

黄选胜, 董子炜, 高坤, 杨永亮, 孙玉博, 董宇韬, 洪文彤, 楚哈加那提, 迪丽拜尔阿不都热西提, 王卫霞. 天山云杉林土壤有机碳小尺度空间分布格局及其影响因素[J]. 土壤学报, 2026,

HUANG Xuansheng, DONG Ziwei, GAO Kun, YANG Yongliang, SUN Yubo, DONG Yutao, HONG Wentong, CHUHA Jianati, DILIBAIER Abudurexiti, WANG Weixia. Small-Scale Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon and Density in *Picea schrenkiana* Forests in the Central Tianshan Mountains and Their Influencing Factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

天山云杉林土壤有机碳小尺度空间分布格局及其影响因素*

黄选胜¹, 董子炜, 高坤, 杨永亮, 孙玉博, 董宇韬, 洪文彤, 楚哈·加那提, 迪丽拜尔·阿不都热西提, 王卫霞[†]

(新疆农业大学林学与风景园林学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 为揭示天山中部天山云杉林土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 及其密度 (Soil organic carbon density, SOCD) 的空间分异规律与驱动机制, 本研究基于 267 个样地的 801 个土壤剖面采样点, 结合地统计学分析与结构方程模型 (Structural Equation Modeling, SEM), 系统探讨了 0~20 cm 和 20~60 cm SOC 与 SOCD 的空间分布格局及其主导因素。结果表明: (1) 研究区域 0~20 cm 土层 SOC 与 SOCD 空间分布一致, 西部及北部为相对高值区, 东南部为相对低值区; 而 20~60 cm 土层 SOCD 的相对高值区转移至东南部, 而西部与北部相对较低, 较 SOC 分布发生空间重心偏移。(2) 不同土层间 SOC 与 SOCD 空间分布的主控因素差异显著, 0~20 cm SOC 主要受碱解氮和速效钾驱动, SOCD 受 SOC 与土壤容重协同控制; 20~60 cm SOC 则更依赖氮库规模与水分条件, 受土壤容重强主导。(3) 方差分解分析显示, 土壤因子对 SOC 与 SOCD 空间变异的解释率在 45%~87%之间, 显著高于地形与植被因子, 且随土层加深而增强。(4) SEM 分析证实了分层驱动机制的转变, 表层 SOCD 遵循“速效养分驱动—SOC 积累—SOCD 提升”的驱动机制; 深层 SOCD 对土壤容重高度敏感, 水分通过诱导土壤容重下降产生“物理结构权衡”效应, 向“氮库规模+物理保护驱动”的模式转变。本研究明确了天山中部天山云杉林土壤碳库的微尺度垂直分异规律, 可为区域碳循环模型构建与土壤碳汇精确管理提供科学依据。

关键词: 天山云杉; 土壤有机碳; 结构方程模型; 垂直分异; 土壤容重

中图分类号: S757.1

文献标志码: A

Small-Scale Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon and Density in *Picea schrenkiana* Forests in the Central Tianshan Mountains and Their Influencing Factors

HUANG Xuansheng, DONG Ziwei, GAO Kun, YANG Yongliang, SUN Yubo, DONG Yutao, HONG Wentong, CHUHA Jianati, DILIBAIER Abudurexiti, WANG Weixia[†],

(College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

*新疆维吾尔自治区财政林业科技项目(新林规字〔2022〕9号)和 2025 年国家级大学生创新训练计划项目 (202510758009) 资助
Supported by the Xinjiang Uygur Autonomous Region Financial Forestry Science and Technology Project (No.Xinlin Guizi [2022] No. 9), and the 2025 National Undergraduate Innovation Training Program Project (No. 202510758009)

[†] 通讯作者: 王卫霞, E-mail:wangweixia0993@163.com

作者简介: 黄选胜(1999-), 男, 云南富源人, 硕士研究生, 研究方向为林业生态工程。E-mail:15188050971@163.com

收稿日期: 2025-11-14; 收到修改稿日期: 2026-08-04; 网络首发日期 (www.cnki.net):

