

DOI: 10.5846/stxb201812142733

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研究. 生态学报, 2019, 39(18): - .

Feng Q, Yang L, Wang J, Shi X Y, Wang Y F. Response of soil moisture and soil organic carbon to vegetation restoration in deep soil profiles in Loess Hilly Region. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应研究

冯 棋^{1,2}, 杨 磊^{1,*}, 王 晶³, 石学圆³, 汪亚峰⁴

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

4 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

摘要: 黄土高原大规模植被恢复显著影响了这一区域土壤水分和有机碳 (SOC), 从而影响其承载的土壤水源涵养和固碳服务。明确深层土壤水分和有机碳对植被恢复的响应特征是当前黄土高原地区生态水文与生态系统服务研究的一个重要科学问题, 其中植被类型以及生长年限是这一过程的重要影响因素。然而, 目前关于深层土壤有机碳和土壤水分对植被恢复的响应及二者关系的研究较少。本研究通过对陕北典型黄土丘陵区不同植被类型和生长年限下 0—5 m 土壤水分与有机碳的监测, 分析了深层土壤水分和有机碳对植被恢复的响应及其特征。研究发现: (1) 植被恢复后 0—5 m 土层均出现水分亏缺, 土壤水分亏缺在表层 1 m 最低, 2—3 m 最高; 对于不同恢复方式, 林地土壤水分亏缺在恢复至 21—30a 时显著高于前一阶段 (11—20a), 而在恢复 31a 后水分开始恢复, 而灌木、草地土壤水分亏缺程度则随恢复年限延长不断增加。(2) 林地、灌木、草地 0—5 m 平均土壤有机碳含量为 1.97、1.77、1.72 g/kg; 林地土壤固碳量随恢复年限的增加而增加, 并且在恢复 20a 时固碳量与对照农田相比出现净增; 灌木土壤固碳量随恢复年限先增加后降低; 草地土壤固碳量则随退耕年限增加呈下降趋势并且低于对照农田。(3) 表层 0—1 m 土壤水分随恢复年限增加变化不显著, 深层土壤水分则随恢复年限增加显著降低; 相比而言, 随恢复年限增加, 土壤有机碳随年限的变化在各层土壤中均不显著。深层土壤水分与土壤有机碳呈现显著的正相关, 且土壤有机碳的增加速率低于土壤水分, 研究认为, 深层土壤固碳与土壤水分关系密切, 且深层土壤固碳需要充足水分参与。深层土壤水分亏缺可能限制植被细根的发展, 使深层土壤有机碳输入减少。

关键词: 土壤水分; 有机碳; 植被类型; 黄土高原; 深层土壤

Response of soil moisture and soil organic carbon to vegetation restoration in deep soil profiles in Loess Hilly Region

FENG Qi^{1,2}, YANG Lei^{1,*}, WANG Jing³, SHI Xueyuan³, WANG Yafeng⁴

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Large-scale vegetation restoration in the Loess Plateau has had a major impact on the soil moisture content and soil organic carbon (SOC), as well as soil water conservation and carbon sequestration services in this region. The response of deep soil moisture and SOC contents to vegetation restoration raised serious concerns in current studies regarding eco-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871194); 国家重点研发计划课题 (2016YFC0501701); 中国科学院科技网络服务计划 (KFJ-STZ-ZDTP-036); 城市与区域生态国家重点实验室自主项目 (SKLURE2017-1-2)

收稿日期: 2018-12-14; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leiyang@rcees.ac.cn

hydrology and ecosystem services in the Loess Plateau. However, limited studies have examined the responses of deep SOC and soil moisture along with their coupling relationships to vegetation restoration in this critical area. In this study, vertical distribution (0—5 m depth) of SOC and soil moisture contents in different human-introduced vegetation types (grassland, shrubland and forestland) and restoration ages in a typical loess hilly watershed were analyzed, and soil moisture and SOC contents in cropland were measured as controls. Our analyses showed that: (1) Soil moisture deficit was observed in different human-introduced vegetation types. The surface soil layer (0—1 m depth) had the lowest soil moisture deficit, and the 2—3 m depth layer had the highest soil moisture deficit. In forestland, soil moisture deficit was significantly greater in the 21—30a stage than that in the previous stage (11—20a), and subsequently decreased after 31 years of growth. However, soil moisture deficit in shrubland and grassland increased subsequent to abandonment of croplands. (2) The mean SOC contents of forestland, shrubland and grassland in the 0—5 m depth profile were 1.97, 1.77, and 1.72 g/kg, respectively. Soil carbon sequestration in forestland increased with increasing restoration ages, and exhibited net gain in the 20a stage compared with cropland. Carbon sequestration in shrubland increased initially, but then decreased with increasing restoration age. In contrast to forestland and shrubland, carbon sequestration in grassland decreased with increasing restoration age, and was lower than that of control farmland for all restoration stages. (3) Soil moisture content in the surface layer (0—1 m depth) did not exhibit significant changes with increasing restoration age. However, soil moisture content significantly decreased in deep soil layers with increasing restoration age. Nevertheless, no significant correlation was found between levels of SOC and restoration age at any soil layers tested. In deep soil profiles, soil moisture content and SOC exhibited significantly positive correlations. Furthermore, the rate of increase of SOC was lower than that of soil moisture content. These findings indicated that deep soil carbon sequestration was closely related to soil moisture content. The soil carbon sequestration process may require adequate soil moisture at greater soil depth. Deep soil moisture deficit may restrict carbon sequestration in deep soil layers by constraining fine root development.

Key Words: Soil moisture; soil organic carbon; vegetation type; Loess Plateau; deep soil profile

土壤水分是陆地生态系统的重要组成部分,也是地表过程的重要纽带^[1,2]。尤其在干旱、半干旱的黄土丘陵区,气候干旱、降水稀少且地下水埋藏深,土壤水分是维持生态系统的直接水分来源,是这一地区生态恢复的关键制约因子^[3-4]。近 20 年来,黄土高原大规模植被恢复使得人工植被成为主要的植被类型^[5-6]。大规模植被恢复虽有效促进了黄土高原的脆弱生态系统恢复,提升了土壤保持、固碳等诸多生态系统服务,但植被生长的同时也大量消耗了土壤水分,导致土壤干燥化,威胁生态系统稳定性^[7]。土壤水源涵养与固碳作为重要的生态系统服务,明确其对植被恢复的响应特征是黄土高原重要的研究议题^[8]。

