 块)	中坡位	23~35	1096~1122	78~83	1224~3112	12.3~22.5	15.1~32.8	披针苔草、白蒿、胡枝子、芒草
辽东栎—油松混交林(3 块)	中坡位	13~25	1160~1246	75~86	1202~1678	9.3~11.2	16.9~19.9	白羊草、胡枝子
辽东栎(3 块)	中坡位	16~20	1146~1240	71~83	1211~1696	12.4~13.4	10.8~24.2	披针苔草、胡枝子

1.3 土壤样品采集与有机碳含量测定

经过较为全面的野外勘察和调研走访之后,于 2020 年 9 月 2—30 日在所选样地坡面植被长势良好,分布比较均一的地段设置标准样地,选择优势种代表性株 2 株,距离树干顺坡方向 1 m 处^[9],开挖 2 个土壤剖面。分 3 层即 0—5,5—20,20—40 cm 分别取样,每层共计 4 个重复。利用 100 cm³ 环刀分层采集原状土,并逐层采集散状土,每层保证多点混合取样,然后装入已编号的塑封袋中。

将野外采集的土壤样品带回室内,平摊在纸上,将样品中的侵入物(枯落物、植被根系、石砾和土壤动物粪便等)全部剔除。保证土壤样品充分混合均匀,放置在室内通风处,以待阴干(大约 7 天),经过研磨、过筛(2 mm 孔径)和称重。于 2020 年 12 月 14—17 日采用重铬酸钾外加热法测定样品土壤有机碳含量,计算了土壤有机碳含量,采用环刀法测定了土壤容重。

1.4 土壤有机碳密度计算

土壤有机碳储量通过土壤有机碳密度来评价^[7]。

计算过程为:

某一土层 i 中储存的土壤有机碳密度 SOC_i (kg/m^2) 的计算公式

$$SOC_i = C_i D_i E_i (1 - G_i) / 10$$

式中: SOC_i 为土壤有机碳密度 (kg/m^2); C_i 为土壤有机碳含量 (%); D_i 为土壤容重 (g/cm^3); E_i 为土层厚度 (cm); G_i 为直径 $> 2\text{ mm}$ 的石砾占土壤样品体积的百分比 (%)。

当某一土体剖面包括 k 层土壤, 则可以通过公式计算该剖面的土壤有机碳密度 SOC_i 。

$$SOC_i = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k C_i D_i E_i (1 - G_i) / 10$$

传统上都是根据 1 m 深的土层厚度来估算土壤有机碳储量^[7], 本研究是根据子午岭地区土层浅薄的客观实际, 基于野外实测的土壤剖面深度 (0—40 cm) 来计算。

1.5 枯落物蓄积量调查

野外植被群落调查期间, 在坡面标准样地内随机选取了 3 个 $31.7\text{ cm} \times 31.7\text{ cm}$ 的枯落物小样方, 收集枯落物样品至塑封袋中, 避免挤压破坏叶片结构。将枯落物样品平铺放置在室内通风处, 自然风干大约 3 天后称重, 即可计算出各林分类型单位面积内枯落物的蓄积量 (t/hm^2)。本研究使用的白刺花和草地枯落物蓄积量数据参考栾莉莉等^[23]与汪建芳等^[24]在延安市安塞水土保持实验站和野外调查的研究结果。同一植被类型选择 2~6 块样地, 每块地随机布设 3 块枯落物样方, 数据具有代表性。

1.6 植被根系生物量测定

乔灌木群落, 在土壤剖面附近且距离典型株主干 0.5 m 左右的地方进行根系采集, 草本群落和农地则选取植被长势较为均一的地段采集根系, 以降低空间异质性导致的误差。首先, 贴地表剪除了地上全部植被并清除了地表枯落物, 然后利用直径 7 cm、高 20 cm 的根钻分 3 层即 0—5, 5—20, 20—40 cm 取样, 每层包括 4 个重复。鉴于细根 (直径 $\leq 2\text{ mm}$) 具有提高净初级生产力和重要的土壤养分归还功能^[25], 因此本研究主要针对细根开展生物量的测定。2020 年 9 月 2 日至 10 月 10 日, 将样品放置在孔径为 0.2 mm 的土壤筛中进行根系的冲洗, 所有挑选出的细根分别装在纸袋中, 在 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干 48 h 直至恒重, 借助天平称重后即可计算样地的根系生物量。

