

河北坝上地区植被恢复的土壤碳水效应

梁潇瑜, 信忠保, 刘山宝, 沈晗悦

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 坝上地区植被恢复影响土壤水分和土壤有机碳含量, 从而影响区域水源涵养和土壤固碳能力。为了保证植被恢复的可持续性, 确定该地区土壤水分和有机碳对植被的响应对于维护生态系统的稳定具有重要意义。以林地、灌木、农地、草地为研究对象, 研究 0—200 cm 土壤水分和有机碳的垂直分布特征, 并确定影响其变化的驱动因素。结果表明: (1) 与草地相比, 植被恢复导致深层土壤水分亏缺, 林地和灌木深层 (120—200 cm) 土壤水分亏缺效应分别为 -0.23 ± 0.08 和 -0.16 ± 0.05 ; (2) 与草地相比, 植被恢复增加固碳效应, 且随着土层深度的增加而增加; (3) 对照草地的碳水耦合协调度始终显著高于其他植被类型 ($p < 0.05$), 且始终属于碳水平衡状态; 而林地和灌木浅层土壤 (0—60 cm) 属于碳水协调状态, 但深层 (120—200 cm) 碳水耦合协调度仅分别为 0.54 ± 0.03 和 0.57 ± 0.04 , 处于失调状态。 (4) 土地利用对深层 (120—200 cm) 土壤有机碳和土壤水分的变化更加重要, 而土壤质地是影响整个土壤剖面变化的稳定因素。研究认为该区域植被恢复固碳效应的增加是以深层土壤水分亏缺为代价, 碳水失调影响区域生态恢复的可持续性。

关键词: 植被恢复; 土壤含水量; 土壤有机碳; 碳水耦合; 坝上高原

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0206-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.026

The Coupling Interaction of Soil Organic Carbon and Soil Water of Vegetation Restoration in Bashang Area of Hebei

LIANG Xiaoyu, XIN Zhongbao, LIU Shanbao, SHEN Hanyue

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Vegetation restoration affects soil water content and organic carbon, as well as water conservation and soil carbon sequestration capacity in Bashang region. To ensure the sustainability of vegetation restoration, it is critical to determine the response of soil water content and organic carbon to vegetation restoration for maintaining the ecosystem stability. In this study, the vertical distribution characteristics of soil water and organic carbon in 0—200 cm depths were studied in different vegetation types, including forestland, shrub, farmland and grassland, and the driving factors affecting their variations were also studied. The results showed that: (1) Compared with grassland, vegetation restoration resulted in deep layer soil water deficit, and the deep layer soil water deficit of forestland and shrub was -0.23 ± 0.08 and -0.16 ± 0.05 , respectively. (2) Compared with grassland, vegetation restoration increased the soil carbon sequestration, and the soil carbon sequestration effect increased with depth. (3) The carbon-water coupling coordination degree of control grassland was significantly higher than that of other vegetation types ($p < 0.05$), and was always in carbon-water coordination state. The shallow layer (0—60 cm) of forestland and shrub was in a carbon-water coordination state, while the deep layer (120—200 cm) soil carbon-water coordination degree was only 0.54 ± 0.03 and 0.57 ± 0.04 , respectively. (4) Land use was more important for deep layer (120—200 cm) soil organic carbon and soil water variations, while soil texture was a stable factor affecting their variations in the whole soil profile (0—200 cm). It is concluded that the improvement of carbon sequestration effect of vegetation restoration was at the cost of deep soil water deficit, the imbalance of carbon and water could affect the sustainability of regional ecological restoration.

收稿日期: 2022-04-19

资助项目: 第二次青藏高原综合考察研究项目 (2019QZKK0608); 国家自然科学基金项目 (42177319); 中央高校基本科研业务费专项 (2017ZY02)

第一作者: 梁潇瑜 (1996—), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事生态水文学研究。E-mail: liangxiaoyu855@126.com

通信作者: 信忠保 (1978—), 男, 山东临沂人, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持原理。E-mail: xinzhongbao@126.com

Keywords: vegetation restoration; soil water content; soil organic carbon; the coupling of carbon-water; Bashang area