植被类型和生长年限均能影响土壤水分消耗与土壤固碳功能^[9-10],并且土壤水分利用是植被恢复与固碳的必要条件,高效的碳同化与积累又有助于水分利用效率的提高^[11-12],因此干旱、半干旱区的土壤水源涵养与固碳功能存在紧密的权衡与协同关系。例如,Jia 等^[13]分析了陕北黄土丘陵区植被恢复后多种生态系统服务间的权衡关系,发现植被生长增加了生态系统碳固定却降低了水的可用性。Lv 等^[8]研究黄土高原 400—650 mm 降雨梯度下大规模植被恢复后多种生态系统服务的变化同样发现土壤有机碳与总氮的增加以过度消耗土壤水分为代价。明确不同植被恢复类型以及不同生长阶段中土壤水源涵养和固碳两种关键生态系统服务的响应特征,对提升植被恢复的生态系统服务具有重要的科学意义。另一方面,黄土丘陵区黄土覆盖深厚,人工植被根系较深,深层土壤的水分利用与固碳作用成为这一地区特殊的生态过程^[14-15],深层土壤水分是该地区人工植被的重要水源,深层土壤有机碳也是黄土高原土壤碳库的重要组成部分。然而,目前的研究多集中于浅层土壤剖面或针对单一生态系统服务的探讨^[9,16],或集中于土壤碳与氮对植被类型与生长年限响应的研究^[9,17-19],关于深层土壤有机碳与土壤水分对植被恢复的响应及二者相互关系的研究较少。系统研究不同植被恢复方式及生长年限对土壤水分和有机碳的影响,阐明深层土壤水源涵养与固碳的权衡与协同关系,有

利于合理的植被恢复类型选择与配置,维持植被恢复的可持续性和稳定性。

本研究以陕北典型黄土丘陵小流域为例,选取不同生长年限(0—37a)下的典型乔木、灌木和草本植被,以农田为参照,对比分析不同植被恢复年限下土壤水分和有机碳的响应特征及二者关系,以期为黄土高原植被恢复可持续性维持和生态系统服务提升提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县大南沟小流域(36°54′—36°56′N, 109°16′—109°18′E),流域海拔 1075—1350 m,面积 3.46 km²。多年平均降雨量 549 mm,其中 75%的降雨集中在 6—9 月间,年际变率达 74.5 %。多年平均气温 9℃,1 月平均气温-8℃,7 月平均气温 22℃,年大于 10℃积温约为 3170℃。流域属黄土丘陵沟壑区,地表切割破碎,冲、切沟发育,土壤类型主要为黄土母质上发育的黄绵土,粉粒占 64%—73%,粘粒占 17%—20%。土质疏松,抗侵蚀性差。流域经过多年的人工植被恢复,现主要土地利用有刺槐乔木林地、柠条灌木林地、撂荒地、天然荒草地、苹果园地、梯田耕地和农村居民点,其中刺槐、柠条、沙棘等为人工植被恢复恢复类型。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点布设和样品采集

于 2017 年 8 月在流域内综合考虑地形、植被类型、生长年限等因素,选取具有不同植被类型及恢复年限且地形条件较为一致的 34 个固定样地(表 1),各样地地形、土壤等环境因子基本一致。选取 1 个长期耕作的农田作为对照,研究不同植被恢复类型及生长年限对土壤水分和有机碳的影响。使用罗盘测定每个样地的坡度和坡向信息,使用 GPS 测定各样地海拔高度,坡向原始记录以朝北为起点 0°,顺时针旋转的角度表示。坡度(°)与海拔(m)以实际观测值表示。

采用轻型人力钻在每个样地钻取 0—5 m 深度的土壤样品,以 20 cm 为间隔取样。土壤样品一部分装入铝盒后封装,在 105℃下烘干 12 h 测定其重力土壤含水量;另一部分装入自封袋带回实验室自然风干,过筛后采用重铬酸钾法测量有机碳含量。

1.2.2 数据分析方法

(1)土壤水分含量采用烘干法(105℃)测定。

$$\text{土壤水分含量}(\%) = \frac{\text{鲜重} - \text{干重}}{\text{干重}} \times 100\%$$

(2)土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)含量测定取土壤样品过 0.15 mm 筛后,采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法进行测定。

(3)土壤水分亏缺效应(Soil moisture deficit, SMD)用于评估不同植被恢复方式对土壤水源涵养的影响。

$$\text{SMD}_{j,k} = \frac{\text{SMC}_{j,k} - \text{SMC}_{0,k}}{\text{SMC}_{0,k}}$$

式中, $\text{SMD}_{j,k}$ 为 k 层 j 植被恢复方式下土壤水分亏缺效应, $\text{SMC}_{j,k}$ 为 k 层 j 植被恢复方式下土壤水分含量(%), $\text{SMC}_{0,k}$ 为对照农田 k 层土壤水分含量(%)。

(4)土壤固碳效应(Soil carbon sequestration, SCS)用于评估不同植被恢复方式的土壤固碳能力。

$$\text{SCS}_{j,k} = \frac{\text{SCS}_{j,k} - \text{SCS}_{0,k}}{\text{SCS}_{0,k}}$$

式中, $\text{SCS}_{j,k}$ 为 k 层 j 植被恢复方式下土壤固碳效应, $\text{SCS}_{j,k}$ 为 k 层 j 植被恢复方式下土壤有机碳含量(g/kg), $\text{SCS}_{0,k}$ 为对照农田 k 层土壤有机碳含量(g/kg)。

1.2.3 统计分析方法

采用描述性统计分析不同植被恢复年限与不同恢复方式下土壤水分、有机碳分布与变化情况,并采用单

因素方差分析、多重比较、回归分析,研究不同植被恢复方式在植被恢复过程中水碳变化的差异性($P<0.05$)。各类分析通过 Origin 9.1 完成。

表 1 不同植被类型与生长年限样地统计
Table 1 Statistics of experimental plots for different vegetation types and restoration ages