1.7 数据处理

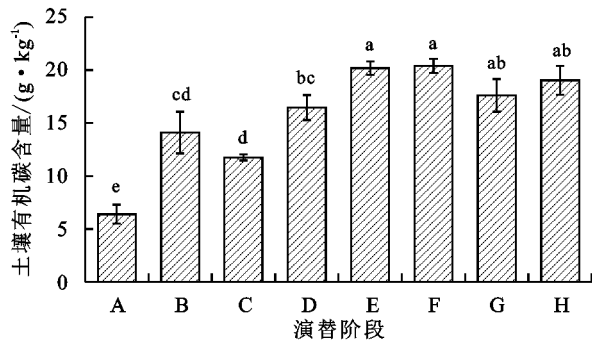
采用 One-way ANOVA 法和最小显著差异法 (LSD) 检验不同演替序列中土壤有机碳含量、储量、枯落物储量和细根生物量等方面的差异 ($\alpha = 0.05$)。相关性分析中, 细根生物量与枯落物储量为 0—40 cm 数据。各数据均使用 Microsoft Excel 2010 和

SPSS 26.0 软件处理, 使用 Origin 8.6 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳平均含量随植被演替变化

通过对不同演替阶段研究样地 3 个土层深度的土壤有机碳含量进行加权平均计算, 得到 0—40 cm 土层深度的土壤有机碳平均含量。由图 2 可知, 从农地演替到气候顶级辽东栎阶段, 土壤有机碳平均含量整体呈现出增加的变化趋势, 其中以坡耕地到草本群落阶段的增加最为突出且表现出显著差异。乔木阶段表现为波动持稳的状态, 说明在该阶段土壤有机碳含量已经达到最大恢复潜力。乔木群落白桦、油松、辽东栎—油松混交林和辽东栎与撂荒 10, 20 年草本群落的土壤有机碳平均含量存在显著性差异 ($P < 0.05$), 草本群落与坡耕地也表现为差异显著 ($P < 0.05$), 表明植被演替促进了土壤有机碳含量的增加。坡耕地土壤有机碳平均含量最小, 为 $6.4\text{ g}/\text{kg}$; 油松阶段达到峰值, 为 $20.4\text{ g}/\text{kg}$, 油松为坡耕地的 3.2 倍。



注: 土层深度为 0—40 cm; 图柱上方不同小写字母表示同一土层不同植被类型间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一植被类型不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 2 植被演替不同阶段土壤有机碳加权平均含量

2.2 不同土层土壤有机碳含量随植被演替变化

由图 3 可知, 不同土层土壤有机碳含量随植被演替总体表征为增加的趋势, 0—5 cm 土层增加幅度最大。不同演替阶段同一土层对比来看, 0—5 cm 土层, 乔木群落白桦、油松、辽东栎—油松混交林、辽东栎与灌木群落白刺花和撂荒 20 年草本群落的土壤有机碳含量总体上存在显著性差异, 坡耕地与乔木、灌木和草本群落差异均显著 ($P < 0.05$), 该土层土壤有机碳含量在乔木阶段达到稳定状态, 可能受林地凋落物生物质碳输入的影响; 5—20, 20—40 cm 土层, 坡耕地、撂荒草地土壤有机碳含量与其他阶段差异显著 ($P < 0.05$) (图 3)。植被演替对各土层土壤有机碳含量均有改善, 比较而言, 乔灌林地对深层土壤改善作用大于草地和农地。同一演替阶段不同土层对比来看, 除坡耕地外, 其他 7 个演替阶段 0—5 cm 土层土壤有机碳含量与其他 2 个土层差异显著 ($P < 0.05$)。与 0—5 cm 土层比较,

