

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.003; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.003.

康赛, 毕华兴, 管凝, 等. 黄土高原典型小流域不同人工林地土壤碳水权衡关系[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):197-204.

Kang Sai, Bi Huaxing, Guan Ning, et al. Soil carbon-water trade-offs in different artificial forestlands of typical small watersheds on Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):197-204.

黄土高原典型小流域不同人工林地土壤碳水权衡关系

康赛¹, 毕华兴^{1,2,3,4}, 管凝¹, 黄浩博¹, 曾星¹, 黎志鹏¹, 周韬¹, 邱婷¹

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083;

3. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 4. 水土保持国家林业和草原局重点实验室

北京市水土保持工程技术研究中心/林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学), 北京 100083)

摘要: [目的] 探究不同人工林土壤有机碳和含水量的权衡关系, 并明晰影响土壤碳水权衡的关键因素, 为黄土高原植被恢复和生态功能提升提供理论依据。[方法] 选取刺槐纯林、油松纯林、侧柏纯林、刺槐油松混交林和刺槐侧柏混交林 5 种典型人工林为研究对象, 并以荒草地作为对照, 通过测定 0—100 cm 土层中的有机碳和含水量, 确定各个林分类型中影响其土壤水碳变化的关键因素。[结果] 各植被类型的有机碳随土层深度呈逐渐下降的趋势, 土壤中的含水量则根据植被类型的不同而不同。通过计算各植被类型土壤碳和土壤水的均方根偏差(RMSD), 发现刺槐油松混交林和刺槐侧柏混交林的 RMSD 最小, 说明其水碳权衡最低。冗余分析结果表明: 不同植被类型的主要影响因素有所差异, 土壤物理性质主要通过影响土壤水分而改变碳水权衡。[结论] 从降低土壤碳水权衡的角度来看, 可以优先选择刺槐油松混交林和刺槐侧柏混交林进行林业生态工程的配置, 以促进土壤固碳和持水能力的协调以及生态系统的持续与稳定。

关键词: 土壤有机碳; 土壤水分; 碳水权衡; 黄土高原

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0197-08

Soil carbon-water trade-offs in different artificial forestlands of typical small watersheds on Loess Plateau

Kang Sai¹, Bi Huaxing^{1,2,3,4}, Guan Ning¹, Huang Haobo¹, Zeng Xing¹, Li Zhipeng¹, Zhou Tao¹, Qiu Ting¹

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of

Forest Resources, Beijing 100083, China; 3. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network

(CNERN), Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Soil and Water Conservation, National Forestry and

Grassland Administration/Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation/Engineering Research

Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Investigating the trade-offs relationship between soil water content and organic carbon content in different plantation forests, and clarifying the key factors influencing soil water and carbon dynamics, to provide a theoretical basis for vegetation restoration and enhancement of ecological functions on the Loess Plateau. [Methods] This study selected five typical plantations (*Robinia pseudoacacia* pure forest, *Pinus tabulaeformis* pure forest, *Platycladus orientalis* pure forest, *Robinia pseudoacacia*-*Pinus tabulaeformis* mixed forest, and *Robinia pseudoacacia*-*Platycladus orientalis* mixed forest) as research subjects, with grassland as the control. By measuring soil organic carbon and moisture content in the 0—100 cm soil layer, key factors influencing soil carbon-water dynamics in each forest stand type were identified. [Results] Organic carbon content decreased gradually with increasing soil depth across all vegetation types, while soil moisture content varied according to vegetation

收稿日期: 2025-03-16

修回日期: 2025-04-16

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 国家重点研发课题(2022YFF1300401, 2024YFD2200504); 国家自然科学基金项目(U2243202)

第一作者: 康赛(2001—), 男, 江西丰城人, 硕士研究生, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: 2449518275@qq.com

通信作者: 毕华兴(1969—), 男, 陕西榆林人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

types. By calculating the root mean square deviation (RMSD) of soil carbon and moisture for each vegetation type, it was found that the mixed forests of *Robinia pseudoacacia-Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia-Platycladus orientalis* had the lowest RMSD, indicating the lowest carbon-water trade-off. The results of the redundancy analysis (RDA) indicated that: the main influencing factors varied across vegetation types, and soil physical properties primarily affected the carbon-water trade-off by influencing soil moisture. [Conclusion] From the perspective of reducing the soil carbon-water trade-off, priority should be given to *Robinia pseudoacacia-Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia-Platycladus orientalis* mixed forests in forestry ecological engineering planning. This approach promotes the coordination between soil carbon sequestration and water retention capacity, and ensures ecosystem sustainability and stability.

Keywords: soil organic carbon; soil moisture; carbon-water trade-off; Loess Plateau

土壤碳库作为陆地生态系统中最大的碳库,其积累和分解在全球碳循环过程中起着重要作用^[1]。土壤水分是植被恢复的关键制约因子,影响着植被的生理生长过程,在干旱半干旱地区生态恢复中具有不可替代的生态水文功能^[2]。充足的土壤水分有利于维持植被多样性和生产力,保障生态系统稳定性。植被恢复是生态系统恢复的主要手段,我国政府在黄土高原实施了一系列植被恢复措施,促进了该地区生物多样性、保持土壤、固碳等生态系统功能的提升,有效防治水土流失^[3-4]。植被恢复可以有效增强土壤固碳效应,但同时植物的生长会消耗大量的水分从而导致土壤的水分亏缺,土壤碳固存与水分消耗的权衡关系直接决定生态系统的稳定性和恢复成效^[5]。因此,对黄土高原地区不同植被下碳水权衡的研究,有助于了解土壤水分和有机碳对植被类型的响应特征。