恢复方式 Restoration types	样地编号 No.	主要植被 Main plant s pecies	退耕年限 Restoration ages /yr	海拔 Altitude/m	坡向 Slopes aspect/°	坡度 Slpes degree/°	坡位 Slope position	水平坡形 Horizontal slope shape	垂直坡形 Vertical slope shape
林地 Forestland	1	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	11	1180	119.5	16	中下	平	平
	2	刺槐	14	1280	296	18	中	微凸	微凸
	3	刺槐	17	1300	70.5	27	中	凸	平
	4	杏 <i>Prunus armenjaca</i>	17	1290	222.5	22	上	凸	凸
	5	刺槐	17	1210	212.5	9.5	上	微凸	凸
	6	刺槐	17	1210	123	12.5	上	微凸	凸
	7	刺槐	17	1190	190	22.8	下	凸	平
	8	刺槐	19	1260	315.5	10.5	上	平	微凸
	9	刺槐	20	1310	73	31.5	中	平	平
	10	刺槐	21	1320	104.5	32	中	凸	平
	11	刺槐	21	1090	207	28.5	中	凸	平
	12	刺槐	24	1170	188	15	上	凸	平
	13	刺槐	27	1300	275	27	中	凸	平
	14	刺槐	27	1190	213	22	上	凸	平
	15	刺槐	29	1090	165.5	34.5	中	凸	微凸
	16	山杏	33	1290	312.5	15.5	中	平	凹
	17	刺槐	34	1370	288	22	上	微凹	平
	18	刺槐	34	1330	174	40.5	中上	微凸	平
	19	刺槐	34	1300	63.5	17.5	上	平	微凸
	20	刺槐	35	1370	319.5	26	下	平	平
灌木 Shrunbland	21	刺槐	37	1170	35.5	41	中上	微凸	平
	22	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	11	1190	129	12.5	下	微凸	平
	23	沙棘	17	1310	137.5	34.5	中上	微凸	平
	24	沙棘	17	1240	183	5.5	上	凸	凸
	25	沙棘	28	1310	74.5	30.5	中	平	平
	26	柠条 <i>Caragana Korshinskii</i>	34	1310	34	24.5	中	平	平
	27	柠条	35	1330	75.5	26	中下	凸	平
草地 Grassland	28	旱芦苇 <i>Phragmites australias</i> 、 早熟禾 <i>Poa annua</i> 、 刺儿菜 <i>Cirsium setosum</i>	2	1230	66.5	1	上	平	平
	29	旱芦苇、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、	2	1190	75	1	中	平	平
	30	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 、早熟禾、 草木樨状黄芩 <i>Astragalus melilotoides</i>	27	1330	275.5	24.5	中	凸	微凸
	31	披针叶苔草 <i>Carex lanceolata</i> 、 朝天委陵菜 <i>Potentilla supina</i> 、 达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	28	1270	260	13.5	上	平	微凸
	32	铁杆蒿、多花胡枝子 <i>Lespedeza floribunda</i> 、达乌里胡枝子	29	1270	90.5	25.5	中	平	平
	33	铁杆蒿、草木樨状黄芩、 火絨毛草 <i>Holcus lanatus</i>	29	1300	342.5	19	中	微凸	平
农田 Cropland	34	大豆 <i>Glycine max</i>	0	1170	36.5	1	中	平	平

2 结果与分析

2.1 土壤水分对植被恢复的响应

由图 1 可知,不同恢复年限的林地、灌木、草地土壤水分均低于未进行植被恢复的农田,草地、林地、灌木 0—5 m 平均土壤水分含量依次降低,分别为 8.30%、6.42%、5.54%。将植被恢复年限划分为小于 10a、10—20a、21—30a 与大于 31a 四个阶段,除第 1 阶段外,第 2、3、4 阶段间土壤水分含量差异较小,且随退耕年限增加,土壤水分含量减少。由图 2 可知,进行植被恢复的样地不同土壤深度内均出现土壤水分亏缺,且水分亏缺均在 2—3 m 土层最为严重,表层 0—1 m 土壤水分亏缺最小。在 0—5 m 土壤剖面内,林地土壤水分亏缺在恢复至 21—30a 时高于前一阶段(11—20a),随后亏缺状况在大于 31a 后得到缓解。灌木土壤水分亏缺总体呈逐渐增加趋势,并在大于 31a 显著增加。草地土壤水分亏缺在 0—5 m 土层随恢复年限延长显著增加,但显著低于林地、灌木。当植被恢复至 10—20a 时,灌木土壤水分亏缺高于林地,SMD 分别为-0.70、-0.67;在恢复至 21—30a 时,林地土壤水分亏缺高于灌木、草地,SMD 分别为-0.73、-0.70、-0.66。在恢复年限大于 31a 后,灌木水分亏缺高于林地,SMD 分别为-0.75 与 -0.59。

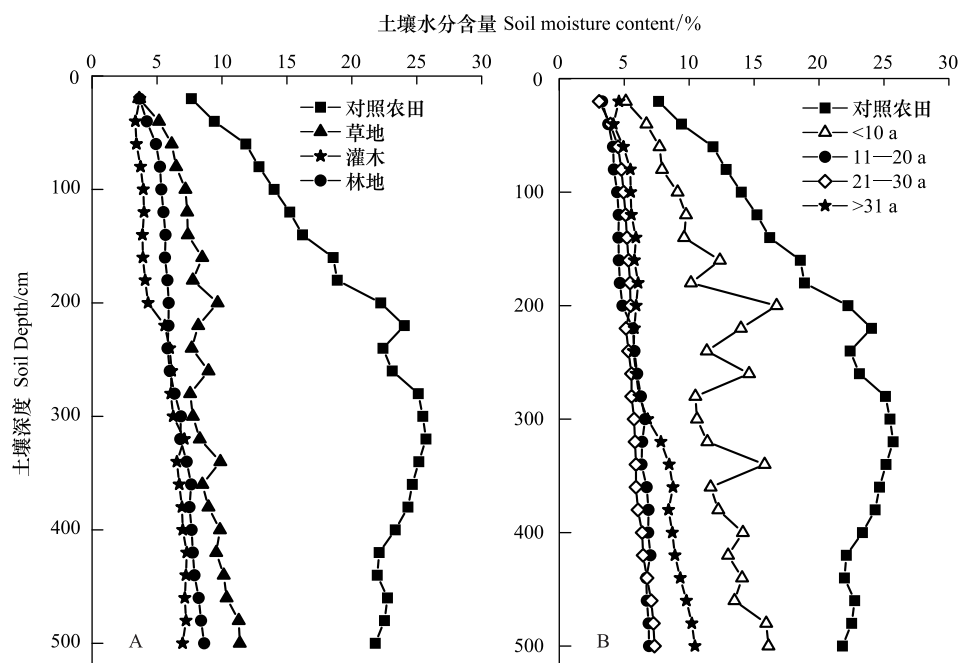


图 1 不同植被恢复方式年限下土壤水分垂直分布特征

Fig.1 Vertical distribution of soil moisture content in different vegetation types and restoration ages

2.2 土壤有机碳对植被恢复的响应

由图 3 可知,林地 0—5 m 平均土壤有机碳含量高于灌木、草地,分别为 1.97、1.77、1.72 g/kg。从时间分布来看,对照农田与 10a、10—20a、21—30a、31a 土壤有机碳含量分别为 2.11、2.07、1.81、1.88、1.82 g/kg。不同土壤剖面土壤有机碳含量随植被恢复年限增加呈不同变化趋势,在 0—1 m、3—4 m 土壤剖面,随植被恢复年限增加土壤有机碳含量变化不显著。在 1—2 m、2—3 m 土壤剖面,随植被恢复年限增加,土壤有机碳含量波动递减,在 4—5 m 土壤剖面,植被恢复后平均土壤有机碳含量高于对照农田。