5—20,20—40 cm 土层土壤有机碳含量减少幅度分别为 28.3%~66.6%和 35.8%~81.3%(图 3)。

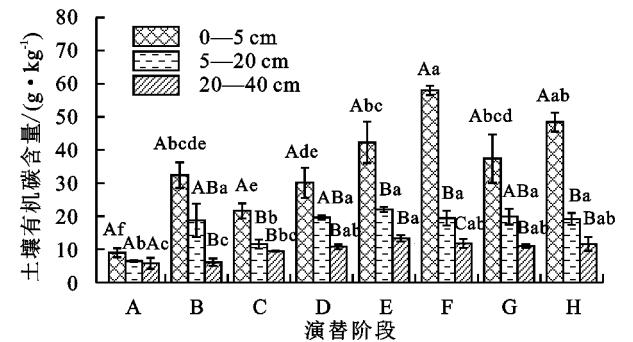


图3 植被演替不同阶段不同土层土壤有机碳含量

2.3 不同土层土壤有机碳储量随植被演替变化

由图4可知,不同土层土壤有机碳储量随植被演替表现出波动增加的变化特征。坡耕地 0—40 cm 土层土壤有机碳储量与其他 7 个演替阶段差异显著($P<0.05$);撂荒 20 年草地与白刺花差异不显著,除白桦外,其他 3 个乔木群落与白刺花和撂荒 10 年草地差异总体不显著,说明林地和草地对 0—40 cm 土层土壤有机碳储量的增加作用差异不明显。0—5 cm 土层,坡耕地与乔木、灌木和草本群落土壤有机碳储量差异显著($P<0.05$),表明植被恢复有助于提高土壤碳库;5—20,20—40 cm 土层,坡耕地与撂荒草地土壤有机碳储量整体上与其他阶段差异显著($P<0.05$),这表明土层越深,乔木林地的土壤固碳能力越优于草地和农地。

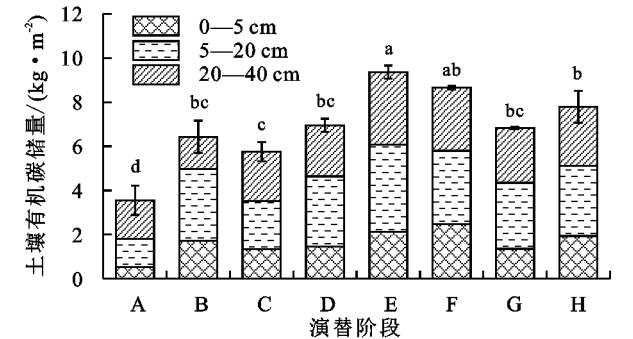
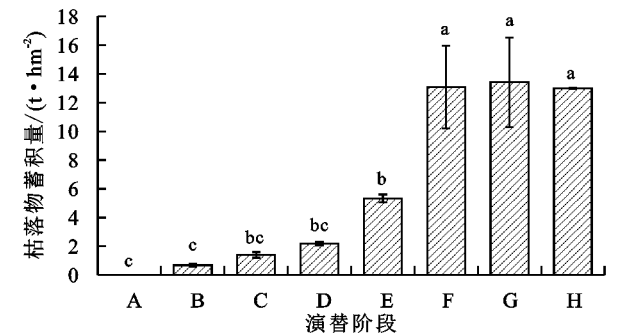


图4 植被演替不同阶段不同土层土壤有机碳储量

将研究区 8 个植被演替阶段土壤有机碳储量按照土地利用类型进行归类,分析表明农地与草地、灌木和乔木差异显著($P<0.05$),土壤有机碳储量分别在草地和乔木类型得到了显著性增加($P<0.05$)。与农地相



比,草地和灌木分别增加了 71.5%和 95.7%,乔木增加最为显著(129.7%)(图 5),说明林地较草地土壤固碳功能更加突出。

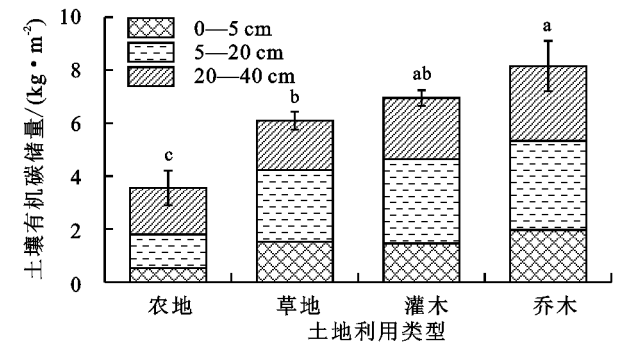


图5 不同土地利用类型土壤有机碳储量

对比不同土地利用类型不同土层土壤有机碳储量百分比,可以看出,从农地到草地,0—5,5—20 cm 土层土壤有机碳储量表现出明显增加的变化趋势,从草地到灌木和乔木类型,则呈现出显著减少的变化特征;20—40 cm 土层土壤有机碳储量则表征为先显著减少后缓慢增加的变化特征(表 2)。乔灌木林地 0—20 cm 土层土壤有机碳储量占比的下降主要受土壤容重降低所影响,而 20—40 cm 土层占比的提高得益于植被恢复促进了土壤有机碳含量的增加。