植被恢复是控制水土流失、防风固沙,以及提升土壤固碳能力的重要措施,一定程度上有利于退化生态系统的恢复^[1]。植被可以影响土壤水分消耗和土壤固碳功能,在半干旱地区,土壤水分是植被恢复和固碳的必要条件^[2]。近年来,国内外关于造林引起的土壤水分和土壤碳固存变化已有较多研究。Persson等^[3]研究发现,过去几十年的植被恢复已经明显增加了碳固存。但是,植被恢复增加固碳量的同时造成土壤水分亏缺,且在深层土壤水分亏缺更显著^[4]。杨磊等^[5]通过对半干旱黄土丘陵区不同植被土壤水分对比研究发现,植被的增加导致严重的土壤水分枯竭,并造成深层土壤干化。长久以来,植被恢复不仅造成深层土壤水分的亏缺,而且威胁到有机碳固存^[6]。目前,土壤蓄水量的下降已成为植被恢复的主要障碍^[7]。自20世纪80年代起,坝上高原作为三北防护林工程的重点建设区,已经建成大规模的人工林。近年来,人工林已经频繁出现退化现象,严重威胁生态系统的稳定性^[8]。土壤水分是半干旱地区植被恢复的主要限制性因子^[9],且土壤水分和土壤有机碳有着复杂的耦合关系。以往的研究往往集中于土壤水分或土壤有机碳单一过程对植被的响应,而针对碳水耦合效应对植被恢复的响应研究较少。

本研究以天然草地为对照,比较不同植被类型(林地、灌木、农地)的土壤水分亏缺和土壤固碳能力,探究其变化的影响因素。此外,还构建土壤碳水耦合协调度模型,以探讨植被恢复下水源涵养与固碳的权衡和协同关系,科学认识该区域植被恢复的土壤碳水驱动机制,为坝上高原植被建设和生态系统的稳定性和可持续性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验研究样地位于河北省张北县小二台林场(40°57′—41°34′N,114°10′—115°27′E),林场面积6 km²。该地区为半干旱气候,年平均降水量约400 mm,年平均气温3.2℃,年平均日照时间2 897.8 h,海拔1 750 m,年平均有效积温2 448℃,无霜期90~110天。主要土壤类型为栗钙土类,砂粒含量高。当地天然草地为顶级植被,草本植物丰富,主要分为盐渍化滩地蒿类、低洼地草甸类以及坡梁地禾本类^[10]。自三北防护林工程建设以来,现主要土地利用类型有小叶杨(*Populus simonii* Carr)林地、自然更新杨树灌木、人工更新樟子松灌木和农地等类型。

1.2 采样与测定方法

在2017年8月选取不同植被类型的样地(20 m×20 m),林地样地为典型小叶杨(*Populus simonii* Carr)(>30年),灌木样地为自然更新的小叶杨灌木,采样农地长期耕作,为雨养旱作管理模式,种植作物为土豆,采用单作模式,一年一熟制,并以当地顶级草地植被作为对照。为增强空间代表性,降低空间异质性,在研究区内均匀分布69个样地,包括35个林地样地、15个农地样地、13个灌木样地、6个对照草地样地。各样地的地形因子基本一致,在每个样地进行土壤采样,采用土钻法结合烘干法,以10 cm为间隔取样,共2 m深。每个土壤层收集3个重复样品,在105℃烘箱干燥至恒定质量期间的质量损失确定重量土壤含水量。为进行后续的分析比较,根据土壤水分变化的规律,将土层分为浅层(0—60 cm)、中层(60—120 cm)和深层(120—200 cm)。(1)浅层(0—60 cm):该层受降雨和蒸发的影响较大,受外界因素影响剧烈;(2)中层(60—120 cm):土壤水分含量的变异性低于浅层,降雨和蒸发影响中等;(3)深层(120—200 cm):该层受降雨影响较小,深度变化相对稳定。在每个样地取扰动土壤样品风干并通过2 mm筛,然后用激光衍射粒度分析仪(Malvern Mastersizer—2000)来测定土壤质地,计算黏粒含量(<0.002 mm)、粉粒含量(0.002~0.05 mm)和砂粒含量(0.05~2 mm)。此外,在不同深度(0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60,60—80,80—100,100—120,120—160,160—200 cm)采集扰动土壤样品。将所有扰动土样自然风干后过0.25 mm筛,使用重铬酸盐氧化法测定土壤有机碳含量。

1.3 统计分析

以草地为对照,不同植被类型(林地、灌木和农地)的土壤水分亏缺效应(soil water deficit, SWD)和土壤固碳效应(soil organic carbon sequestration, SCS)来评估不同植被恢复方式对土壤水源涵养和固碳能力的影响。计算方法为:

$$SWD_{j,k} = \frac{SWC_{j,k} - SWC_{0,k}}{SWC_{0,k}} \quad (1)$$

$$SCS_{j,k} = \frac{SOC_{j,k} - SOC_{0,k}}{SOC_{0,k}} \quad (2)$$

式中:SWC_{j,k}、SWC_{0,k}、SOC_{j,k}、SOC_{0,k}分别为第k个土层第j种植被类型和对照草地的土壤水分含量(%)和土壤有机碳含量(g/kg)。