由图 4 可知,三种植被恢复方式下土壤有机碳变化趋势相似,在 1—3 m 土壤剖面固碳量为负,林地、灌木、草地 2—3 m SCS 分别为-0.25、-0.22、-0.32。林地 0—1 m、3—4 m 土壤剖面内固碳量随植被恢复年限增加而增加,在 1—3 m、4—5 m 土壤剖面内呈先增加后减少趋势,但在 0—5 m 土壤剖面内随恢复年限增加固碳

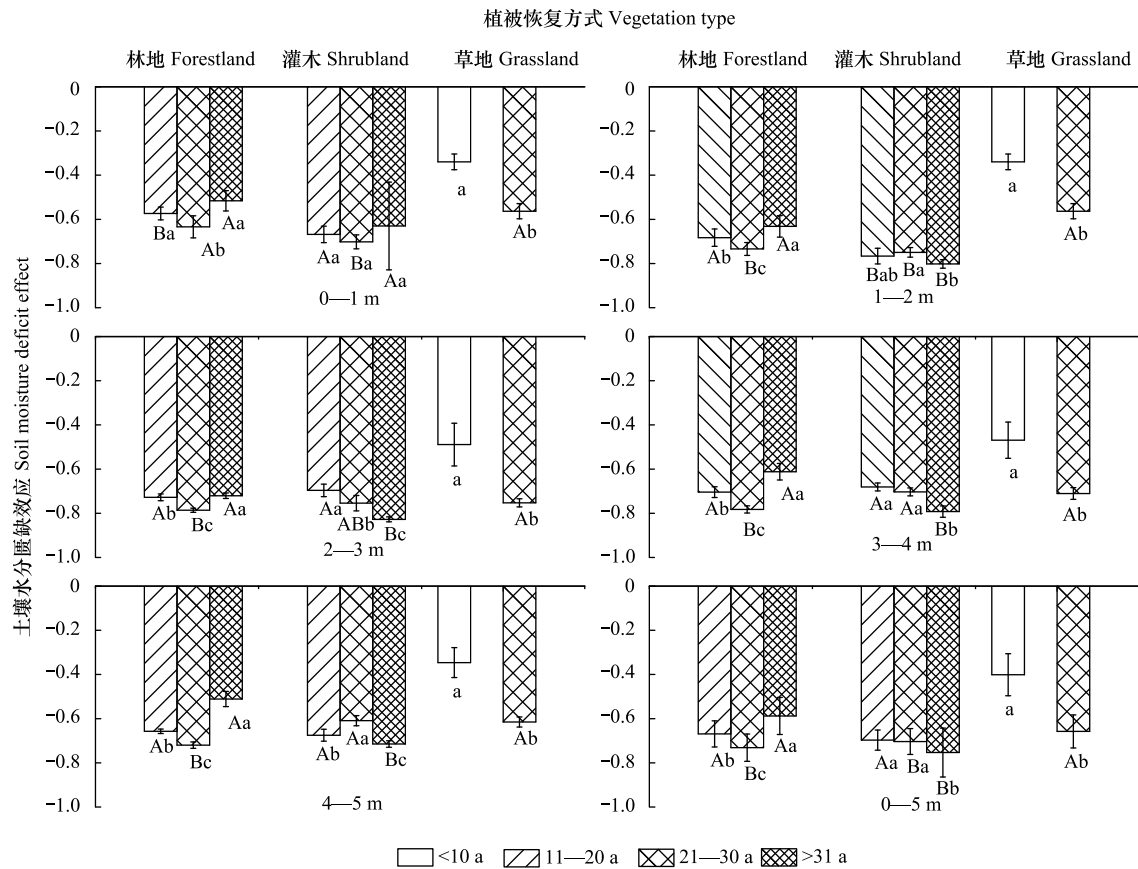


图2 不同植被恢复方式与恢复年限下土壤水分亏缺效应

Fig.2 Soil moisture deficit in different vegetation types and restoration ages

大写字母表示不同植被同一恢复年限间 SMD 的显著性差异,小写字母代表同一植被不同恢复年限间 SMD 的显著性差异,如有一个字母相同表示差异不显著 ($P < 0.05$, LSD)

量增加,SCS 分别为-0.14、0.04、0.07。灌木固碳量随植被恢复年限先增加后减少,第 2、3、4 恢复阶段 SCS 分别为-0.09、-0.05、-0.27;草地固碳量随植被恢复年限增加而减少,第 1、3 恢复阶段 SCS 分别为 0.02、-0.23。植被生长 11—20 a 时,林地土壤固碳量低于灌木,在生长至 21—30a 时,林地土壤固碳量则高于灌木与草地。

2.3 土壤水分/有机碳与植被恢复年限的关系

图 5 展示了土壤水分、有机碳同植被恢复年限的关系。在 0—5 m 土层内,随植被恢复年限增加,土壤水分均呈递减趋势,其中 2—5 m 土层显著递减。随植被恢复年限增加,土壤有机碳在 0—1 m、3—4 m 土壤剖面增加,而在 1—3 m 有所减少,但土壤有机碳变化在各层土壤中均不显著。由图 6 可知,土壤水分与有机碳在 1—2 m 与 3—5 m 土层存在显著的相互作用,土壤碳的增加分别为土壤水分增加的 0.384、0.835、0.549 倍(土壤有机碳与水分单位均为%的条件下)。

3 讨论

3.1 植被恢复对深层土壤水分的影响

植被主要通过根系的吸收、利用以及冠层截留对土壤水分产生影响^[20]。不同植被恢复方式与恢复年限显著影响水文过程,尤其是渗透与蒸散发,从而导致土壤水分含量的时空异质性^[21-22]。黄土高原诸多研究表明农田与草地土壤水分要高于林地^[6,22-24]。本研究中,不同植被恢复方式下土壤水分依次为农田>草地>林地>灌木。耗水性乔灌木根系虽主要分布于 0—2 m 土层,但主根随恢复年限的增加不断下伸,成熟主根一般深达 3—6 m,最大可达 8 m 以下土层,强烈消耗深层土壤水分^[25]。农田受人为耕作活动影响,表层土壤疏松且