土壤碳-水耦合机制是植被恢复过程中生态功能协同与权衡的核心科学问题。植物通过凋落物输入、根系分泌物及微生物活动促进有机碳的积累,而植被蒸腾、冠层截留和土壤水分再分配则调控水分动态。碳与水的相互作用体现在:有机碳通过改善土壤结构增强持水能力,而水分有效性则制约植物生长与碳同化效率,形成正反馈或负反馈机制,因此在不同植被土壤有机碳和含水量之间存在着复杂的权衡协同关系^[6]。梁潇瑜等^[7]在河北坝上地区通过构建土壤碳水耦合调和度模型分析不同植被类型下的土壤碳水变化特征,发现植被恢复固碳效应的增加是以深层土壤水分亏缺为代价。Liu等^[8]认为在半干旱等水分限制地区,立地条件和植被类型对土壤固碳和土壤水源涵养之间的权衡关系有显著的影响。均方根偏差(Root Mean Square Deviation, RMSD)通过标准化碳、水数据并计算其偏离均值的离散程度,可有效反映两者协同或权衡的强度:RMSD值越低,表明碳-水关系越协调^[9]。计算不同

植被土壤有机碳和含水量之间的RMSD值,可以进一步了解生态系统碳水耦合机制,对优化植被配置,生态恢复和可持续管理具有指导意义。

黄土高原地区一直是世界上水土流失最为严重的地区之一,为改善生态环境,相继开展了一系列“退耕还林(还草)”等重大生态工程^[10]。经过长期的植被恢复,农田逐渐转变为林地和草地,植被覆盖度大幅度增加,土壤碳水也随之变化^[11]。目前研究多集中于土壤固碳或土壤水分单一功能对植被类型的响应^[12],或者单一树种以及不同林龄下土壤碳水的变化特征^[13],而对不同人工植被类型下土壤碳水权衡与协调关系的研究较少。因此,本研究选取山西吉县蔡家川流域的典型人工林分,以荒草地为对照,分析对比不同植被类型下土壤有机碳和土壤含水量的响应特征,探究二者之间的权衡关系及其影响因素,旨在为黄土高原植被恢复和生态系统功能提升提供理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川小流域(110°39'45"—110°47'45"E,36°14'27"—36°18'23"N)。该流域面积约为37.57 km²,海拔900~1 590 m,地势西高东低,黄土母质。气候为暖温带大陆性气候,降水主要集中在6—9月,年平均降水量为579 mm,年平均气温10℃,日照时数2 538 h,无霜期平均为172 d。主要的乔木树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林、油松(*Pinus tabuliformis*)人工林、侧柏(*Platycladus orientalis*)人工林等。主要灌木有茅莓(*Rubus parvifolius*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)。主要草本植物有针藁草(*Carex dahurica*)、细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、甘菊(*Chrysanthemum lavandulifolium*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和采样方法 2024年6—8月在山西

吉县蔡家川流域选取坡度、坡向、密度和林龄相近的刺槐、油松、侧柏纯林和刺槐侧柏、刺槐油松混交林典型人工林为研究对象,同时以荒草地作为对照组。采用样地调查法,样地面积设置为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,每个林分类型选取 3 个样地,调查每种林分的基本信息以及

记录郁闭度、密度、坡度、坡向等指标(表 1)。

每个样地挖取 3 个深度为 1 m 的土壤剖面,每 20 cm 为一层,每层使用环刀三次重复采集土样来测定土壤的物理性质。采用烘干法测定土壤含水量,重铬酸钾法测量土壤中的有机碳。

表 1 不同林分样地基本概况
Table 1 Basic overview of plots with different forest types

林分类型	海拔 /m	坡度 /($^{\circ}$)	坡向	密度/(株· hm^{-2})	树高/m	胸径/cm	林龄 /a	郁闭度
RP	1150.9	20	阳坡	1300	9.24	17.08	34	0.53
PT	1121.3	21	半阳坡	1150	9.11	17.02	35	0.59
PO	1123.2	15	半阳坡	1325	5.29	13.13	35	0.41
RP×PT	1085.7	25	半阳坡	1550	9.49	12.76	35	0.66
RP×PO	1184.1	15	半阳坡	1450	9.92	12.11	35	0.64
G	1047.9	15	阳坡	—	—	—	—	—

注:RP代表刺槐纯林;PT代表油松纯林;PO代表侧柏纯林;RP×PT代表刺槐油松混交林;RP×PO代表刺槐侧柏混交林;G代表荒草地。

1.2.2 土壤含水量测定 由环刀采集的土壤样品放入 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘干 12 h 测定:

$$\text{SWC} = (M_1 - M_2) / M_2 \quad (1)$$

式中:SWC 为土壤含水量(%); M_1 为土壤鲜重(g); M_2 为土壤干重(g)

1.2.3 土壤有机碳测定 土壤有机碳使用“重铬酸钾氧化外加加热法”,在加热条件下,用稍过量的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 对土壤有机碳氧化,用标准 FeSO_4 溶液进行滴定,计算出有机质含量。计算公式如下:

$$\text{SOC} = \frac{0.2 \times 6 \times 10}{V_0} \times (V_0 - V) \times 0.003 \times 1.33 \times 100 / M \quad (2)$$

式中:SOC 为土壤有机碳(g/kg); V_0 为空白对照 FeSO_4 消耗量(ml); V 为土壤样品 FeSO_4 消耗量(ml); M 为土壤样品质量(g)。