Abstract: 【Objective】 Soil organic carbon (SOC) and soil organic carbon density (SOCD) are critical indicators of forest soil carbon sequestration capacity and play an essential role in regional and global carbon cycling. Mountain forest ecosystems are characterized by strong environmental heterogeneity and pronounced vertical differentiation of soil properties, this leads to complex spatial patterns and depth-dependent driving mechanisms of soil carbon pools. However, the spatial differentiation and underlying controls of SOC and SOCD in *Picea schrenkiana* forests of the central Tianshan Mountains remain poorly quantified. Therefore, the objective of this study was to reveal the spatial distribution patterns of SOC and SOCD across different soil layers and to clarify their dominant driving mechanisms along the soil profile. 【Method】 This study was conducted in *Picea schrenkiana* forests of the central Tianshan Mountains based on 267 sampling plots and 801 soil profile sampling points. Soil samples were collected from two depth intervals (0–20 cm and 20–60 cm) to determine SOC content, SOCD, soil bulk density (BD), soil nutrients, nitrogen pool characteristics, and soil moisture. Geostatistical analysis was applied to characterize the spatial distribution patterns and spatial autocorrelation of SOC and SOCD across the study area. Variance partitioning analysis (VPA) was used to quantify the relative contributions of soil properties, topographic factors, and vegetation attributes to the spatial variability of SOC and SOCD in different soil layers. Furthermore, structural equation modeling (SEM) was employed to disentangle the direct and indirect effects of key environmental variables and to explore depth-dependent changes in the driving mechanisms of SOC and SOCD. 【Result】 For all sampled points, SOC and SOCD showed a significant decreasing trend with increasing soil depth. In the surface soil layer (0–20 cm), SOC and SOCD exhibited similar spatial distribution patterns, with relatively high values in the western and northern regions and relatively low values in the southeastern region. In contrast, in the deeper soil layer (20–60 cm), the relatively high-value areas of SOCD shifted toward the southeastern region, while the western and northern regions became relatively lower, indicating a clear spatial centroid shift compared with SOC distribution. The dominant factors controlling SOC and SOCD differed markedly between soil layers. In the surface layer, SOC was primarily driven by labile nutrients, especially alkali-hydrolyzable nitrogen and available potassium, reflecting the strong influence of biological and biochemical processes. SOCD in the surface layer was jointly controlled by SOC content and soil BD. In the deeper layer, SOC depended more strongly on nitrogen pool size and soil moisture conditions and was strongly dominated by soil BD. VPA results showed that soil factors explained 45%–87% of the spatial variation in SOC and SOCD, which was significantly higher than the explanatory power of topographic and vegetation factors, and the contribution of soil factors increased with soil depth. SEM analysis further confirmed a pronounced shift in driving mechanisms along the soil profile. Surface SOC and SOCD followed a “labile nutrient-driven SOC accumulation–SOCD enhancement” biochemical pathway, whereas deep soil carbon storage transitioned toward a mechanism driven by “nitrogen pool size plus physical protection (BD).” Deep-layer SOCD was highly sensitive to soil BD, and soil moisture indirectly reduced BD, resulting in a “physical structure trade-off” effect. 【Conclusion】 This study demonstrates clear vertical differentiation and spatial heterogeneity of SOC and SOCD in *Picea schrenkiana* forest soils of the central Tianshan Mountains. The results highlight a depth-dependent transition from nutrient-driven biochemical controls in surface soils to physically dominated mechanisms in deeper layers. These findings enhance the understanding of micro-scale vertical regulation of forest soil carbon pools in arid mountain ecosystems and provide a solid scientific basis for improving regional carbon cycle models and implementing targeted soil carbon sequestration and management strategies.

Key words: *Picea schrenkiana* var. *tianshanica*; SOC; Structural equation model; Vertical differentiation; Soil bulk density

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,其中土壤有机碳在全球碳循环中发挥着至关重要的作用。SOC 储量的微小波动即可对全球碳平衡和气候变化产生深远影响^[1]。森林土壤作为陆地碳库的重要组成部分,不仅在维持陆地生态系统碳平衡与缓解全球气候变化中发挥着关键

作用,同时也是维持土壤肥力和植被生产力的重要基础^[2-3]。然而,SOC的分布受气候、地形、植被及土地利用等多种因素的综合影响,在山地森林生态系统中表现出强烈的空间异质性,这为区域尺度上碳库的精确评估带来了显著挑战。

近年来,关于森林生态系统SOC储量及其空间格局的研究在区域尺度上取得了诸多进展^[3-7]。地统计学方法作为揭示空间自相关与结构性特征的核心手段,已广泛应用于各类型森林生态系统的土壤分析中^[8-11]。已有研究证实,SOC在不同尺度下普遍存在显著的空间相关性,其变程范围可从不足10 m延伸至200 m以上^[12-13]。这种极大的变程意味着,仅依赖大尺度、低密度的采样往往会掩盖由微地形和群落结构引起的细尺度变异。事实上,地统计研究的意义不仅在于方法论的突破,更在于其能否解决特定区域的实际生态问题。然而,在地形高度复杂的山地针叶林中,由于过去研究多受限于采样密度与成本,忽视了局地尺度的空间异质性,导致SOC储量估算存在较大的不确定性。因此,针对具有区域代表性的典型山地森林开展高密度、细尺度的空间格局研究,是提升区域碳库评估精度的关键。