表2 子午岭地区不同土地利用类型不同土层土壤有机碳储量百分比 单位: %

土地利用类型	0—5 cm 土层	5—20 cm 土层	20—40 cm 土层
农地	15.0	35.6	49.3
草地	25.0	44.5	30.5
灌木	21.0	45.8	33.3
乔木	24.2	41.2	34.6

2.4 土壤有机碳储量变化的植被影响因素分析

由图6可知,研究区农地无枯落物蓄存,乔木分别是灌木和草地的 5.1,10.8 倍。油松、辽东栎—油松混交林、辽东栎与其他植被类型枯落物蓄积量差异显著($P<0.05$),白桦与撂荒 10 年草地、农地差异显著($P<0.05$)。白桦以前,白刺花与撂荒草地、农地枯落物蓄积不明显,表明枯落物的蓄存很大程度上受恢复阶段及相应植被类型的影响。

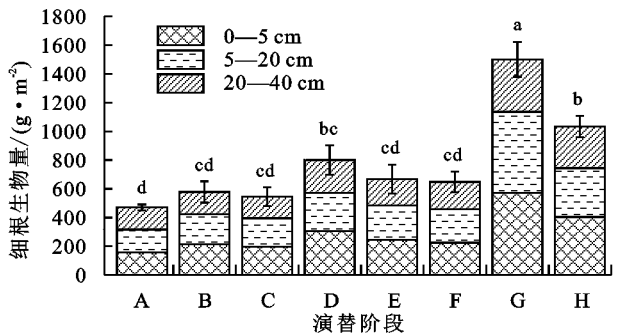


图6 植被演替不同阶段枯落物蓄积量与细根生物量

从农地到乔木阶段,0—40 cm 土层总细根生物量和不同土层细根生物量均呈现出增加的变化趋势。辽东栎—油松混交林、辽东栎总体与其他植被类型差异显著($P<0.05$)。与农地相比,草地、灌木和乔木总细根生物量分别增加了 19.2%,69.9%和 99.5%,植被演替促进了细根生物量的提高,但不同植被类型间的差异与其生物学特性密切相关。

将 8 个植被演替阶段的枯落物蓄积量和细根生物量分别与 0—40 cm 土层土壤有机碳储量进行回归分析发现,二者相关系数分别为 0.580 3 和 0.248 5,

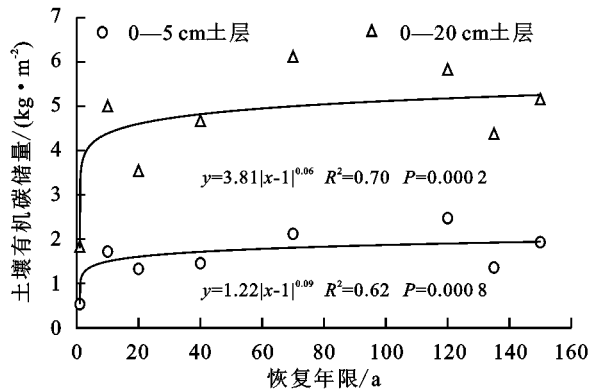


图 7 土壤有机碳储量与恢复年限耦合关系及不同土层土壤有机碳相关关系

0—5,0—20 cm 土层与 0—40 cm 土层土壤有机碳储量相关性分析表明,二者均存在极显著的线性相关关系($P<0.001$),相关系数分别为 0.87 和 0.94(图 7),说明不同土层土壤固碳功能均有呈植被演替增加的趋势。