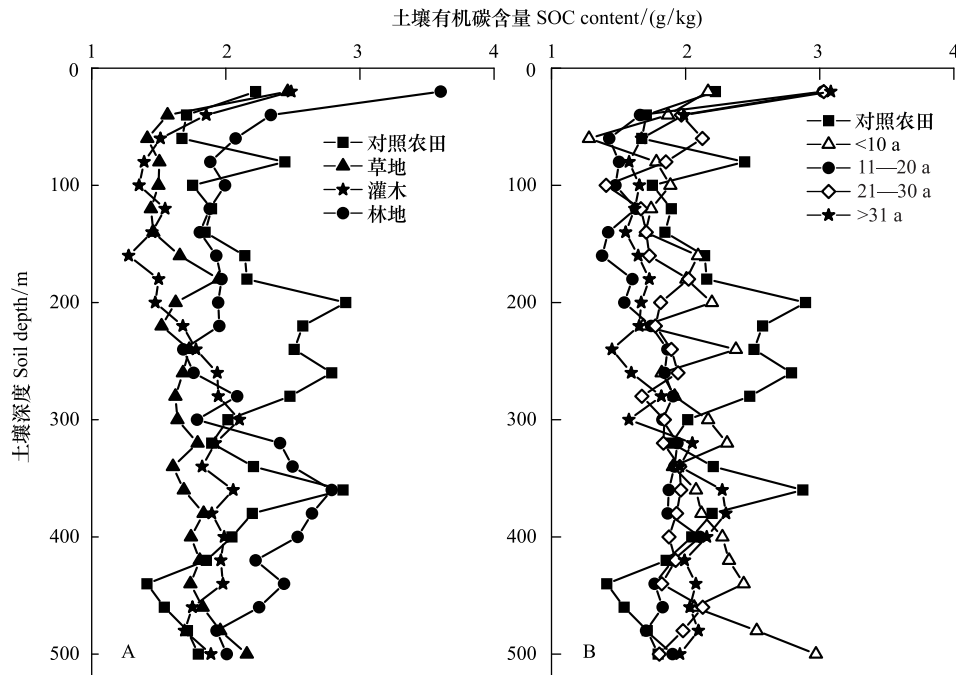


图3 不同植被恢复方式与恢复年限下土壤有机碳垂直分布特征

Fig.3 Vertical distribution of soil organic carbon in various vegetation types and restoration ages

坡度平缓有利于降水入渗,且农田内多为浅根系作物,深层根系活动较少,因而在0—5 m土壤剖面内水分含量较高。草地为退耕地,主要为自然演替的草本植物,与农田土壤理化性质相似^[22],恢复前水分条件较好,且植物根系主要集中于2 m以内,对土壤水分的消耗相对较少^[26]。

在干旱半干旱地区,植被生长强烈依赖土壤水分。Chen等^[27]研究了土地利用与土壤水分动态的关系,发现土壤水分消耗主要在生长季,雨季降水并不能完全补充土壤水分消耗。本研究中,不同植被恢复方式均发生土壤水分亏缺,且水分亏缺在表层0—1 m最低,2—3 m最高,这是因为不同深度土壤对水分消耗的驱动力存在差异,表层土壤水分消耗主要受植被蒸腾与土壤蒸发两个水文过程影响,并且降水可补充表层水分的散失。2 m以下土壤水分受降水与土壤蒸发的影响弱而主要受植被根系的影响^[28],因降水难以补充加上植物根系耗水而出现土壤干化现象。对于不同恢复方式,林地土壤水分亏缺在恢复至21—30a时显著高于前一阶段(11—20a),而在31a后土壤水分开始恢复。灌木、草地土壤水分亏缺随恢复年限延长不断增加。从心海等^[29]研究表明不同林龄吸水层深度不同,恢复5—6a林地吸水层达3.5 m,8a可达5 m,即恢复时间越长,耗水越强。而马祥华等^[30]、李婧等^[31]人的研究表明在植被恢复后期,人工林地土壤水分开始有所恢复。

3.2 植被恢复对深层土壤有机碳的影响

本研究中不同植被恢复方式下,0—5 m土壤有机碳含量依次为林地>灌木>草地。林地根系发达,表层凋落物较多,有机碳的输入会促进团聚体形成^[32-33]。此外退耕还林降低土壤侵蚀速率,减缓土壤有机碳的流失^[34],并且较少的人为扰动也减少了土壤团聚体的分解,加强了对土壤碳库的保护^[35]。Dungait等^[36]研究表明退耕还林中土壤有机质的输入可以通过形成酶腐殖质络合物,抑制碳分解酶在土壤中的活动从而降低有机碳的分解。草地光合产物主要分配于地下部分,根系是土壤有机碳输入的主要形式,而由于草地植被稀疏,根系较浅,根生物量较低,尤其是深层土壤中根系更少,因此土壤有机碳含量较低^[37]。

植被恢复可以导致土壤碳储量的变化,碳流入与流出的平衡会因土地利用类型的变化而改变,这个过程中土壤作为碳源或是碳汇依赖于碳流入与流出的比例^[38]。诸多研究表明^[39]植被恢复后土壤有机质含量在恢复初期有所降低,之后恢复至退耕前水平,此后出现净增长。这可能因土壤碳的激发效应导致,即新的易分解有机质的输入可刺激在土壤中存在时间较长的有机质的分解^[40-41]。本研究中,林地土壤有机碳在植被恢