天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianshanica*)林是我国西北干旱区重要的碳汇中心,其碳循环过程对全球变化的响应极具敏感性。新疆农业大学天格尔实习林场位于中天山北坡的核心地带,是天山云杉林分布的典型区域。从环境特征来看,该区域涵盖了中天山典型的海拔梯度、阴坡-半阴坡地形以及发育完整的灰褐色森林土,其林地密度与植被群落结构在整个中天山山地森林生态系统中具有极强的代表性,使其成为开展天山云杉林土壤碳循环研究的天然实验室。通过对该代表性区域进行高密度采样,不仅能填补细尺度下SOC空间结构研究的薄弱环节,其研究结果更能作为典型样本,为评估中天山相似生态条件下的森林碳汇潜力和环境调控机制提供科学参照。

因此,本研究选取具有区域典型性的天山云杉林为研究对象,在深入剖析其代表性环境特征的基础上,利用高密度土壤采样和地统计学分析,旨在揭示中天山云杉林土壤SOC及土壤有机碳密度的空间异质性规律。本研究不仅旨在解决局地尺度的精确评估问题,还通过对典型环境特征的解析,构建可借鉴于中天山山地针叶林的碳汇评估模式。具体目标包括:(1)揭示中天山典型山地针叶林不同土层SOC和SOCD的空间分布格局及深度依赖特征;(2)定量解析地形、植被及土壤因子对SOC及SOCD变异的贡献及其交互作用,以期为区域尺度森林土壤碳库的精准管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于新疆农业大学天格尔实习林场(43°16'-43°26'N, 87°00'-87°16'E),地处北天山支脉喀拉乌成山北麓中部。该区域南北长约38 km,东西宽约17 km,整体地势南高北低,海拔介于1600~2800 m,地形起伏剧烈,坡度多分布在10°~40°。该区气候、地形及植被垂直带谱在中天山北麓具有高度的典型性与普适性,属典型的温带大陆性山地气候,夏季凉爽短促,冬季严寒漫长,降水时空分布不均,多集中于夏季(6—8月)。

受水分条件与微地形的制约,研究区内的森林分布表现出显著的坡向选择性,主要连片分布于阴坡、半阴坡(北坡、东北坡及西北坡)。植被群落以天山云杉纯林为主。林下灌草层优势物种包括高山羊角芹(*Aegopodium alpestre* Ledeb.)、森林野草莓(*Fragaria vesca* L.)、林地早熟禾(*Poa nemoralis* L.)及天山羽衣草(*Alchemilla tianschanica* Juz.)等。地带性土壤为灰褐色森林土,腐殖质层发育良好且质地均匀,完整地保留了山地森林土壤的自然发育序列。该研究区不仅是中天山云杉林生态系统的微缩景观,更凭借其典型的地形特征与稳定的林分结构,成为开展山地森林土壤碳循环研究及评估中天山森林碳汇潜力的理想代

表区域。

1.2 样地布设及数据采集

本研究于 2021 年 6 月至 2023 年 8 月进行野外调查与样品采集。为充分捕获天山云杉林在小尺度上的空间变异，研究结合森林资源二类调查数据与现场踏查，以天山云杉核心分布区(海拔 1600~2800 m)为研究区域，采用典型抽样与系统网格布设相结合的方法。在全面覆盖阴坡、半阴坡及不同海拔梯度的基础上，充分考虑微地形（坡度、坡位）的异质性。最终共布设 267 块 30 m × 30 m 的研究样地（图 1），采样密度远超同区域常规土壤调查项目，旨在构建能精确反映微尺度空间结构的样点网络。

利用 RTK（Real-Time Kinematic）测量记录每个样地的地理坐标，同步记录海拔、坡度、坡向及坡位等地形因子。通过调查获取各样地的林分参数，包括林分郁闭度、林分年龄及平均胸径等，样地调查基本信息统计如表 1 所示。