耦合度模型是度量不同系统与要素之间协调好

坏的定量指标。 X 为不同土层的有机碳含量; Y 为不同土层的土壤水分含量。本研究构建的土壤有机碳和土壤水分的耦合度模型为:

$$C=\left\{\frac{4f(x)g(y)}{[f(x)+g(y)]^2}\right\}^k$$

(3)

式中: C 为土壤碳水耦合度; k 为调节系数,一般情况下, $2\leq k\leq 5$,本研究中 $k=2$ 。耦合度 C 反映当 $f(x)$ 与 $g(y)$ 之和在一定的条件下,土壤水分和土壤有机碳组合协调的数量程度。 $f(x)$ 和 $g(y)$ 为功效函数,其中 $f(x)$ 为土壤有机碳综合评价函数, $g(y)$ 为土壤水分综合评价函数。

$$f(x)=\sum_{i=1}^q ax_i$$

(4)

$$g(y)=\sum_{j=1}^q by_j$$

(5)

式中: i 和 j 分别为土壤有机碳和土壤水分的土层数量; $x_1、x_2、\cdots、x_q$ 为描述有机碳的 q 个指标; $y_1、y_2、\cdots、y_q$ 为描述土壤水分的 q 个指标; a 和 b 分别为各层土壤有机碳和水分的权重; x_i 和 y_i 分别为第 i 层土壤有机碳和第 j 层的土壤水分标准化值,本研究使用极差法的正向指标对数据进行标准化。

由于耦合度难以全面反映土壤碳水的整体功效和协同效应,为了进一步反映土壤碳水相互耦合的协调程度,在耦合度的基础上加入土壤碳水综合调节指数(T),构建了耦合协调度模型^[11]:

$$D=\sqrt{C\times T}$$

(6)

$$T=\alpha f(x)+\beta g(y)$$

(7)

式中: D 为土壤碳水耦合协调度; T 为土壤碳水综合调和指数,反映土壤有机碳和土壤水分的整体协调效应。 α 和 β 为权重,本研究中视土壤有机碳的积累和土壤水分的维持同等重要,二者权重相等,即 $\alpha=\beta=0.5$ 。 D 值越高,表明土壤碳水耦合关系越协调。根据李彬彬^[12]的研究,当 $D<0.6$ 时,碳水耦合失调,反之碳水耦合协调。

描述性统计和差异性分析采用不同植被类型不同土层下的土壤水分、土壤有机碳、土壤水分亏缺效应、土壤固碳效应和土壤碳水耦合协调度,采用单因素方差分析、多重比较,最小显著差异法(least significant difference method, LSD)进行显著性检验($p<0.05$),以上分析都通过 SPSS 23.0 软件完成,图制作通过 Origin 2021 软件完成。此外,基于 Canoco 5.0 的冗余分析计算环境因素对土壤有机碳和土壤蓄水量的相对贡献。

2 结果与分析

2.1 土壤水分对植被恢复的响应

不同植被类型的土壤水分垂直分布有显著差异,林地土壤水分含量随土层深度的增加而降低,对照草

地和农田土壤水分含量随土层深度的增加而增加(图 1)。总体来看,在 0—200 cm 剖面上,不同植被类型的平均土壤水分含量有显著性差异,其中农田和对照草地的平均土壤含水量显著高于林地和灌木(图 2)($p<0.05$)。与对照草地($11.9\pm 0.24\%$)相比,林地和灌木的平均土壤含水量为($9.94\pm 0.16\%$)和($10.31\pm 0.27\%$),分别降低 16.4%和 13.4%。

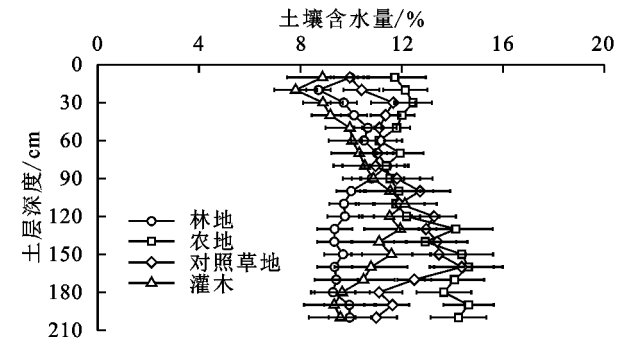
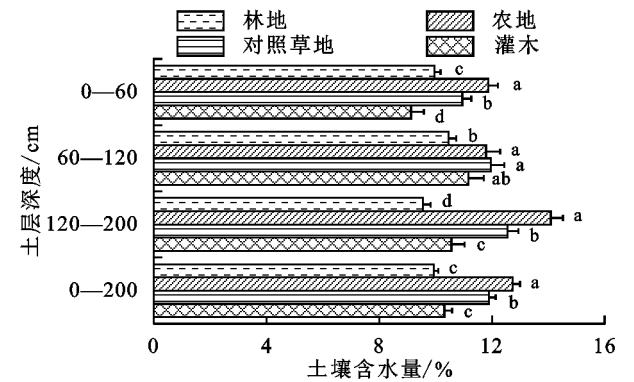