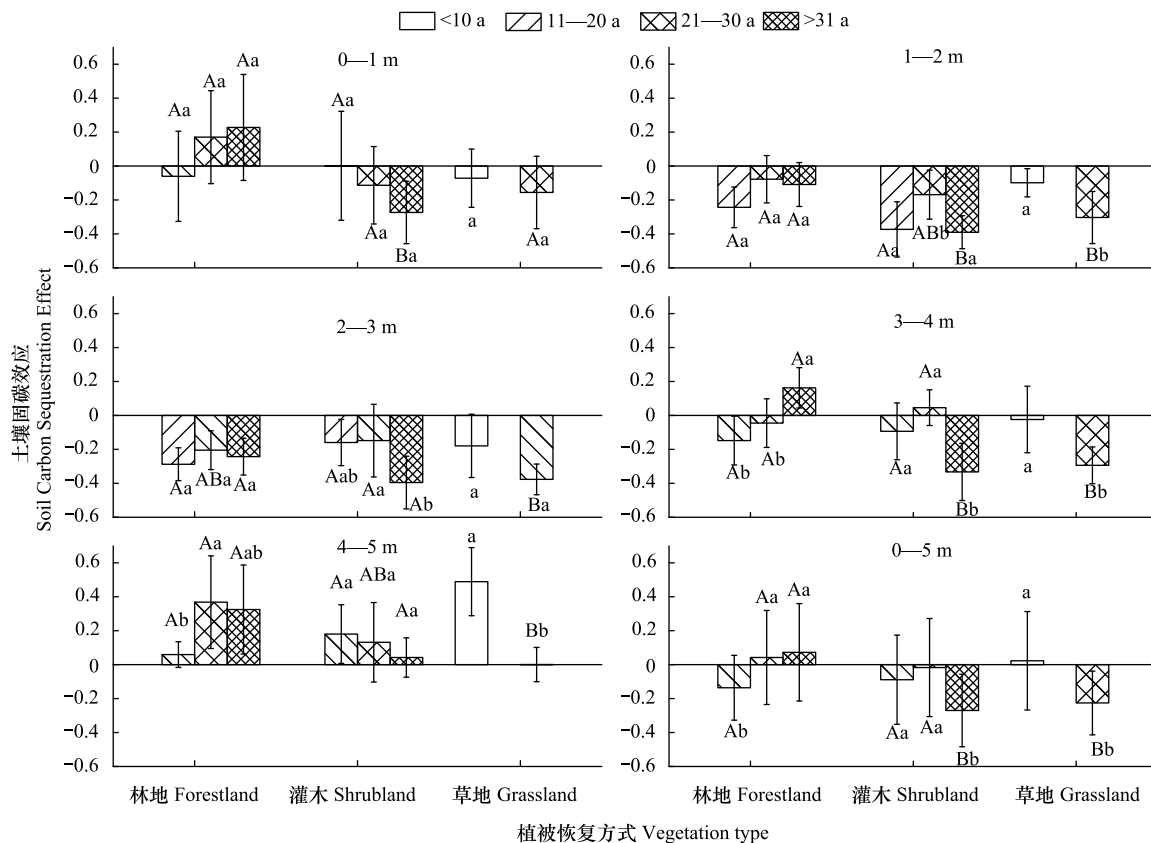


图4 不同植被恢复方式与恢复年限下土壤固碳效应

Fig.4 Soil carbon sequestration effect in different vegetation types and restoration ages

大写字母表示不同植被同一恢复年限间 SCS 显著性差异,小写字母代表同一植被恢复方式不同恢复年限间 SCS 显著性差异,如有一个字母相同表示差异不显著 ($P < 0.05$, LSD)

复 20 年后有所增加,同样反映了土壤有机质的矿化分解与累积过程。受耕作和施肥影响,耕地表层土壤有机质含量相对较高,这也为植被恢复初期植物的生长提供了有利条件,但随着植被生长的不断消耗,土壤有机质含量出现一个降低的过程。植被的根系分泌物和残落物是土壤有机碳的主要来源,随着恢复过程中植被的生长和群落的演替,凋落物和死亡根系逐渐增多,有机质含量得以恢复和累积。Deng 等^[9]在黄土高原安塞县的研究表明随植被恢复年限的增加,0—1 m 土壤固碳量增加,且表层 10 cm 固碳量最高,表明土壤表层仍是有机碳存储的关键层次。本研究中,1—3 m 内土壤有机碳随植被恢复年限增加反而有所减少,表明不同深度土壤有机碳对植被恢复的响应有所不同。同时 1—3 m 也是土壤水分降低最为显著的层次,表明深层土壤干化也限制了土壤对有机碳的固定,这可能与活性细根在缺水层分布减少有关^[29],由于植物细根对土壤碳的贡献大于植物地上部分^[42],因而深层土壤水分的过度消耗也相应限制了深层土壤有机碳的固定。

本研究中,恢复大于 30a 灌木样地主要为柠条,灌木固碳量随恢复年限延长先增加随后降低。曲卫东等^[43]和崔静等^[44]研究发现柠条土壤有机碳含量在恢复至 40a 时开始降低,这主要与柠条老化,生长不良有关。本研究中灌木样地土壤有机碳的降低可能也与柠条林地老化有关。本研究中,草地固碳量随退耕年限增加呈下降趋势并且低于对照农田,这与党珍珍等^[45]的研究结果一致。恢复早期草地群落不同物种间的竞争以及对土壤养分竞争较为激烈,使草地植被盖度下降,物种多样性减少。并且弃耕前期植被覆盖度低,土壤侵蚀严重,土壤有机质被迁移至下层或下坡位,土壤有机碳减少^[45]。Potter 等^[46]研究表明农田恢复为草地后需大约 100a 土壤碳储才可恢复至弃耕前水平,表明草地的土壤碳增汇需要较长过程。