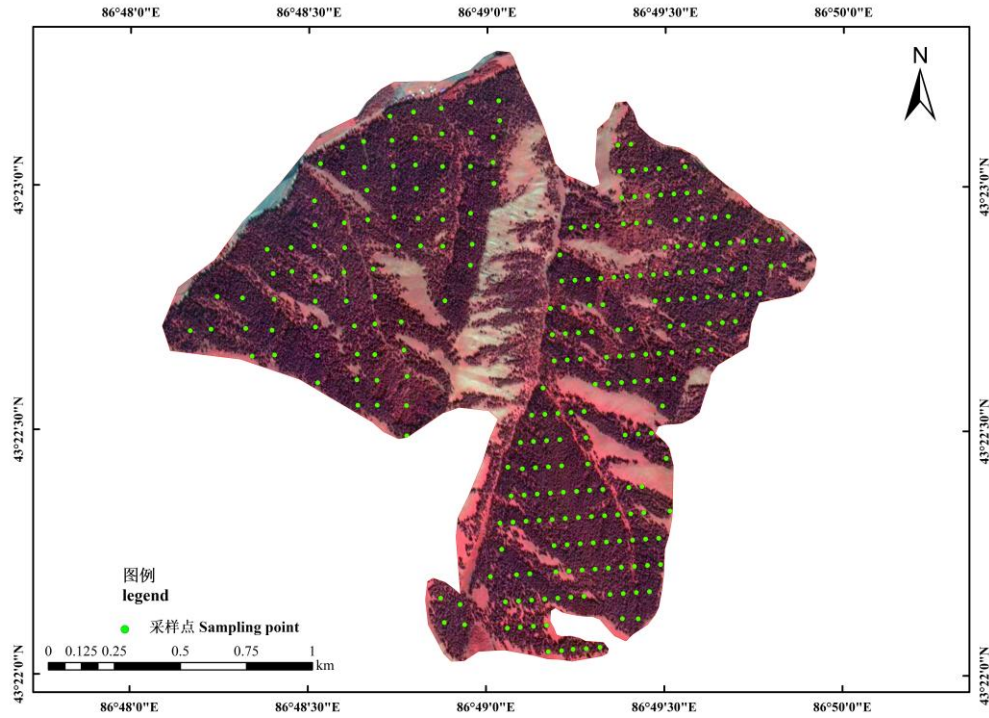


图 1 研究区采样点位置示意图

Fig.1 Schematic map of sampling points in the study area

表 1 研究区样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots in the study area

影响因子			影响因子			影响因子		
Impact Factor		Number	Impact Factor		Number	Impact Factor		Number
坡向 ^[14] Slope aspect	阳坡	12	坡位 ^[15] Slope position	上坡	97	坡度 ^[15] Slope gradient	<15°	31
	半阳坡	42		山谷	22		15~25°	93
	半阴坡	67		中坡	91		25~35°	119
	阴坡	146		下坡	57		>35°	24
龄组 ^[16] Age class	幼龄林	30	郁闭度 Canopy closure	<0.2	9	海拔/m Altitude	<1800	3
	中龄林	133		0.2~0.4	114		1800~2000	85
	近熟林	85		0.4~0.6	127		2000~2200	142
	成熟林	19		>0.6	17		>2200	37

1.3 土壤样品采集

本研究在各样地内沿坡面梯度（上坡、中坡、下坡）均匀设置 3 个采样点。鉴于中天山普通灰褐色森林土的发生层特性，地表 20 cm 内腐殖质高度富集，且向下延伸至 60 cm 左右普遍发育有明显的钙积层^[6]，本研究划分 0~20 cm 和 20~60 cm 两个土层进行采样。

土壤样品的采集严格遵循等量取样、多点混合的原则。在每一土层将 3 个采样点的等量土样进行充分混合，混合后的样品采用四分法留取约 500 g，装入塑封袋带回实验室。样品经室内自然风干后，先过 2.0 mm 筛，以剔除砾石及较粗的动植物残体等杂质，获得细土样；随后取细土样进一步研磨并过 0.15 mm 筛制备分析子样，以提高样品的均一性并保证化学反应充分。SOC 采用重铬酸钾容量法测定；全氮（Soil total nitrogen, TN）采用凯氏定氮法测定；碱解氮（Alkali-hydrolyzable nitrogen, AN）采用碱解扩散法测定；有效磷（Available phosphorus, AP）采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗分光光度法测定；速效钾（Available potassium, AK）采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定；土壤 pH 采用酸度计测定法测定^[6]。同时，在各采样点利用环刀法采集原状土样，用于测定土壤容重（Soil bulk density, BD）及土壤含水量（Soil water content, SWC）等理化性质。

1.4 土壤有机碳密度计算方法

SOCD 是指单位面积一定深度的土层中 SOC 的储量，计算公式如下^[17]：

$$SOCD = \sum_{i=1}^K C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100$$

式中，SOCD 为土壤有机碳密度（ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ）； C_i 为第 i 层土壤有机碳含量（ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）； D_i 为第 i 层土壤容重（ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）， E_i 为第 i 层土壤厚度（cm）； G_i 为第 i 层土壤中直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比（%）。