图 1 不同植被类型的土壤水分垂直特征



注:图柱上方的不同小写字母表示同一土层不同植被类型土壤含水量差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 不同植被类型的土壤含水量差异性分析

整体来看,进行植被恢复的林地和灌木在不同的土层深度出现土壤水分亏缺现象(图 3)。林地的土壤水分亏缺最严重,为($-0.16\pm 0.11\%$);灌木次之,为($-0.13\pm 0.07\%$)。在 0—60 cm,林地和灌木的平均土壤水分含量显著低于对照草地,农田平均土壤水分含量显著高于对照草地($p<0.05$)。与其他土层不同的是,灌木土壤水分亏缺比林地更严重。林地 0—60 cm 土层的平均土壤水分含量为($9.95\pm 0.22\%$),60—200 cm 土层的平均土壤水分含量为($9.94\pm 0.20\%$)。而灌木 0—60 cm 表层平均土壤水分含量为($9.13\pm 0.46\%$),低于 60—200 cm 深土层的土壤水分含量[($10.82\pm 0.34\%$)],灌木对表层土壤水分影响剧烈。60—120 cm 土层土壤水分含量变化趋于稳定,但林地土壤水分含量仍然显著低于对照草地(图 2)($p<0.05$)。此外,在 120 cm 以下,不同植被类型下的土壤水分含量存在显著差异,林地和灌木的土壤水分含量显著低于对照草地($p<0.05$),土壤水分亏缺在深层最严重,分别达到($-0.23\pm 0.08\%$)和($-0.16\pm 0.05\%$)。

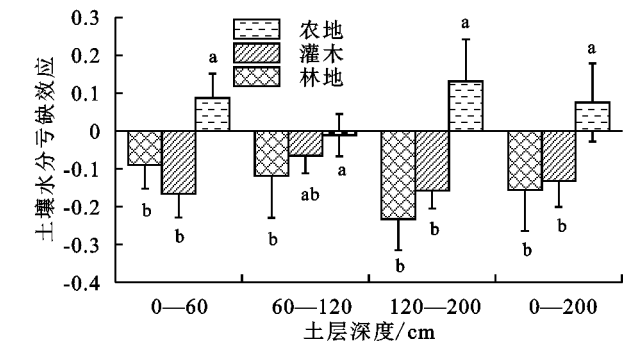


图3 不同植被类型的土壤水分亏缺效应

2.2 土壤有机碳对植被恢复的响应

不同植被类型的土壤有机碳含量垂直分布不同。整体来看,土壤有机碳具有表聚性,绝大多数都聚集在表层,且随着土层深度的增加而降低(图4)。林地0—200 cm的平均土壤有机碳含量高于灌木、草地和农田,分别为0.78,0.72,0.60,0.57 g/kg。与草地相比,林地和草地的有机碳固存分别平均增加30%和20%。与林地、灌木不同,农地的固碳量始终为负,且显著低于其他植被类型($p<0.05$),说明农地土壤以碳源的形式存在。随着土层深度的增加,林地、灌木土壤固碳量都随之增加,且林地的固碳量显著高于灌木(图5)($p<0.05$)。