3 讨论

3.1 土壤有机碳含量及储量对植被演替过程的响应

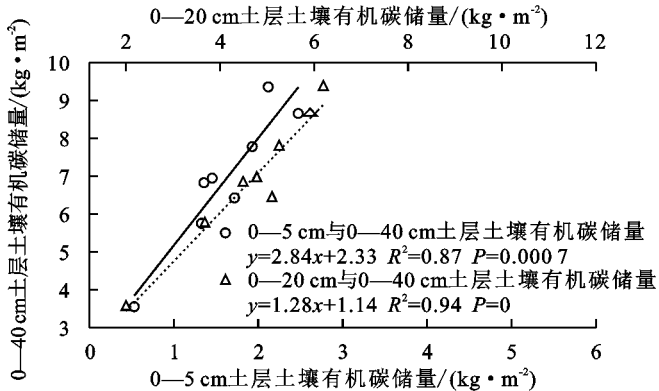
子午岭地区经过 150 年左右的自然恢复过程,土壤有机碳含量及其储量得到了明显蓄积,表现为演替前期增加快速,后期趋向稳定的变化特征,这与已有研究^[12,26]结果基本相似,表明植被恢复具有显著的土壤碳汇功能^[14],有助于应对全球 CO₂ 排放压力。与农地相比,草地和乔木阶段土壤有机碳储量增加显著($P<0.05$),表现出 2 个明显的跃变期。草地与乔木差异显著($P<0.05$),受演替前期草地净初级生产力与枯落物、植被根系输入量少,而演替后期乔木大量枯落物和细根生物量输入,较高的林地郁闭度以及枯落物覆盖导致相对较低的土壤温度及较弱的分解速率的影响^[11]。黎鹏等^[11]对陕西延安市安塞区退耕 5 年的不同恢复植被类型土壤有机碳储量的对比分析表明,0—20 cm 土层表现为刺槐优于撂荒草地,这与本研究得出的乔木大于草地的结论一致。

撂荒 10 年草地土壤有机碳储量较 20 年草地偏高,可能由于前者较多的植被细根生物量输入、较高海拔导致相应较弱的土壤呼吸作用的影响(图 6,表

表明枯落物较细根生物量更有利于增加土壤有机碳储量,但土壤有机碳储量的增加还可能受到其他因素(如根系分泌物和微生物等)的影响。

2.5 不同土层土壤有机碳储量的相关性分析

由图 7 可知,8 个植被演替阶段下 0—5,0—20 cm 土层土壤有机碳储量与恢复年限均存在极显著的幂函数关系($P<0.001$)。土壤有机碳储量表现为在草地阶段迅速增加,灌木阶段缓慢增加,乔木阶段基本达到稳定的变化特征,表明研究区植被恢复的土壤碳汇效应并非线性的,土壤固碳潜力存在一定的阈值。



1)。灌木群落白刺花较高的枯落物蓄积量和细根生物输入量,导致土壤有机碳储量较草地偏高。同理,这些植被因素也是导致白刺花土壤有机碳储量低于乔木群落的主要原因(图 6)^[11]。乔木群落不同演替阶段对比来看,白桦林地土壤有机碳储量最高(9.4 kg/m²),其次为油松林地(8.7 kg/m²)与辽东栎林地(7.8 kg/m²),辽东栎—油松混交林地最低(6.8 kg/m²)。这可能由于白桦与油松林地的土壤异养呼吸速率较辽东栎—油松混交林地偏低,导致其碳汇功能相对较高^[5]。

陆地生态系统的土壤碳汇功能与土地利用方式紧密相关^[4,16-17]。本研究认为,土地利用方式变化驱动下植被类型的转变以及恢复时间的长短是导致子午岭地区不同植被演替阶段土壤有机碳储量存在差异的主要原因。研究区乔木林地碳汇能力最高,其次是灌木、草地,农地最低(图 5)^[14]。不同土层土壤有机碳储量均呈现出增加的变化趋势,0—5 cm 土层增加最为明显,其次为 5—20,20—40 cm 土层,存在明显的表聚效应(表 2),这与许明祥等^[9]、韩新辉等^[10]和姚小萌^[12]得出的研究结果一致。0—5,5—20 cm 土层土壤有机碳储量表现为草地阶段迅速增加,灌木阶段缓慢增加,乔木阶段基本达到稳定的变化特征。恢复初期由于草本群落生物多样性的增加和地上、地下生物质碳的输入,减轻了土壤侵蚀程度,导致土壤有机碳含量迅速增加;乔木阶段尽管受枯落物的大量

输入以及植被根系的共同影响(图 6)^[17-18],但由于植被根系和微生物呼吸作用的加强,故土壤有机碳储量增加不明显^[14]。在 20—40 cm 土层,草地土壤有机碳储量增加不明显(5.9%),灌木和乔木则分别增加了 32.1%和 61.2%。由于草地根系较浅,底层土壤的固碳效果较弱,而乔木和灌木属于深根植物,对 20—40 cm 土层影响也比较明显^[10]。另外土壤微生物和土壤动物等^[17]也是引起不同次生演替阶段、不同土层深度土壤有机碳储量差异的原因。整个演替过程中,0—20 cm 土层与 0—40 cm 土层土壤有机碳储量存在极显著的线性相关关系($P<0.001$),这与黎鹏等^[11]对黄土高原半干旱地区植被恢复措施下不同土层土壤有机碳储量相关性分析的研究结果相一致。