1.2.4 土壤碳水权计算 SOC 和 SWC 之间的权通过均方根偏差(RMSD)进行量化,首先需要对 SOC 和 SWC 进行标准化,以消除变量之间的量纲和维度关系,保证数据具有可比性。标准化值同时也被视为 ES 的相对效益,计算公式如下^[14]:

$$\text{BSW} = (\text{SWC}_{\text{obs}} - \text{SWC}_{\text{min}}) / (\text{SWC}_{\text{max}} - \text{SWC}_{\text{min}}) \quad (3)$$

$$\text{BSO} = (\text{SOC}_{\text{obs}} - \text{SOC}_{\text{min}}) / (\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}}) \quad (4)$$

式中:BSW 和 BSO 为土壤含水量和土壤有机碳的相对效益; SWC_{obs} 和 SOC_{obs} 为指标的观测值; SWC_{max} 和 SWC_{min} 分别为土壤含水量在所有样地中的最大值、最小值; SOC_{max} 和 SOC_{min} 分别为土壤含水量在所有样地中的最大值、最小值。

RMSD 值计算方式如下^[15]:

$$\text{RMSD} = \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (\text{ES}_i - \text{ES}_n)^2} \quad (5)$$

式中: n 为生态指标的数量; ES_i 为生态指标 i 标准化后的值; ES_n 为 n 个指标的平均值。

1.2.5 数据处理 采用 Excel 2019 进行数据处理,使用 Origin 2022 进行绘图制作。采用 SPSS 的多重比较法(Least Significant Difference, LSD)、单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同植被类型的 SWC 和 SOC 和土壤理化性质指标进行差异显著性分析,通过 Canoco5 进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 土壤碳水对不同植被类型的响应及其相关性

不同林分类型土壤有机碳的垂直变化特征均随土层加深呈下降趋势(图 1),对于不同植被类型的总有机碳而言,表现为 $\text{RP}(5.82\text{ g/kg}) > \text{RP} \times \text{PT}(4.95\text{ g/kg}) > \text{G}(4.71\text{ g/kg}) > \text{RP} \times \text{PO}(4.04\text{ g/kg}) > \text{PO}(3.46\text{ g/kg}) > \text{PT}(2.88\text{ g/kg})$,其中 PT 和 PO 的土壤含碳量要显著低于其他植被类型($p < 0.05$)。RP×PT 的土壤含水量在 0—20 cm 的土壤层中最高,RP×PO, PO 和 RP 的土壤含水量随土层加深而下降,而 PT 和 G 的土壤含水量变化特征与之相反,总的土壤含水量表现为 $\text{RP} \times \text{PO}(11.34\%) > \text{RP} \times \text{PT}(9.82\%) > \text{PT}(7.75\%) > \text{PO}(6.97\%) > \text{RP}(6.16\%) > \text{G}(6.02\%)$,其中 RP×PO 的土壤含水量要显著高于其他植被类型($p < 0.05$)。

如表 2 所示,RP×PT 和 RP×PO 的土壤含水量与土壤有机碳存在显著的正相关关系,说明在这两种植被类型下土壤水碳存在协同效应,而 G 呈现显著的负相关关系,说明其土壤水碳之间存在权衡关系。

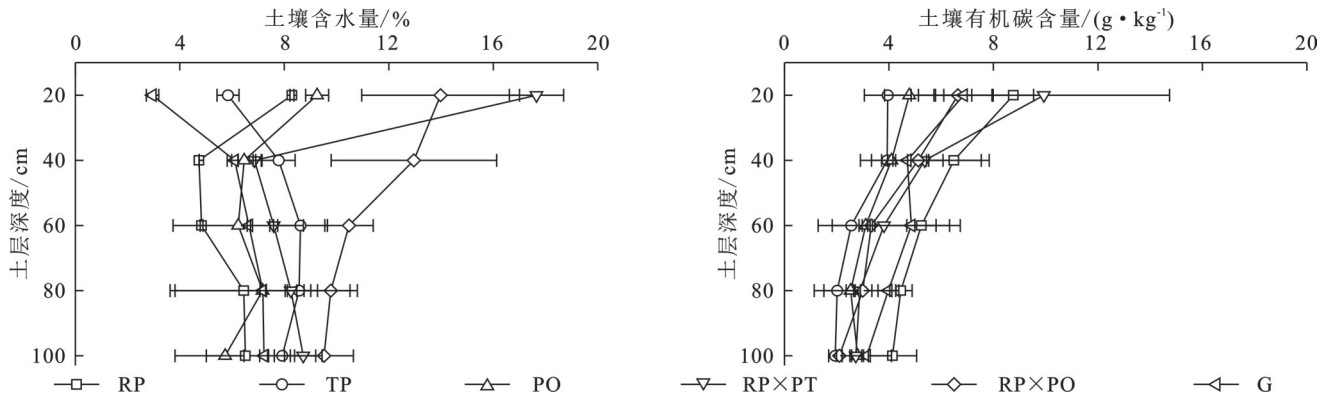


图 1 不同植被恢复类型下土壤有机碳和含水量随土层深度的变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of soil organic carbon and moisture content with soil depth under different vegetation restoration types

表 2 不同植被恢复类型下的土壤有机碳和含水量及其相关性
Table 2 Soil organic carbon, moisture content, and their correlations under different vegetation restoration types

林分类型	土壤含水量/%	土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)	相关系数
RP	6.16±1.1c	5.82±0.26a	0.431
PT	7.75±0.43bc	2.88±0.38d	-0.387
PO	6.97±1.4c	3.46±0.24cd	0.353
RP×PT	9.82±0.06ab	4.95±1.12ab	0.644**
RP×PO	11.34±1.82a	4.04±0.16bc	0.782**
G	6.02±0.1c	4.71±0.65ab	-0.736**