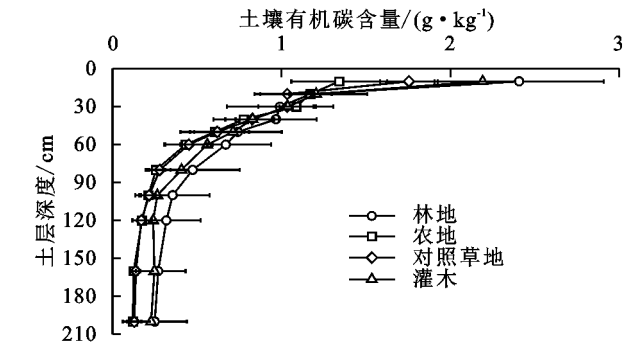


图4 不同植被类型土壤有机碳垂直分布特征

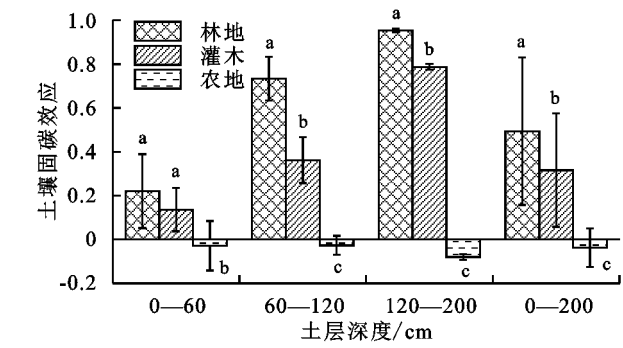


图5 不同植被类型的土壤固碳效应

2.3 土壤碳水耦合对植被恢复的响应

为探讨植被恢复的碳水效应计算了碳水耦合度。整体而言,对照草地和农地的土壤碳水耦合度随着土层深度的增加呈增加的趋势,而林地和草地的土壤碳水耦合协调度随着土层深度的增加呈减小趋势(图6)。不同植被类型、不同土层的碳水耦合协调度有显

著性差异,对照草地的碳水耦合协调度始终显著高于其他植被类型($p<0.05$)(图7)。在0—200 cm,农地和对照草地的碳水耦合协调度显著高于林地和灌木($p<0.05$),分别为 0.67 ± 0.05 和 0.72 ± 0.04 ,处于协调水平,而林地和灌木的平均碳水耦合协调度分别为 0.57 ± 0.04 和 0.59 ± 0.04 ,处于失调状态。在0—60 cm,所有植被类型碳水耦合协调度均较好,基本高于0.6。然而,对于60 cm以下,林地和灌木碳水耦合逐渐失调,林地与灌木的碳水耦合协调度显著低于对照草地($p<0.05$)。尤其在120—200 cm,林地和灌木的平均碳水耦合协调度仅为 0.54 ± 0.03 和 0.57 ± 0.04 。

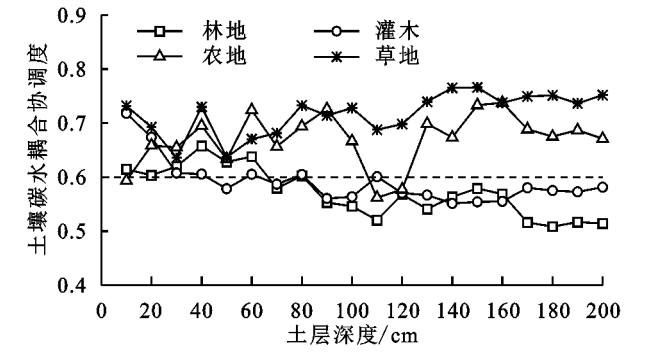


图6 不同植被类型的土壤碳水耦合协调度

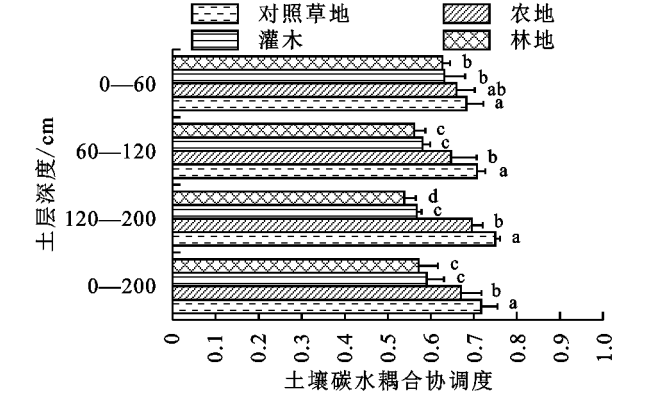


图7 不同植被类型的土壤碳水耦合协调度差异性分析

2.4 环境因素对土壤碳水的影响

土壤有机碳的变化受较多因素影响,包括土壤质地(砂粒含量、粉粒含量和黏粒含量)和土地利用(林地、灌木、农地、草地)等。此外,土壤水分和土壤有机碳存在交互效应。随着土层深度的增加,土壤质地对土壤有机碳变化的贡献显著降低(从58.4%降低到22.6%),而土地利用的贡献显著增加(从27.4%增加到46.9%)(图8a)。深层土壤有机碳的变化主要受土地利用的影响,并且受到深层土壤水分的贡献比浅层更大。对于土壤水分来说,土壤质地是影响土壤水分的决定因素(贡献率为71.7%~81.2%)。在0—60 cm土层,土壤有机碳和土地利用的贡献度分别为7.0%和5.8%,随着土层深度的增加,土壤有机碳的贡献显著降低,而土地利用的贡献显著增加(图8b)。