3.3 深层土壤水分/有机碳与植被恢复的关系

从本研究可以看到,表层 0—1 m 土壤水分因降水补给随恢复年限增加变化不显著,而深层土壤水分随恢

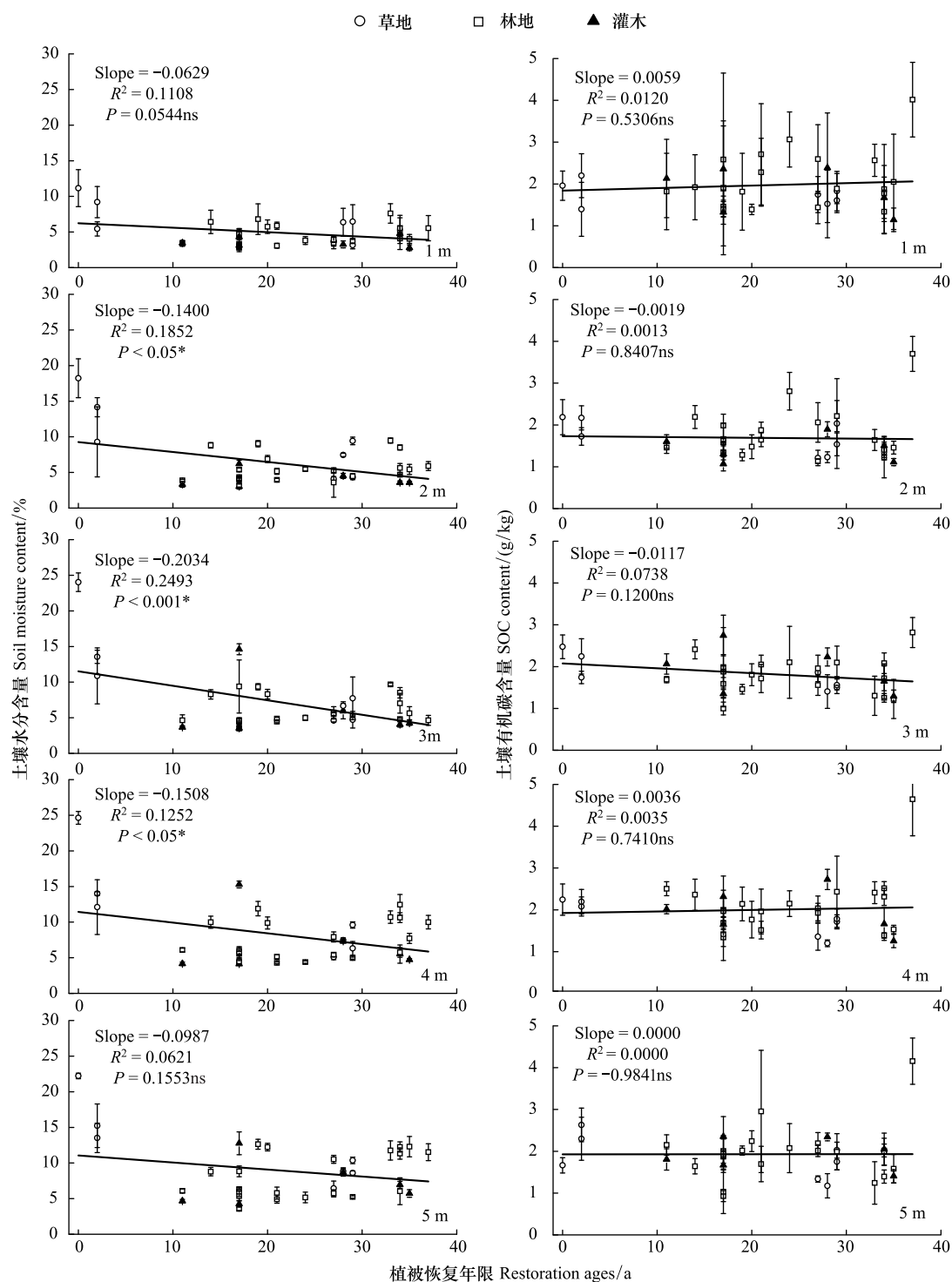


图5 不同植被恢复方式土壤水分/有机碳与恢复年限关系

Fig.5 Relationship between soil moisture/SOC content and restoration ages at each soil layer

复年限增加显著降低,表明随恢复时间延长,植物耗水量随之增加。土壤有机碳在 0—1 m、3—4 m 土壤剖面随恢复年限延长而增加,而在 1—3 m 有所减少,但土壤有机碳变化在各层土壤中均不显著。这主要是因为控制有机碳输入、积累、分解的过程较为复杂,地上枯落物、地上地下物质分配、根系深度与生物量、土壤水分与微生物活动都对土壤有机质的输入速率与质量产生影响^[47]。水分不足是黄土高原植被恢复和生态系统稳定的首要限制因素^[48]。在降水不足的干旱、半干旱区,土壤水分的有效利用对于植被的生长起着至关重要的作

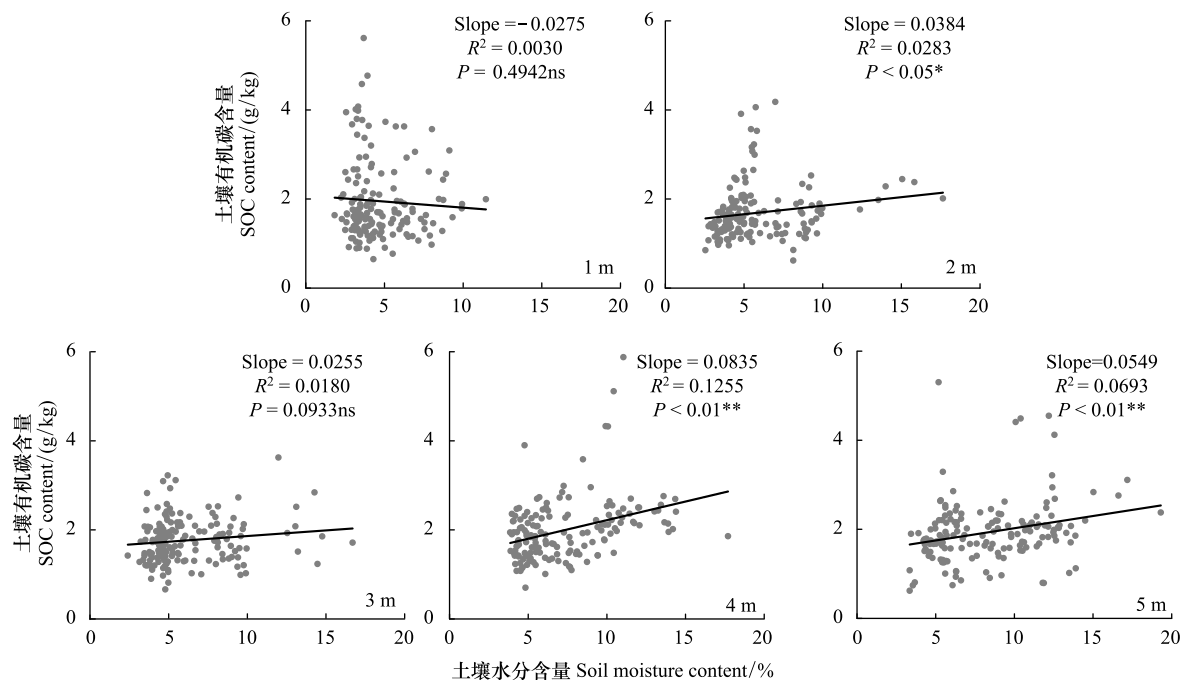


图6 不同深度土壤水分与土壤有机碳的关系

Fig.6 Relationship of soil moisture and SOC content in different soil layers

用^[49],碳的同化和积累也离不开水的参与,因此土壤水分的保持与土壤碳的固定并不是彼此孤立的两个过程^[11]。对于黄土高原土壤水分利用与固碳的以往研究集中于表层土壤^[8],或在较大尺度上研究蒸散与初级生产力的关系^[50],从而得出土壤水源涵养与固碳间的权衡关系。而本研究发现在深层土壤中,土壤水分与有机碳呈现显著的正相关性(图6),且土壤有机碳的增加速率低于土壤水分,说明深层土壤固碳与土壤水分含量关系紧密且土壤固碳需要大量土壤水分参与,因此深层土壤水分亏缺可能限制深层土壤的碳固定。这可能与水分亏缺制约深层细根生长^[51],而细根是土壤有机碳的重要来源有关。表层土壤有机碳与水分间相关性不显著,这主要与本研究尺度较小且表层土壤水分受气候(降水、太阳辐射、风速)地形(坡度、坡向)植被类型等诸多因素影响^[52],控制有机碳输入与输出的因素较多导致。

本研究结果表明,表层土壤是碳固定的关键层次,而深层土壤水分亏缺可能限制植被细根的发育,使深层有机碳输入减少。在干旱、半干旱的黄土高原,人工植被恢复的土壤水分利用效率往往较低,且常常不能持续提供多种、正向的生态系统服务。进行大规模植被恢复时,所选物种的生长季与降水同步可以提高水分利用效率,并且自然与人工恢复方式应并重^[22]。

4 结论

(1)不同植被恢复方式土壤水分均低于农田,草地、林地、灌木土壤水分含量依次降低,分别为8.30%、6.42%、5.54%,这主要由不同植被间根系的生长、吸收、利用以及冠层截留差异导致;植被恢复后0—5 m土层均出现水分亏缺,因不同深度土壤对水分消耗的驱动力存在差异,水分亏缺在表层1 m最低,2—3 m最高;对于不同恢复方式,林地土壤水分亏缺在恢复至21—30a时显著高于前一阶段(11—20a),而在生长31a后开始恢复。灌木、草地土壤水分亏缺随恢复年限延长不断增加。