针对研究区内普通灰褐色森林土剖面结构明显的特征，本研究在每个样地的 0~20 cm 与 20~60 cm 土层分别独立获取计算参数。特别是针对空间变异较大的土壤容重，在各样地对应的土层深度内分别采集 3 个环刀原状土样，经实验室烘干法测定后取平均值。这种基于高密度实测土壤容重而非经验值的计算方式，最大限度地降低了因山地土壤非均质性带来的碳库估算误差，为揭示中天山云杉林碳汇的微尺度差异提供了可靠的数据支撑。

1.5 数据处理

（1）空间结构建模与地统计分析。利用 GS+ version 9.0 (Gamma Design Software, Plainwell, MI, USA) 软件对 267 个样地的分层 SOC 及 SOCD 进行半变异函数 (Semivariogram) 分析。通过对比指数模型、球状模型、线性模型及高斯模型的拟合效果，以决定系数 (R^2) 最大化及残差平方和 (RSS) 最小化为准筛选最优理论模型。

采用块金系数 ($C_0/(C_0+C)$) 定量评估 SOC 及 SOCD 的空间依赖性，比值 <25%、25%~75% 及 >75% 分别表示强、中等、弱空间自相关性。为确保空间预测的可靠性，采用留一法交叉验证 (Leave-One-Out Cross-Validation, LOOCV) 进行精度检验，以均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 评价实测值与插值结果的偏离程度。基于最优半变异函数参数，在 ArcGIS 10.7 (Esri, Redlands, CA, USA) 平台下利用普通克里金法 (Ordinary Kriging) 绘制空间分布图。

（2）环境因子解析。为解析 SOC 与 SOCD 空间异质性的主导因素，构建由地形（海拔、坡度、坡向、坡位）、植被（郁闭度、龄组、平均胸径）及土壤因子（全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、pH、土壤含水量、土壤容重）构成的环境解释变量集。在 Origin 2024 (OriginLab, Northampton, MA, USA) 中通过 Pearson 相关分析识别核心驱动因子，随后利用方差分解 (Variance Partitioning Analysis, VPA) 定量分析地形、植被与土壤三类因子及其交互作用对 SOC 空间异质性的独立贡献率。在此基础上，引入结构方程模型 (Structural Equation Model, SEM) 进一步识别环境因子对 SOC 与 SOCD 空间变异的直接与间接效应。选用以下

4 个拟合指标来综合评价模型拟合效果^[18], 包括: 3 个绝对拟合指标, 即卡方自由度比 (χ^2 / df)、近似均方根误差 (Root mean square error of approximation, RMSEA) 和标准化残差均方根 (Standardized root mean square residual, SRMR); 1 个增值拟合指标, 即比较适配指数 (Comparative fit index, CFI); 模型的拟合效果被认为良好且可接受时, 需满足以下经验判据: $P>0.05$, $1<\chi^2 / df<3$, $RMSEA<0.06$, $SRMR<0.08$, $CFI>0.90$ 。

2 结 果

2.1 土壤有机碳描述性统计特征

由图 2 知, 表层(0~20 cm)SOC 均值为 $107.80 \pm 4.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 深层(20~60 cm)均值为 $42.91 \pm 1.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表层 SOC 显著高于深层。随土层深度增加, SOC 含量下降约 60.2%, 减少 $64.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相应的土壤 SOCD 在表层与深层分别为 $1.39 \pm 0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.16 \pm 0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 深层较表层降低约 16.5%(减少 $0.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。