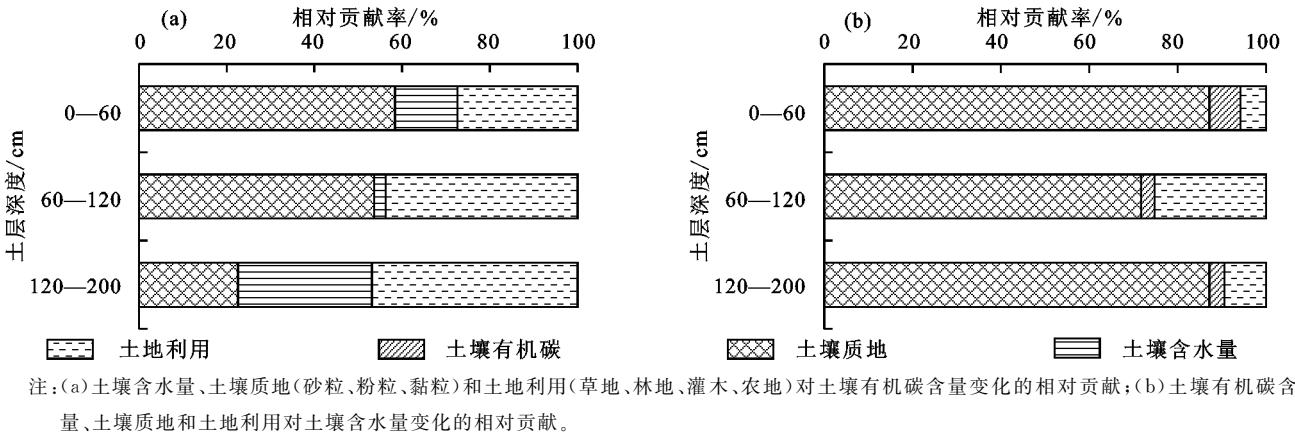


图 8 环境因素对土壤碳水的影响

3 讨论

植被类型是影响土壤水分变化的关键因素,可以通过根系吸收、冠层截留、穿透雨和蒸发过程等来影响土壤水分的变化^[13]。在本研究中,林地和灌木 0—200 cm 的平均土壤水分含量显著低于农地和草地 ($p<0.05$)。这是由于蒸散发大于降雨补给引起的土壤水分消耗过多造成的,与杨磊等^[2]的研究结果一致。土壤水分吸收和消耗的能力主要取决于根系的分布,不同植被类型主根系统的差异导致对不同深度土壤水分的吸收能力也不同^[14-15]。在本研究中,浅层 (0—60 cm) 土壤水分含量变化最为剧烈,强烈的蒸发效应主要发生在浅层土层,且这种效应随土层深度而减小,Zhu 等^[16]也得到相同的研究结果。此外,浅层土壤水分受植物根系吸收和降水补给的影响较大^[17]。这一结果也突出显示不同植被类型的浅层土壤水分含量存在显著差异,且灌木的土壤水分含量显著低于其他植被类型 ($p<0.05$)。一方面,灌木根系主要分布在浅层,浅层耗水量较多;另一方面,由于缺乏乔木遮蔽,严重的暴晒导致浅层土壤水分蒸发量增加。中层 (60—120 cm) 土壤水分含量相对较近,不同植被类型土壤水分垂直变化在 60 cm 处存在拐点,林地土壤水分含量显著低于对照草地 ($p<0.05$)。深层土壤水分含量受降雨和蒸发的影响较弱,主要受深层根系的影响^[18]。对于林地,多年生木本树种的根系可以向深土层延伸,乔木树种利用深层土壤水分维持较高的植被蒸腾,这加剧深层土壤水分含量的下降^[19]。相比之下,草地根系大多数集中在浅层,且耗水量较低,深层水分消耗较少^[20-21]。Fu 等^[22]也发现,与草地相比,这种向深层根系植被的转变导致深层土壤水分的消耗增加。本研究中,农地深层土壤水分含量显著高于林地和灌木 ($p<0.05$)。一方面,人工灌溉增加土壤供水量,农地截流量小于林地;此外,作物比木本树种耗水更少,获