3.2 植被演替过程中土壤有机碳储量估算的意义

通过评价子午岭地区次生植被演替的土壤碳汇效应,有利于明晰不同演替阶段各植被类型的土壤固碳功能,促进科学、有效管理黄土高原生态系统碳库,提高土壤固碳潜力,为实现国家双碳目标提供基础数据支撑和理论依据。陆地生态系统碳储量的增加应从增加输入量、减少输出量以及增加稳定性等几个角度来考虑。考虑陆地自然带的分布规律,遵循植被自然演替规律是增加碳素输入,提高土壤碳汇能力的前提^[15]。合理调整土地利用方式,恢复退化土地,进而提高植被生产力。针对不同的土地利用方式,应采取适宜的固碳策略^[16,26]。农田生态系统方面,推广免耕,实施秸秆还田;促进草地生态系统自然演替,保护现有草场面积、因地制宜实施轮封轮牧、禁牧;保护天然次生林,营造混交林,提高森林覆盖率,抚育管理人工林,减少对枯落物的扰动^[13,20]。减轻水土流失和碳的淋溶损失,增加贴地表盖度以降低土壤温度,进而减少土壤呼吸,以降低土壤碳素的输出^[17]。

4 结论

(1)子午岭地区 150 年次生植被演替过程明显提高了土壤有机碳含量和储量,碳汇效应显著。与灌木和草本群落相比较,演替后期乔木群落土壤固碳功能更强。不同土层土壤的固碳能力均随植被恢复呈现出增加的变化趋势,土壤有机碳存在明显的表层富集现象。

(2)枯落物蓄积量和细根生物量的增加,有利于提高土壤碳汇功能。土壤碳素输入和土壤碳素输出共同影响着土壤碳储量的变化,林地枯落物应当受到保护。

(3)植被恢复有利于土壤有机碳的保护,研究结果有助于促进黄土高原地区植被自然恢复和长期演替,以提高土壤的固碳潜能。

致谢:感谢陕西省延安市吴起县吴起高级中学冯学慧和吴起镇林业站白云斌,以及课题组贺洁、邹亚东、薛帆在野外植被调查和土壤采样提供的帮助。感谢北京师范大学程卓在文章修改过程中的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Post W M, Emanuel W R, Zink P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J].*Nature*,1982,298:156-159.
- [2] 张杰,李敏,敖子强,等.中国西部干旱区土壤有机碳储量估算[J].*干旱区资源与环境*,2018,32(9):132-137.
- [3] Sedjo R A. The carbon cycle and global forest ecosystem [J].*Water Air and Soil Pollution*,1993,70(1):295-307.
- [4] 张春华,王莉媛,宋茜薇,等.1973—2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化[J].*中国环境科学*,2018,38(12):4678-4686.
- [5] 孙美美,宋变兰,时伟宇,等.黄土丘陵区刺槐、辽东栎林生态系统碳汇功能特征[J].*水土保持研究*,2020,27(2):55-61.
- [6] 夏学齐,杨忠芳,余涛,等.中国东北地区 20 世纪末土地利用变化的土壤碳源汇效应[J].*地学前缘*,2011,18(6):56-63.
- [7] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].*土壤学报*,2004,41(1):35-43.
- [8] 惠婷婷.我国天保工程造林碳汇潜力研究[D].北京:北京林业大学,2012.
- [9] 许明祥,刘国彬.黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变[J].*植物营养与肥料学报*,2004,10(1):40-46.
- [10] 韩新辉,佟小刚,杨改河,等.黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J].*农业工程学报*,2012,28(12):223-229.
- [11] 黎鹏,张勇,李夏浩祺,等.黄土丘陵区不同退耕还林措施的土壤碳汇效应[J].*水土保持研究*,2021,28(4):29-33.
- [12] 姚小萌.子午岭植被恢复下土壤碳库演变特征及影响机理研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [13] Fu X L, Shao M A, Wei X R, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China [J].*Geoderma*, 2010,155:31-35.
- [14] 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[J].*水土保持研究*, 2021,28(3):53-58.
- [15] 薛志婧,马露莎,安韶山,等.黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量[J].*生态学报*,2015,35(9):2917-2925.
- [16] 邱莉萍,张兴昌,程积民.土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J].*中国环境科学*,2009,29(1):84-89.
- [17] Nie X A, Yang L C, Li F, et al.Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the alpine shrubland in the Three Rivers Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau [J].*Catena*,2019,178:154-162.