注:表中数据为平均值±标准差;不同字母表示不同植被类型间差异显著($p < 0.05$);*代表显著相关 $p < 0.05$;**代表极显著相关($p < 0.01$)。

2.2 不同植被类型土壤碳水权衡关系

对不同植被土壤碳水相对效益计算,结果如图 2 所示,除了刺槐纯林的相对效益是土壤有机碳更高,其他植被类型均是土壤含水量占优势。这说明在不同植物群落里,当土壤有机碳与土壤含水量产生冲突时,土壤含水量往往占据主导地位。不同植被的土壤水碳权衡有所差异,其RMSD依次是RP(0.14)、PT(0.22)、PO(0.12)、RP×PT(0.10)、RP×PO(0.08)和G(0.29)(图 3),其中PT和G的RMSD要显著高于其他植被类型($p < 0.05$)。

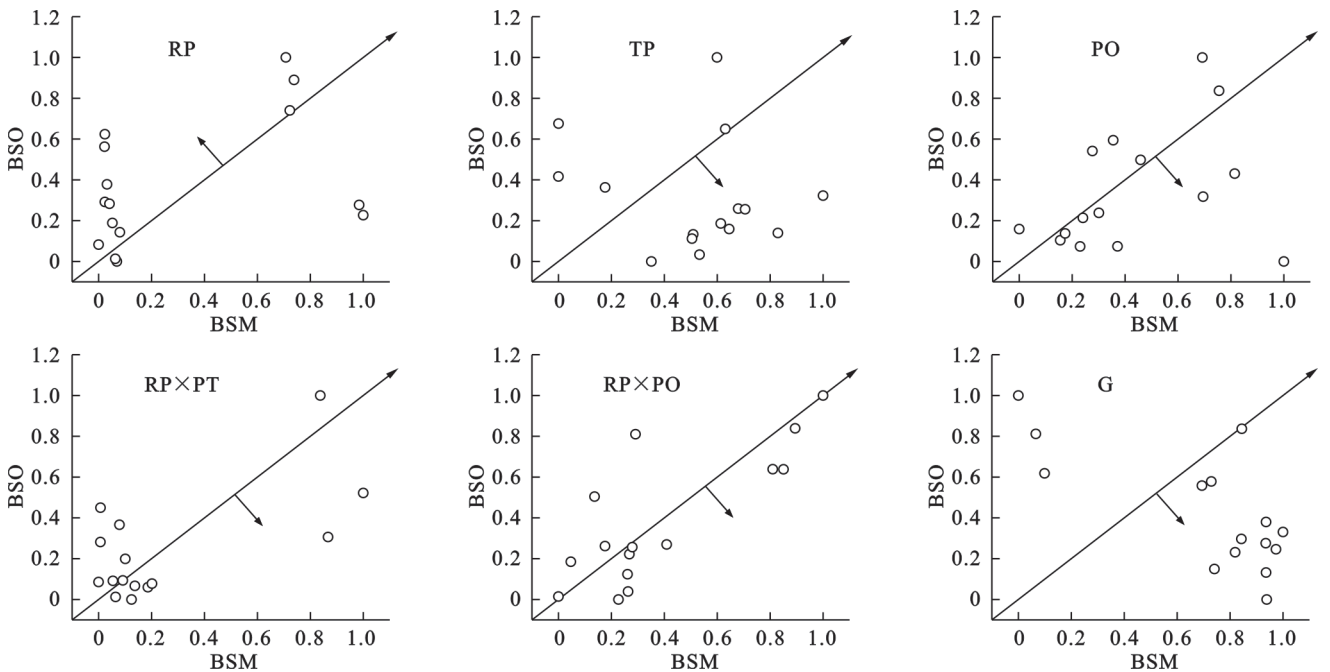


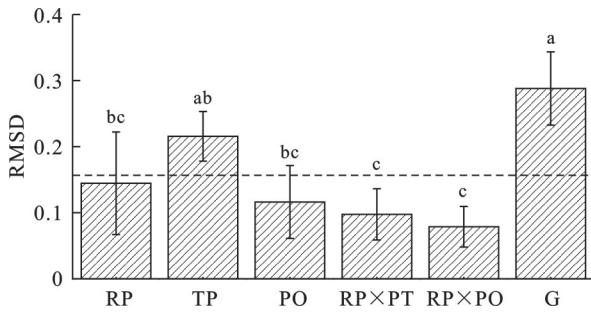
图 2 不同植被类型下土壤有机碳和含水量之间的相对效益

Fig. 2 Relative benefits between soil organic carbon and moisture content under different vegetation types

PT、PO和G的RMSD随土层深度的变化趋势都为先减小再增大,而RP和RP×PO则随土层深度先上升再下降,RP×PT的权衡则一直是下降趋势(表 3)。在 0—20 cm 的浅层土层中,G、PT、RP×PT

的RMSD较高,分别为0.38,0.21,0.20;RP×PO和PO较低,分别为0.10,0.13;RP最低,为0.08。20—40 cm 的土层为大多植被类型土壤权衡的转折点,RP和RP×PO的RMSD在土层深度 40 cm 之后开始下降,

此后随土层深度的增加整体上一直处于较低的权衡,而PT和G的权衡则在土层深度40 cm后逐渐上升。



注:图中不同小写字母表示不同植被类型间差异性显著 $p < 0.05$ 。

图3 不同植被类型的RMSD

Fig. 3 RMSD for different vegetation types

2.3 土壤理化性质对碳水含量及其权衡的影响

土壤有机碳和含水量及其碳水权衡受到土壤理化性质的影响,不同林分间土壤理化性质有所差异(表4)。以土壤的物理性质(容重、土壤孔隙度、土壤质地)和化学性质(pH、全氮、全磷、氨氮、硝氮和速效磷)为解释变量,SWC、SOC和RMSD为响应变量进行冗余分析(图4),解释量表明环境变量对响应变量总变异的解释能力,贡献度和显著性检验表明单个环境变量对响应变量变异的相对重要性,根据各林分的解释量