取深层土壤水分的潜力更弱^[23]。人工林和灌木过度消耗深层土壤水分造成深层土壤水分亏缺,在特殊干旱年可能无法维持植物的正常生长^[24-25]。

植被恢复在决定土壤有机碳的大小和垂直分布模式发挥重要作用^[26]。本研究中,不同植被类型土壤有机碳含量有表聚现象,且随着土层深度的增加而减小。这是由于表层土壤凋落物通过分解大大补充土壤有机碳含量,并且有机碳随着植物根系密度的降低逐渐减小^[27]。这一结果也突出显示不同植被类型土壤有机碳含量具有显著差异,本研究林地 0—200 cm 的土壤有机碳含量高于草地和农田,这主要是由于人工林地有更厚的枯枝落叶层和更复杂的根系,两者共同增加土壤有机碳的输入^[28-29]。本研究表明,与草地相比,林地和灌木的土壤固碳效应表现为正向积累作用,且随着土层深度的增加而显著增加。这是由于对照草地根系较浅,且根生物生长量低,尤其深层土壤中根系更少;而林地和灌木深土层发展的细根系统增加地下生物量,这有助于提高深层土壤有机碳的含量,深层土壤中林地和灌木仍然有较高的固碳潜力^[30]。本研究结果表明,农地的土壤有机碳含量显著低于其他植被类型 ($p<0.05$),且固碳效应为负。这是由于农地常年翻耕,加剧土壤有机碳的分解和流失,并且收获的植物碳不能还田,不利于土壤有机碳的积累,农地土壤通常作为一个弱碳源的形式存在^[31]。

在干旱和半干旱地区,大规模造林对于土壤固碳能力和土壤水分的维持有着显著的关系^[32]。本研究中,土壤质地是相对稳定的环境因素,也是影响土壤水分含量的主要控制因素 (贡献率为 71.7%~81.2%)。土壤质地对土壤有机碳含量的影响随土层深度逐渐降低,这是由于随着土层深度的增加,土地利用对土壤有机碳的贡献逐渐增加。碳水耦合效应以水资源合理利用为基础,能更好地评估生态系统的可持续性。本研究中,对照草地全坡面的土壤碳水耦合协调度显

著高于林地和灌木,处于协调水平,而林地和灌木均属于失调水平。这表明对照草地有较强的土壤碳水调控能力,属于健康的生态系统,林地和灌木等植树造林方式导致土壤碳水耦合协调度显著降低。本研究中,对照草地和农地的碳水耦合协调度随着土层深度逐渐增加,而林地和灌木的碳水耦合协调度随土层深度逐渐减小。林地和灌木等植被恢复方式产生巨大的生态效益,包括防风固沙和固碳。通常来说,深层土壤水分对土壤有机碳变化的贡献尤其重要,土壤水分通过影响植被生物量来影响土壤有机碳含量^[32]。林地和灌木类虽有较强的固碳能力,但通常是以牺牲水的代价来固碳。深层土壤固碳需要充足的水分,更多的碳固存意味着更多的土壤水分消耗,深层土壤水分的亏缺造成土壤碳水耦合的失调^[12]。深层土壤水分亏缺可能限制植被细根的发育,使深层土壤有机碳输入减少^[6]。研究区近10年4/5的杨树人工林出现退化现象,近1/3的小叶杨濒临死亡或枯死,导致小叶杨防护林生态功能下降^[8]。随着未来更干旱的气候条件,水分胁迫可能导致人工林遭遇更频繁的退化和死亡现象^[33-34],长期以来限制土壤碳的增加,碳汇效益也相应抵消。

为了更好地维持生态系统的稳定性,未来植被恢复应该更加注重碳水协调,主要是提升土壤水分恢复力。草地在浅层土壤中具有发达的根系,较高的生物量也增加土壤固碳^[35]。草地相对较浅的根系分布和较弱的蒸腾作用,具有更高的保水能力,因此草地有更大的优势实现土壤固碳和水源涵养协同发展。天然草地对于土壤水分的保持和土壤固碳有更大的优势,可能是该地区较好的植被方式。此外,高密度的种植可能导致土壤水分失衡,严重威胁生态系统的可持续性^[5]。对于高耗水的林地和灌木,适当进行间伐,减小林分密度,以求在较低的用水量下增加碳汇。未来应营造更多的乔灌混交林,可以有效地固碳并较低耗水量。

4 结论

(1)林地和灌木类植被恢复方式虽然有较强的固碳能力,但通常是以牺牲水的代价来固碳,深层土壤水分亏缺效应分别为 -0.23 ± 0.08 和 -0.16 ± 0.05 。

(2)对照草地的土壤碳水耦合协调度显著高于其他植被类型($p < 0.05$),且始终属于碳水协调状态,表明天然草地有很好的碳水调控能力。而林地和灌木的土壤碳水耦合协调度随着土层深度的增加而降低,深层土壤(120—200 cm)的平均碳水耦合协调度仅为 0.54 ± 0.03 和 0.57 ± 0.04 ,属于失调状态。