- ception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawaii[J].Agricultural and Forest Meteorology,2010,150(2):265-275.
- [23] 马昌坤.黄土高原人工刺槐林地生态水文过程研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [24] Barbier S, Balandier P, Gosselin F. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: A review[J].Annals of Forest Science, 2009,66(6):e602.
- [25] Dong L L, Han H R, Kang F F, et al. Rainfall partitioning in Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) stands at three different ages[J].Forests,2020,11(2):e243.
- [26] Muzyło A, Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning in a deciduous forest plot in leafed and leafless periods[J].Ecohydrology,2012,5(6):759-767.
- [27] 田娜,古君龙,杨新国,等.中间锦鸡儿冠层降雨再分配特征[J].干旱区研究,2019,36(4):854-862.
- [28] Shachnovich Y, Berliner P R, Bar P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone[J].Journal of Hydrology, 2008,349(1/2):168-177.
- [29] 邓文平,郭锦荣,邹芹,等.庐山日本柳杉林下穿透雨时空分布特征[J].生态学报,2021,41(6):2428-2438.
- [30] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community[J].Journal of Arid Environments,2004,58(2):181-202.
- [31] 李衍青,张铜会,赵学勇,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛降雨截留特征研究[J].草业学报,2010,19(5):267-272.
- [32] 刘章文,陈仁升,宋耀选,等.祁连山典型灌丛降雨截留特征[J].生态学报,2012,32(4):1337-1346.
- [33] Su L, Zhao C M, Xu W T, et al. Hydrochemical fluxes in bulk precipitation, throughfall, and stemflow in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest[J].Forests,2019,10(6):e507.
- [34] 孙素琪,王玉杰,王云琦,等.缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入[J].环境科学,2014,35(3):1081-1090.

(上接第 165 页)

- [18] 赵宽,吴沿友.根系分泌的有机酸及其对喀斯特植物、土壤碳汇的影响[J].中国岩溶,2011,30(4):466-471.
- [19] 邹厚远,刘国彬,王晗生.子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J].西北植物学报,2002,22(1):1-8.
- [20] 许小明,邹亚东,孙景梅,等.黄土高原北洛河流域主要林地枯落物特征及水分吸持效应[J].生态学报,2021,43(13):5153-5165.
- [21] 周印东,吴金水,赵世伟,等.子午岭植被演替过程中土壤剖面有机质与持水性能变化[J].西北植物学报,2003,23(6):895-900.
- [22] 雷利平,王孝安,郭华,等.子午岭地区辽东栎和油松林建群种的更新生态位宽度分析[J].西北植物学报, 2007,27(7):1446-1453.
- [23] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):48-53.
- [24] 汪建芳,王兵,王忠禹,等.黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J].水土保持学报,2018,32(4):139-144.
- [25] 肖胜生,方少文,杨洁,等.水土流失区植被恢复过程中土壤碳汇的形成机理[J].中国水土保持,2011(12):25-28.
- [26] Deng L, Wang K B, Chen M L, et al. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China [J].Catena,2013,110:1-7.

(上第 172 页)

- [19] Zhang B Q, He C S, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China [J].Science of the Total Environment,2016,539:436-449.
- [20] Shen M G, Piao S L, Jeong S J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth [J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2015,112(30):9299-9304.
- [21] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J].Water Resources Research,2008,44(3):893-897.
- [22] 邵蕊.黄土高原大规模植被恢复的区域蒸散耗水规律及其生态水文效应[D].兰州:兰州大学,2020.
- [23] Zhang M, Yuan X. Crucial role of natural processes in detecting human influence on evapotranspiration by multisource data analysis [J].Journal of Hydrology, 2020,580(3):e124350.
- [24] 郭晓彤,孟丹,蒋博武,等.基于 MODIS 蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析[J].水文地质工程地质,2021,48(3):45-52.
- [25] 张宝庆,邵蕊,赵西宁,等.大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J].应用基础与工程科学学报, 2020,28(3):594-606.