表4 不同植被类型土壤理化性质

Table 4 Soil physicochemical properties under different vegetation types

土壤理化性质	RP	PT	PO	RP×PT	RP×PO	G
容重/($g \cdot cm^{-3}$)	$1.26 \pm 0.03ab$	$1.16 \pm 0.04c$	$1.27 \pm 0.03ab$	$1.18 \pm 0.05c$	$1.21 \pm 0.03bc$	$1.3 \pm 0.01a$
土壤孔隙度/%	$49.06 \pm 0.6ab$	$49.13 \pm 0.87ab$	$48.05 \pm 2.17bc$	$49.72 \pm 1.9ab$	$51.12 \pm 0.91a$	$46.24 \pm 1.06c$
砂粒/%	$12.98 \pm 0.2d$	$14.6 \pm 0.22ab$	$15.1 \pm 0.29a$	$14.15 \pm 0.47bc$	$13.66 \pm 0.38c$	$14.01 \pm 0.34bc$
粉粒/%	$84.84 \pm 0.21a$	$82.91 \pm 0.18c$	$81.92 \pm 0.34d$	$83.36 \pm 0.43bc$	$83.7 \pm 0.41b$	$83.64 \pm 0.35b$
黏粒/%	$2.17 \pm 0.02 e$	$2.49 \pm 0.04c$	$2.97 \pm 0.05a$	$2.49 \pm 0.03c$	$2.64 \pm 0.03b$	$2.35 \pm 0.01d$
pH	$8.81 \pm 0.01a$	$8.66 \pm 0.01c$	$8.8 \pm 0.01a$	$8.67 \pm 0.01c$	$8.71 \pm 0.05b$	$8.79 \pm 0.01a$
全氮/($g \cdot kg^{-1}$)	$0.55 \pm 0.03bc$	$0.37 \pm 0.09c$	$0.75 \pm 0.05ab$	$0.84 \pm 0.28a$	$0.59 \pm 0.03abc$	$0.6 \pm 0.02abc$
全磷/($g \cdot kg^{-1}$)	$0.39 \pm 0.05ab$	$0.29 \pm 0.05c$	$0.48 \pm 0.03a$	$0.27 \pm 0.05c$	$0.31 \pm 0.04bc$	$0.34 \pm 0.03bc$
氨氮/($mg \cdot kg^{-1}$)	$8.35 \pm 0.31bc$	$9.53 \pm 1.29b$	$7.3 \pm 0.29c$	$12.77 \pm 0.46a$	$12.36 \pm 1a$	$7.54 \pm 1.71c$
硝氮/($mg \cdot kg^{-1}$)	$5.06 \pm 1.82a$	$3.03 \pm 0.94c$	$3.03 \pm 0.94a$	$8.45 \pm 2.46c$	$7.95 \pm 1b$	$5.12 \pm 1.12a$
速效磷/($mg \cdot kg^{-1}$)	$0.62 \pm 0.11ab$	$0.4 \pm 0.05b$	$0.57 \pm 0.47ab$	$0.32 \pm 0.13b$	$0.22 \pm 0.09b$	$0.83 \pm 0.03a$

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母表示不同林分类型之间差异显著($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同植被类型土壤碳水的分布特征

在干旱和半干旱地区,植被本身的生长很大程度上受到水分的限制。不同植被类型的表层土壤含水量表现出显著的差异,主要由于树冠截留、蒸散能力、根系分布和相关土壤物理化学过程的综合影响^[16]。在表层土壤当中,相比于荒草地,植被恢复后的含水量有所增加,这可能是人工林恢复后,植被通过凋落物输入和根系活动改善土壤结构,增加有机质含量和孔隙度,从而提升了保水能力。刺