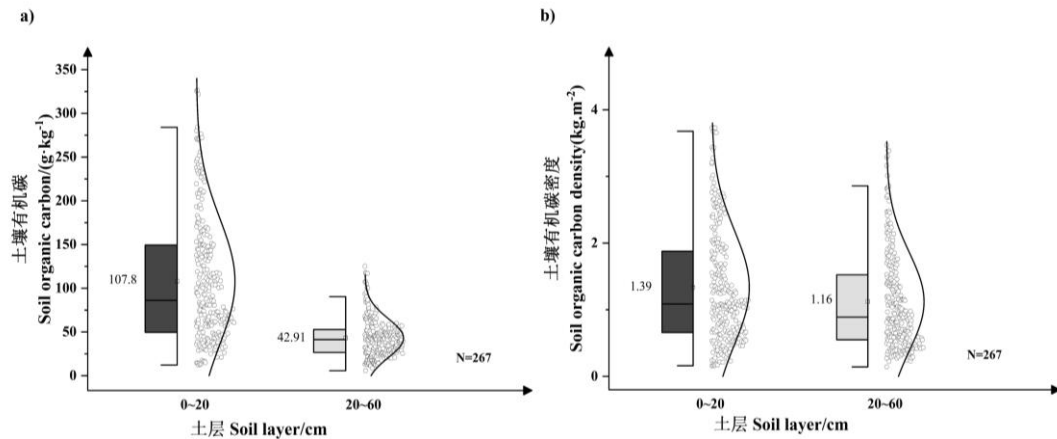


图 2 不同土层土壤 SOC (a) 和土壤 SOCD (b) 的箱线图

Fig. 2 Boxplots of SOC (a) and SOCD (b) in different soil layers

2.2 土壤有机碳的空间分布特征

半变异函数拟合结果显示(表 2), 不同土层 SOC 与 SOCD 的空间结构参数存在显著差异。表层(0~20 cm)SOC 与 SOCD 的最优拟合模型均为球状模型, R^2 均为 0.89, RMSE 分别为 0.068 和 0.091。该层 SOC 与 SOCD 的块金系数分别为 3.4%和 21.21%, 均小于 25%, 表明该层 SOC 和 SOCD 具有强空间自相关性, 其分布主要受成土母质、地形、气候及土壤类型等结构性因素控制。

深层(20~60 cm)SOC 与 SOCD 则更符合指数模型, R^2 分别为 0.425 和 0.82。其中, 深层 SOC 的块金系数为 50.00%, 表现为中等强度的空间自相关, 说明该层 SOC 受结构性与随机性因素共同影响; 而深层 SOCD 的块金系数仅为 6.11%, 显示出极强的空间依赖性, 空间格局较为稳定。说明深层 SOCD 以结构性因素为主导。交叉验证结果显示, 各指标 RMSE 均处于较低水平(0.068~0.154), 表明所选模型对研究区 SOC 和 SOCD 空间变异的捕捉精度较高。

表 2 不同土层 SOC 和 SOCD 的半方差函数模型及参数

Table 2 Semivariogram models and parameters of SOC and SOCD in different soil layers

指标	土层	理论模型	块金值	基台值	块金系数	决定系数	残差	均方根误差
Index	Soil layer/cm	Theoretical model	C_0	$C+C_0$	$C_0 / (C+C_0)$	R^2	RSS	RMSE

有机碳	0~20	球状模型	120.00	3521.00	3.4%	0.89	2.99×10^{-4}	0.068
SOC	20~60	指数模型	443.00	886.10	50.00%	0.425	5.73×10^{-4}	0.154
有机碳密	0~20	球状模型	748.00	3525.00	21.21%	0.89	2.91×10^{-5}	0.091
度 SOCD	20~60	指数模型	0.23	3.76	6.11%	0.82	2.01	0.124

通过克里金插值得到的研究区 SOC 与 SOCD 空间分布如图 3 所示。在 0~20 cm 土层，SOC 分布呈现明显的西高东低、北高南低的特征，高值区主要集中在研究区西部与北部，分布在 12.09~508.96 g·kg⁻¹ 之间；在 20~60 cm 土层，SOC 空间格局与表层基本一致，高值区仍位于北部与西部，但整体含量显著下降，分布在 5.64~228.72 g·kg⁻¹ 之间。在 0~20 cm 土层，SOCD 空间分布特征与 SOC 高度相似，表现为北部与西部含量较高，中部及东南部相对较低，分布在 0.16~6.52 kg·m⁻² 之间；而在 20~60 cm 土层，SOCD 空间分布出现明显错位，整体呈现西低东高格局，西部及北部区域碳密度多处于较低水平，而高值区则显著向中部及东南部偏移，分布在 0.14~10.70 kg·m⁻² 之间。