(3)在决定土壤碳水效应方面,土壤质地是导致

整个土壤剖面土壤有机碳和土壤含水量变化相对稳定的因素,植被恢复对深层土壤碳水变化有更加显著的作用。

参考文献:

- [1] 翁伯琦,郑祥洲,丁洪,等.植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J].应用生态学报,2013,24(12):3610-3616.
- [2] 杨磊,卫伟,莫保儒,等.半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J].生态学报,2011,31(11):3060-3068.
- [3] Persson M, Moberg J, Ostwald M, et al. The Chinese Grain for Green Programme: Assessing the carbon sequestered via land reform[J].Journal of Environmental Management, 2013,126:142-146.
- [4] 冯棋,杨磊,王晶,等.黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应[J].生态学报,2019,39(18):6598-6609.
- [5] 杨磊,卫伟,陈利顶,等.半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J].地理研究,2012,31(1):71-81.
- [6] 刘新春,赵勇钢,刘小芳,等.晋西黄土区人工林细根与土壤水碳的耦合关系[J].生态学报,2019,39(21):7987-7995.
- [7] Zhang Y W, Deng L, Yan W M, et al. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China[J].Catena, 2016,137:52-60.
- [8] Sun S J, He C X, Qiu L F, et al. Stable isotope analysis reveals prolonged drought stress in poplar plantation mortality of the Three-North Shelter Forest in Northern China[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252:39-48.
- [9] Dang H Z, Han H, Chen S, et al. A fragile soil moisture environment exacerbates the climate change-related impacts on the water use by mongolian scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in Northern China: Long-term observations[J].Agricultural Water Management, 2021, 251:e106857.
- [10] 苏王新,李卓,陈书琴,等.河北坝上地区植被覆盖演化特征及其风险评估[J].干旱区研究,2018,35(3):686-694.
- [11] 彭晚霞,宋同清,曾毓平,等.喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型[J].农业工程学报,2011,27(9):305-310.
- [12] 李彬彬.黄土高原植被恢复过程中土壤碳氮水耦合机制及恢复力研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2021.
- [13] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J].Catena, 2014, 115:123-133.
- [14] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-

- m profile on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2013, 193/194: 300-310.
- [15] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, et al. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes[J]. *Catena*, 2018, 162: 333-344.
- [16] Zhu X, He Z B, Du J, et al. Spatial heterogeneity of throughfall and its contributions to the variability in near-surface soil water-content in semiarid mountains of China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 488(6): e119008.
- [17] A Y L, Wang G Q, Liu T X, et al. Spatial variation of correlations between vertical soil water and evapotranspiration and their controlling factors in a semi-arid region[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 53-63.
- [18] Jia Y H, Shao M A. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 523-531.
- [19] Li B B, Zhang W T, Li S J, et al. Severe depletion of available deep soil water induced by revegetation on the arid and semiarid Loess Plateau[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 491: e119156.
- [20] Zhang X, Zhao W W, Liu Y X, et al. The relationships between grasslands and soil moisture on the Loess Plateau of China: A review[J]. *Catena*, 2016, 145: 56-67.
- [21] Gao X D, Meng T T, Zhao X N. Variations of soil organic carbon following land use change on deep-loess hillslopes in China[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(7): 1902-1912.
- [22] Fu S, Sun L, Luo Y. Combining sap flow measurements and modelling to assess water needs in an oasis farmland shelterbelt of *Populus simonii* Carr in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 172-180.
- [23] Liang H B, Xue Y Y, Li Z S, 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.
- [24] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [25] Song L N, Zhu J J, Zhang T, et al. Higher canopy transpiration rates induced dieback in poplar (*Populus × xiaozhuanica*) plantations in a semiarid sandy region of Northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: e106414.
- [26] Li B B, Li P P, Yang X M, et al. Land-use conversion changes deep soil organic carbon stock in the Chinese Loess Plateau[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 32(1): 505-517.
- [27] 张智勇, 王瑜, 艾宁, 等. 陕北黄土区不同植被类型土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(11): 56-63.
- [28] 丁越岚, 杨劼, 宋炳煜, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响[J]. *草业学报*, 2012, 21(2): 18-25.
- [29] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5421-5429.
- [30] Rumpel C, Kögel Knabner I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. *Plant Soil*, 2010, 338(1/2): 143-158.
- [31] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(11): 3733-3742.
- [32] Zhang Y W, Shangguan Z P. The coupling interaction of soil water and organic carbon storage in the long vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 574-581.
- [33] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 近 40 年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异[J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 9108-9119.
- [34] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 河北坝上樟子松人工林径向生长及其对气候因素的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1830-1840.
- [35] 戴尔阜, 黄宇, 赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 3908-3918.