和贡献度判断影响该林分土壤水碳的关键因素。

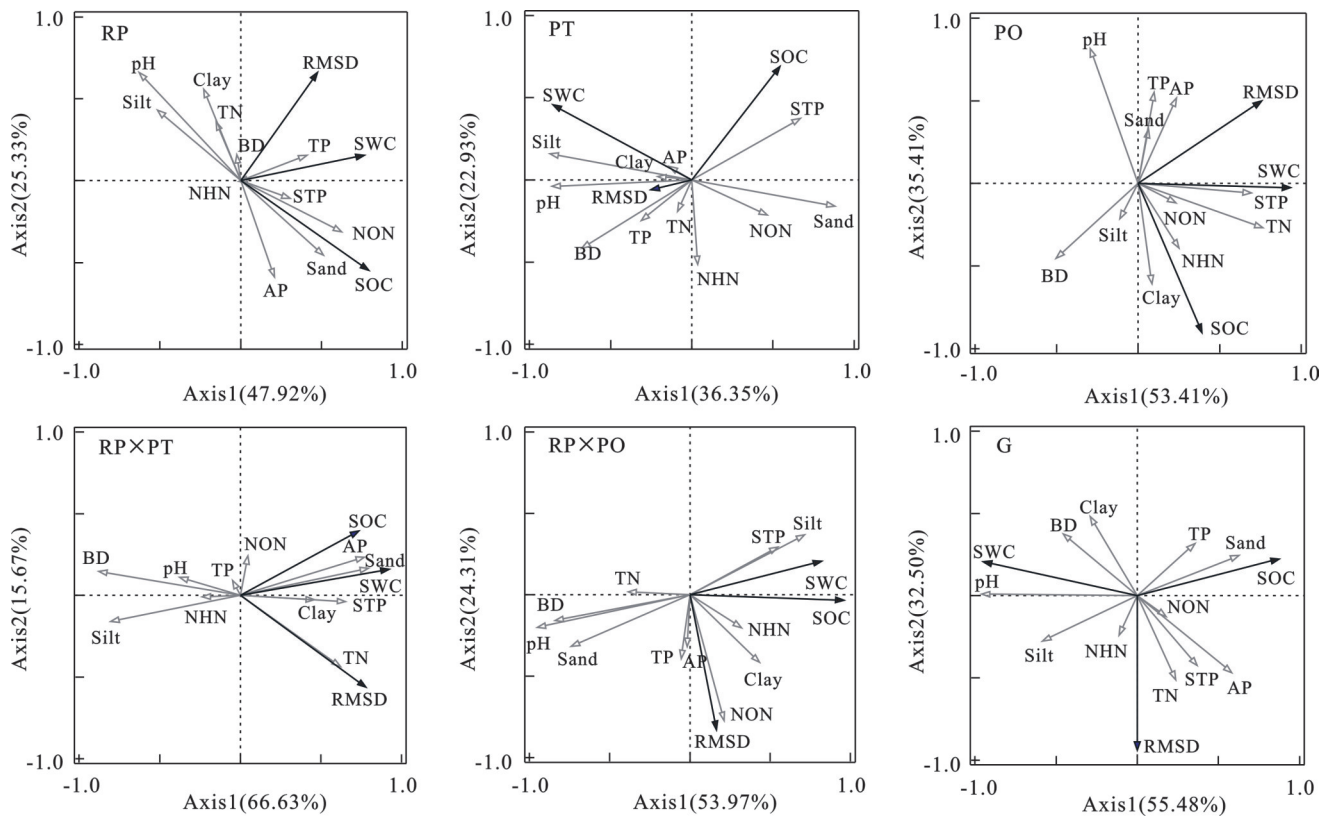
表3 不同植被类型RMSD随土层深度变化特征

Table 3 Variation characteristics of RMSD with soil depth under different vegetation types

土层深度/cm	RP	PT	PO	RP×PT	RP×PO	G
0—20	0.08	0.21	0.13	0.20	0.10	0.38
20—40	0.23	0.13	0.09	0.13	0.13	0.15
40—60	0.12	0.25	0.10	0.06	0.05	0.19
60—80	0.15	0.26	0.20	0.05	0.05	0.32
80—100	0.14	0.23	0.06	0.04	0.08	0.40

不同植被类型下对土壤碳水权衡的主要影响因子也各不相同(表5),在刺槐纯林中,硝氮和总孔隙度是影响水碳的关键因子,有显著的正相关关系($p < 0.05$)。容重对侧柏纯林和刺槐油松混交林的解释率分别是17.5%和51.7%,对水碳含量及其权衡有显著的负效应($p < 0.05$),而土壤容重通常随土层深度逐渐增加,这表明这两种林分在深层土壤存在着低权衡的水碳关系。土壤颗粒组成对油松纯林有着较大影响,砂粒是其主要的影响因子,解释率为29.3%($p = 0.002$)。刺槐侧柏混交林和荒草地的主要影响因子为pH和硝氮。

槐油松混交林的表层土壤含水量较高,可能与其生长旺盛、凋落物蓄积量大以及林下植被多样性丰富有关,这在一定程度上可以保持土壤水分^[17]。随着土层深度的增加,刺槐林的土壤含水量呈现下降趋势,因为刺槐属于深根性树种,耗水能力强,在深层土壤中处于水分亏缺状态。本研究发现,在0—20 cm的表层土壤中,油松的土壤含水量较低,这可能是因为油松的蒸腾速率和根系吸水能力较强,导致土壤水分消耗更快,相比之下侧柏的土壤水分更高,因为其水分利用效率更高,维持土壤水分的能力更强^[18]。



注:BD表示容重;STP表示土壤孔隙度;Sand表示砂粒;Silt表示粉粒;Clay表示黏粒;TN表示全氮;TP表示全磷;NHN表示氨氮;NON表示硝氮;AP表示全磷;RMSD表示权衡系数;SWC表示土壤含水量;SOC表示土壤有机碳。

图 4 不同植被类型下土壤碳水权衡与土壤理化性质冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil carbon-water trade-offs and soil physicochemical properties under different vegetation types

表 5 各林分主要影响因子的重要性排序和显著性检验

Table 5 Ranking of the importance and significance tests of main influencing factors of each forest stand

林分类型	重要性排序	指标	解释度/%	贡献度/%	F	p
RP	1	NON	21.2	27.2	3.5	0.020
	2	STP	15.9	20.4	4.2	0.034
PT	1	Sand	29.3	42.3	5.4	0.002
	1	TN	34.1	37.1	6.7	0.002
PO	2	pH	22.5	24.5	6.2	0.014
	3	BD	17.5	19.0	7.5	0.006
	4	STP	6.3	6.9	3.2	0.046
	1	BD	51.7	57.6	13.9	0.004
RP×PT	2	AP	10.0	11.2	3.1	0.036
	3	TN	9.5	10.6	3.6	0.038
RP×PO	1	pH	49.7	62.6	12.8	0.002
	2	NON	16.2	20.4	5.7	0.022
G	1	pH	51.1	55.5	13.6	0.002
	2	NON	9.7	10.5	3.7	0.046

林地植被会产生大量凋落物和根系到表层土壤当中,因此土壤有机碳具有表聚性,并且随着土层深度而逐渐下降^[19]。在 0—20 cm 的表层土壤中,刺槐和刺槐油松混交林的土壤含碳量较高,Huang 等^[20]研