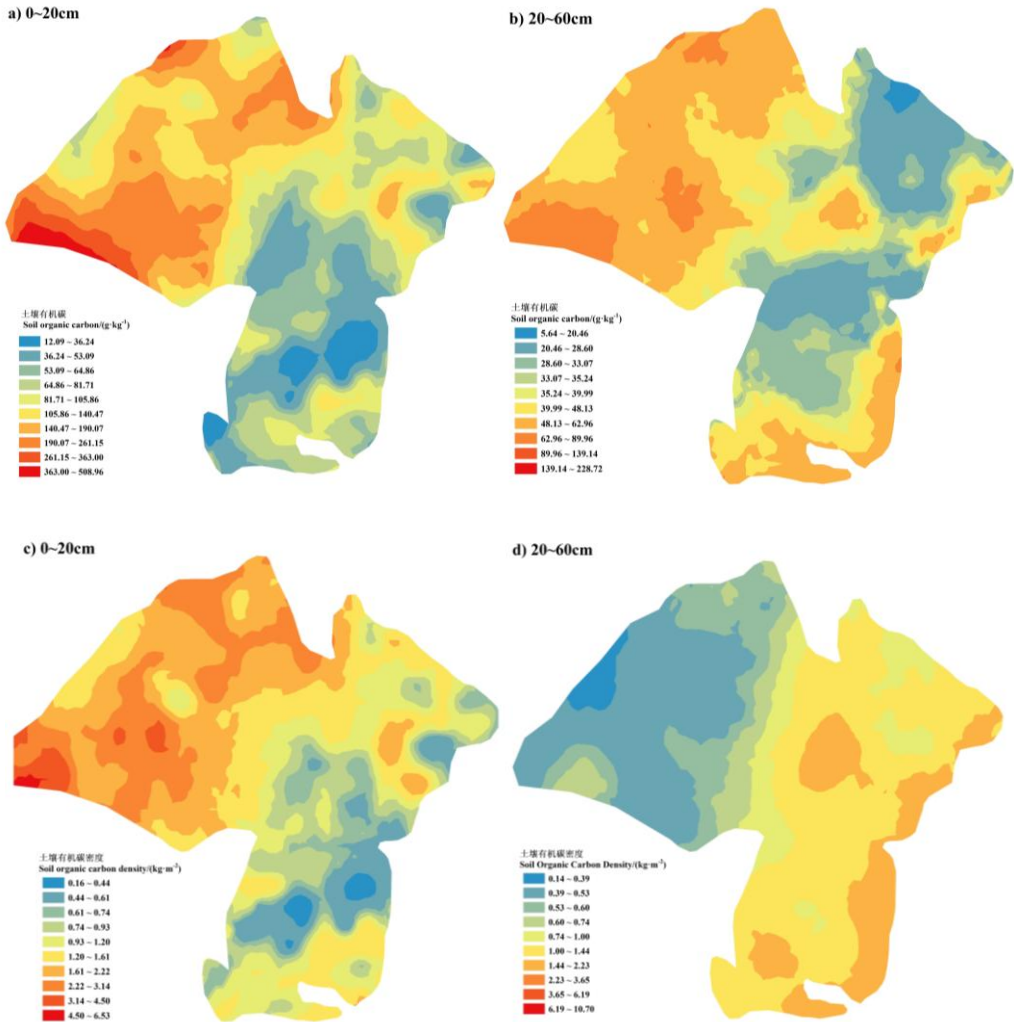


图 3 不同土层 SOC 与 SOCD 的空间分布（以彩图发表）

Fig.3 Spatial distribution patterns of SOC and SOCD in different soil layers

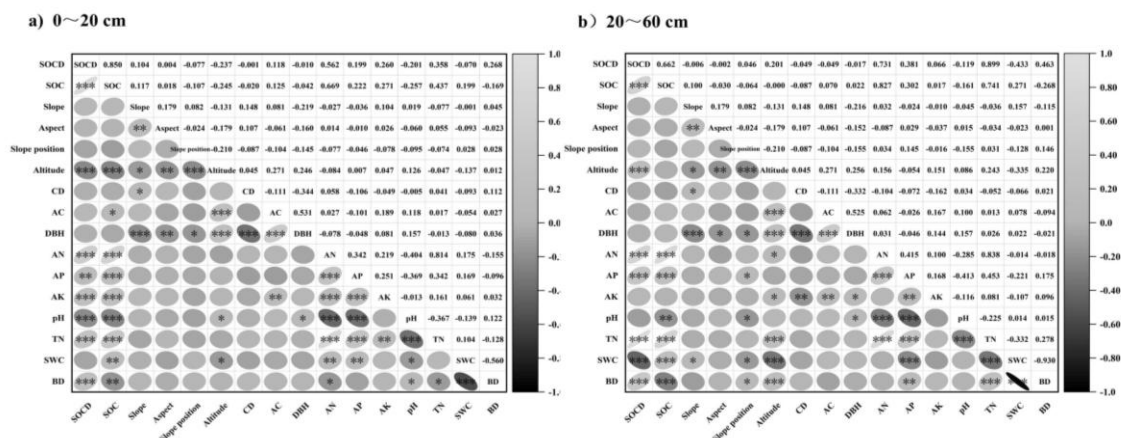
2.3 土壤有机碳与各因素的相关性

不同土层土壤 SOC 和 SOCD 与各环境因子的相关性分析结果如图 4 所示。整体上，SOC 和 SOCD 均与多种环境变量呈显著相关，不同土层间的相关性存在明显差异。