(2)林地、灌木、草地土壤有机碳含量依次降低;林地固碳量随恢复年限增加,并且在恢复20a时固碳量与对照农田相比出现净增,反映了土壤有机质的矿化分解与累积过程;灌木固碳量随恢复年限先增加随后降低,主要与柠条老化,生长不良有关;草地固碳量随退耕年限增加呈下降趋势并且低于对照农田,表明草地的土壤碳增汇需要漫长过程。

(3) 表层 0—1 m 土壤水分因降水补给随恢复年限增加变化不显著,而深层土壤水分随恢复年限增加显著降低;但随恢复年限增加,土壤有机碳变化在各层土壤中均不显著。在深层土壤中,土壤水分与有机碳表现显著的正相关性,且土壤碳的增加速率低于土壤水分,说明深层土壤固碳与土壤水分含量关系紧密且深层土壤固碳需要水分参与。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。

参考文献 (References):

- [1] Jin T T, Fu B J, Liu G H, Wang Z. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(8): 2519-2530.
- [2] Porporato A, D'odorico P, Laio F, Ridolfi L, Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology of water-controlled ecosystems. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(8/12): 1335-1348.
- [3] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143(1): 91-100.
- [4] Yang L, Zhang H D, Chen L D. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas. *Science China Earth Science*, 2018, 61(3): 292-301.
- [5] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, Tam C, Chen X D. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [6] Chen L D, Wang J P, Wei W, Fu B J, Wu D P. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [7] Yang L, Wei W, Chen L, Jia F, Mo B. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3199-3217.
- [8] Lu N, Fu B J, Jin T T, Chang R Y. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708.
- [9] Deng L, Wang G L, Liu G B, Shangguan Z P. Effects of age and land-use changes on soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 105-112.
- [10] Gao X D, Li H C, Zhao X N, Ma W, Wu P T. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: Considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration. *Geoderma*, 2018, 319: 61-69.
- [11] 赵风华, 于贵瑞. 陆地生态系统碳—水耦合机制初探. *地理科学进展*, 2008, 27(1): 32-38.
- [12] Zhao F H, Yu G R, Li S G, Ren C Y, Sun X M, Mi N, Li J, Ouyang Z. Canopy water use efficiency of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(3): 99-108.
- [13] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [14] Chen L D, Wei W, Fu B J, Lü Y H. Soil and Water Conservation on the Loess Plateau in China: Review and Perspective. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2007, 31(4): 389-403.
- [15] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1/4): 242-251.
- [16] Zhang H C, Liu S G, Yuan W P, Dong W J, Xia J Z, Cao Y J, Jia Y W. Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(6): 1449-1455.
- [17] Chang R Y, Jin T T, Lü Y H, Liu G H, Fu B J. Soil carbon and nitrogen changes following afforestation of marginal cropland across a precipitation gradient in Loess Plateau of China. *PLoS ONE*, 2014, 9(1): e85426.
- [18] Li Z W, Liu C, Dong Y T, Chang X F, Nie X D, Liu L, Xiao H B, Lu Y M, Zeng G M. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 1-9.
- [19] 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.
- [20] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe. *Ecology*, 1992, 73(4): 1175-1181.
- [21] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Liu Y, Zhou J. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2013, 101: 122-128.
- [22] Fu B J, Wang J, Chen L D, Qiu Y. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2003, 54(1/2): 197-213.
- [23] 张北赢, 徐学选, 白晓华. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分分析. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 96-99.

- [24] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Zhou J, Jiao L, Liu J B. Linking the soil moisture distribution pattern to dynamic processes along slope transects in the Loess Plateau, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(12): 778.
- [25] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 温仲明, 杜峰. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. *土壤学报*, 2003, 40(2): 210-217.
- [26] 兰志龙, 潘小莲, 赵英, 司炳成, 汪有科, 焦瑞, 张建国. 黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤含水量的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 847-855.
- [27] Chen L D, Huang Z L, Gong J, Fu B J, Huang Y L. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. *Catena*, 2007, 70(2): 200-208.
- [28] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 蔡国军, 贾福岩. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应. *地理研究*, 2012, 31(1): 71-81.
- [29] 从心海, 梁一民, 李代琼. 黄土高原半干旱区沙棘根系特性与土壤水分动态研究. *水土保持通报*, 1990, 10(6): 98-103.
- [30] 马祥华, 白文娟, 焦菊英, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究. *水土保持通报*, 2004, 24(5): 19-23.
- [31] 李婧, 李占斌, 李鹏, 陈磊. 黄土高原丘陵沟壑区退耕生态系统土壤水分动态变化规律研究. *水土保持研究*, 2009, 16(5): 153-156.
- [32] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 137-147.
- [33] Gregorich E G, Greer K J, Anderson D W, Liang B C. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(3/4): 291-302.
- [34] Wang Y F, Fu B J, Lü Y H, Chen L D. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 2011, 85(1): 58-66.
- [35] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [36] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, Whitmore A P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1781-1796.
- [37] 刘伟, 程积民, 高阳, 程杰, 梁万鹏. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68-76.
- [38] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [39] 刘雨, 郑粉莉, 安韶山, 郭曼. 燕沟流域退耕地土壤有机碳、全氮和酶活性对植被恢复过程的响应. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 220-226.
- [40] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1485-1498.
- [41] Cheng W X. Rhizosphere priming effect: Its functional relationships with microbial turnover, evapotranspiration, and C-N budgets. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(9): 1795-1801.
- [42] 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.
- [43] 曲卫东, 陈云明, 王琳琳, 张飞, 张学伍. 黄土丘陵区柠条人工林土壤有机碳动态及其影响因素. *中国水土保持科学*, 2011, 9(4): 72-77.
- [44] 崔静, 陈云明, 黄佳健, 王琼芳, 姚志杰, 张飞. 黄土丘陵半干旱区人工柠条林土壤固碳特征及其影响因素. *中国生态农业学报*, 2012, 20(9): 1197-1203.
- [45] 党珍珍, 周正朝, 王凯博, 姚小萌. 黄土丘陵区不同恢复年限对天然草地土壤碳库动态的影响. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 49-54.
- [46] 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.
- [47] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 1998, 280(5368): 1393-1394.
- [48] He X B, Li Z B, Hao M D, Tang K L, Zheng F L. Down-scale analysis for water scarcity in response to soil-water conservation on Loess Plateau of China. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2003, 94(3): 355-361.
- [49] Knapp J. Water use in arid and semiarid regions: In the hands of local and watershed-level managers. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50(5): 412-412.
- [50] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [51] 曹扬, 赵忠, 渠美, 成向荣, 王迪海. 刺槐根系对深层土壤水分的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 765-768.
- [52] Hui S, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(1): 9-20.