究表明,氮的可用性会限制植物的生长,同时限制土壤当中的碳含量,而刺槐作为典型的固氮树种,因此其土壤的固碳能力更强。树种类型是决定土壤碳含量的关键因素。在本研究中,整体表现为阔叶树种优于针叶树种,混交林优于纯林,主要原因是阔叶树种的林下生物量更多,而针叶树种(如油松)的凋落物含有木质素,其分解速度更慢,因此土壤有机碳含量更低^[21]。而与纯林相比,混交林凋落物多样性增加,微生物的活性更强,同时具有根系互补,养分耦合等特性,可以显著提升土壤碳固定的能力^[22]。

3.2 不同植被类型的土壤碳水权衡关系

植树造林可能会增加土壤水分消耗,土壤干燥和碳流失,导致碳水权衡加剧,而在不同植被类型下这种权衡的变化更加显著^[23]。林下土壤中荒草地的土壤碳水呈现出负相关的关系,这表明在荒草地下土壤碳含量与土壤水存在较大的权衡。各植被类型土壤有机碳的变化特征一致,因此权衡差异可能是受植被的耗水特性所影响^[24]。碳水权衡的本质是植被-土壤系统对资源分配策略的适应性响应。本研究中混交林的 RMSD 最低,主要原因可能是不同根系树种的功能互补性(刺槐深根与针叶树种浅根协同利用水

分),这也揭示了水碳耦合的正反馈机制^[25]。

此外,在植被恢复过程当中,相对效益通常是土壤水分,因为在黄土高原地区,乔木和灌木具有较大的根生物量和较深的根长,因此对水分的需求更高。合理的植被配置有利于植被恢复,相关研究表明草地可以作为黄土高原地区植被恢复的关键策略,但从生态系统多样性的角度来看,林木和灌木的作用也不可忽视,科学的植被搭配有利于固碳和水源涵养等多种生态功能的协同发展,增强生态系统的稳定性^[11,26]。

3.3 土壤碳水权衡的影响因素

长期的植被恢复会改变土壤结构、颗粒组成和养分含量等土壤特性,从而影响土壤有机碳和含水量^[27]。本研究以土壤理化因子为解释变量,土壤碳含量和含水量为响应变量进行冗余分析。结果表明,刺槐林的土壤水碳主要影响因子是硝氮,Xiong等^[28]认为刺槐作为落叶阔叶林,需要更多的有机质维持其生长发育,促进土壤中有机碳的转化。此外,刺槐叶片的寿命较短,这意味着有更多的凋落物和养分返回土壤,而凋落物和植物根系的分泌物将有助于氮磷等营养元素的积累。

与荒草地相比,植被恢复后的林地土壤容重明显降低同时孔隙度增加,这将影响土壤的保水性能和持水能力。PO和RP×PT的RMSD受到土壤容重的影响,可能是因为土壤容重能够改变土壤水分的渗透和分布,低容重有良好的通气性和土壤结构,这表明土壤结构可以通过影响土壤的水文过程从而影响碳水权衡^[29]。土壤碳水之间的权衡还与土壤颗粒组成有很大关联,不同植被类型土壤属性也有所差异。本研究表明,与其他植被恢复类型相比,油松林土壤砂粒含量较高,这与它本身所分泌的物质会抑制其他植物生长,从而缺少其他植物对土壤结构的改良所导致^[30],这可能也是砂粒作为油松林土壤水碳主要影响因子的原因之一。本研究中RP×PT和RP的土壤有机碳含量较高,主要原因可能是其土壤质地均匀,粉粒和黏粒含量较为适宜,可以有效地抑制土壤有机碳的分解,从而增加土壤有机碳的物理和水文保护作用,促进有机碳的积累。

4 结论

本研究主要分析了黄土高原不同植被类型下0—100 cm土壤有机碳和含水量的空间分布和权衡变化,有机碳随土层深度呈逐渐下降的趋势,在表层土壤中,含水量则根据植被类型的不同有所差异。除刺槐纯林外,其他林分土壤含水量的相对效益要大于土壤碳含量,这表明在植被恢复过程中,土壤水分相较于土壤固

碳发挥着更关键的作用。根据权衡计算,各植被类型的RMSD从大到小依次为G(0.29)、PT(0.22)、RP(0.14)、PO(0.12)、RP×PT(0.10)、RP×PO(0.08),刺槐油松混交林和刺槐侧柏混交林的RMSD最小,说明其水碳权衡最低。不同植被类型下,影响其土壤水碳含量及其权衡的主要因素也不同,土壤氮主要影响刺槐林,土壤物理性质主要通过影响土壤水分而改变碳水权衡。因此,在生态恢复过程中,为保持土壤碳水的平衡关系,要从树种属性和土壤性质等各方面综合考虑。在本研究区域中,从降低土壤碳水权衡的角度来看,可以优先选择刺槐油松混交林和刺槐侧柏混交林进行植被配置,以促进土壤固碳和持水能力的协调以及生态系统的持续与稳定。

参考文献(References):

- [1] Wang H H, Yue C, Mao Q Q, et al. Vegetation and species impacts on soil organic carbon sequestration following ecological restoration over the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2020, 371: 114389.
- [2] Zhang Y W, Feng S, Wang J, et al. Assessing the change in soil water deficit characteristics from grassland to forestland on the Loess Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 167: 112616.
- [3] 安韶山,胡洋,王宝荣.黄土高原植被恢复中土壤有机碳稳定机制研究进展[J].*应用生态学报*, 2024, 35(9): 2413-2422.
An S S, Hu Y, Wang B R. Research advance on soil organic carbon stabilization mechanisms during vegetation restoration on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(9): 2413-2422.
- [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.
Feng Q, Yang L, Wang J, et al. Response of soil moisture and soil organic carbon to vegetation restoration in deep soil profiles in Loess Hilly Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6598-6609.
- [5] 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.
- [6] 王德富,董凌勃,李澳,等.毛乌素沙地不同植被恢复类型的土壤碳水效应[J].*水土保持学报*, 2024, 38(3): 101-110, 120.
Wang D F, Dong L B, Li A, et al. Soil organic carbon and moisture effects of different vegetation restoration types in the Mu Us Sandy Land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 101-110, 120.
- [7] 梁潇瑜,信忠保,刘山宝,等.河北坝上地区植被恢复的土壤碳水效应[J].*水土保持学报*, 2022, 36(6): 206-212.
Liang X Y, Xin Z B, Liu S B, et al. The coupling interaction of soil organic carbon and soil water of vegetation restoration in Bashang area of Hebei [J]. *Journal of Soil*

- and Water Conservation, 2022, 36(6):206-212.
- [8] Liu Y, Li Y. Synergy and trade-off between carbon sequestration and soil water balance: impact of revegetation choices[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(23):651.
- [9] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10(4):210-216.
- [10] 王世军, 杨磊, 段兴武, 等. 黄土高原小流域植被恢复的土壤水分和养分权衡效应研究[J]. 土壤通报, 2022, 53(2):356-365.
Wang S J, Yang L, Duan X W, et al. Trade-off effects of soil moisture and soil nutrients under vegetation restoration in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2):356-365.
- [11] Chen Y X, Wei T X, Ren K, et al. The coupling interaction of soil organic carbon stock and water storage after vegetation restoration on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 306:114481.
- [12] Nan G W, He X Y, Ma L, et al. Identify a sustainable afforestation pattern for soil carbon sequestration: considering both soil water-carbon conversion efficiency and their coupling relationship on the Loess Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35(6):2058-2070.
- [13] Wang J, Fu B J, Jiao L, et al. Age-related water use characteristics of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021(301/302):108344.
- [14] Chang Y Q, Han L, Chen R, et al. Modelling of the trade-off between the deep soil moisture and vegetation restoration in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2024, 645:132274.
- [15] Gong C, Tan Q Y, Liu G B, et al. Advantage of mixed trees in the trade-off between soil water storage and tree biomass: a meta-analysis from artificially planted forests in Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2022, 214:106232.
- [16] Schwärzel K, Zhang L L, Montanarella L, et al. How afforestation affects the water cycle in drylands: a process-based comparative analysis[J]. Global Change Biology, 2020, 26(2):944-959.
- [17] Yang X, Li T C, Shao M A. Factors controlling deep-profile soil organic carbon and water storage following *Robinia pseudoacacia* afforestation of the Loess Plateau in China[J]. Forest Ecosystems, 2022, 9:100079.
- [18] 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, 491:119156.
- [19] 郭艳杰, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 不同密度油松林地土壤水碳分布特征及其耦合关系[J]. 应用生态学报, 2025, 36(1):50-58.
Guo Y J, Bi H X, Zhao D Y, et al. Soil water and carbon distribution characteristics and their coupling relationship in *Pinus tabulaeformis* plantations with different densities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(1):50-58.
- [20] Huang Y Z, Xin Z B, Ran L S, et al. Topsoil carbon sequestration of vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2022, 177:106570.
- [21] Zhang Q Y, Jia X X, Wei X R, et al. Total soil organic carbon increases but becomes more labile after afforestation in China's Loess Plateau[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 461:117911.
- [22] 臧凯旋, 强方方, 刘登强, 等. 黄土丘陵区撂荒地枣林土壤有机碳储量和土壤储水量耦合效应分析[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(5):144-150, 175.
Zang K X, Qiang F F, Liu D Q, et al. Coupling effect analysis of soil organic carbon storage and soil water storage in *Ziziphus jujuba* forests on abandoned barren hills in Loess Hilly Region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(5):144-150, 175.
- [23] Yang F, Huang M B, Li C H, et al. Changes in soil moisture and organic carbon under deep-rooted trees of different stand ages on the Chinese Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 328:107855.
- [24] 张飞, 郑诚, 袁浏欢, 等. 黄土丘陵区典型植被生态系统功能的权衡关系[J]. 草地学报, 2024, 32(4):1234-1242.
Zhang F, Zheng C, Yuan L H, et al. Trade-off relationship of typical vegetation ecosystem functions in Loess Hilly Areas[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(4):1234-1242.
- [25] Zeng Y L, Wu H L, Ouyang S, et al. Ecosystem service multifunctionality of Chinese fir plantations differing in stand age and implications for sustainable management[J]. Science of the Total Environment, 2021, 788:147791.
- [26] Yu X, Zhou W J, Chen Y P, et al. Spatial variation of soil properties and carbon under different land use types on the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703:134946.
- [27] Guo S J, Xu Y D, He C, et al. Differential responses of soil quality in revegetation types to precipitation gradients on the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, (276/277):107622.
- [28] Xiong Y N, Zhang Y F, Zhang Z, et al. The effects and contributions of ecological factors on soil carbon, water and nutrient storages under long-term vegetation restoration on the eastern Loess Plateau[J]. Forests, 2024, 15(11):1898.
- [29] Qiu D X, Xu R R, Gao P, et al. Effect of vegetation restoration type and topography on soil water storage and infiltration capacity in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2024, 241:108079.
- [30] Liu X R, Feng T J, Zhang Y F, et al. Vegetation restoration affects soil hydrological processes in typical natural and planted forests on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2025, 650:132465.