在表层(0~20 cm)，SOC 与碱解氮、有效磷、速效钾及全氮均呈极显著正相关($P<0.001$)，与含水量呈显著正相关($P<0.01$)，与龄组呈正相关($P<0.05$)。SOC 与海拔、pH 及土壤容重分别呈极显著负相关($P<0.001$)、极显著负相关($P<0.001$)和显著负相关($P<0.01$)。这表明，表层 SOC 主要受土壤养分供应和水分状况的正向促进作用，而随地形(海拔)升高和土壤容重增大而下降。在深层(20~60 cm)，SOC 与碱解氮、有效磷、全氮及含水量呈极显著正相关($P<0.001$)，与土壤容重呈极显著负相关($P<0.001$)，与 pH 呈显著负相关($P<0.01$)，而与海拔及龄组的相关性明显减弱，说明深层 SOC 的变化主要受土壤养分与理化性质控制，地形和植被结构的影响相对较小。

SOCD 的相关特征与 SOC 总体一致，但表现出更强的深度依赖性。在 0~20 cm 土层，SOCD 与 SOC、碱解氮、速效钾、全氮及容重呈极显著正相关($P<0.001$)，与有效磷呈显著正相关($P<0.01$)，而与海拔和 pH 均呈极显著负相关($P<0.001$)。在 20~60 cm 土层，SOCD 与 SOC、碱解氮、有效磷、全氮、容重及海拔呈极显著正相关($P<0.001$)，但与含水量呈极显著负相关($P<0.001$)。这表明，深层 SOCD 更受土壤理化性质(如土壤容重、氮素含量等)的制约，而表层 SOCD 则同时受到植被和地形条件的共同影响。

综上所述，SOC 和 SOCD 在表层主要受地形、土壤养分及林分结构等多因子耦合控制，而在深层则以土壤养分与理化特征为主导。总体趋势表明，氮素供应能力和土壤结构特征是天山中部天山云杉林碳积累与分布的关键影响因子。



注：

BD 为土壤容重、SOC 为土壤有机碳含量、SOCD 为土壤有机碳密度、Slope 为坡度、Aspect 为坡向、Slope position 为坡位、Altitude 为海拔、CD 为郁闭度、AC 为龄组、DBH 为胸径、AN 为碱解氮、AP 为有效磷、AK 为速效钾、TN 为全氮、SWC 为土壤含水量，下同。

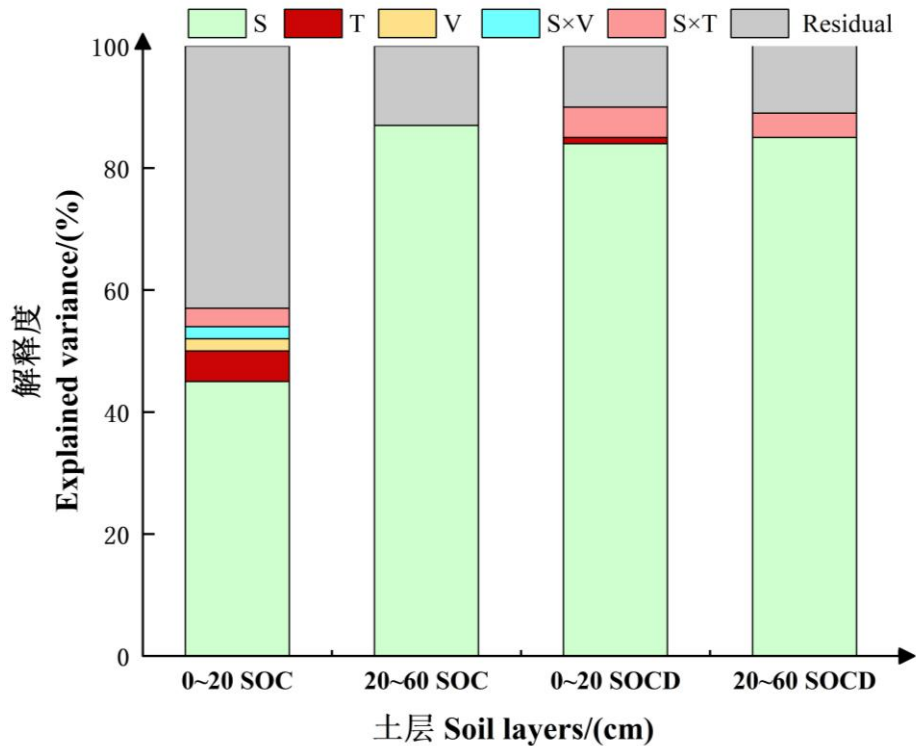
Note: a) Correlation between SOC, SOCD and environmental factors in the 0~20 cm layer. b) Correlation between SOC, SOCD and environmental factors in the 20~60 cm layer. BD stands for Bulk Density, SOC stands for Soil Organic Carbon, SOCD stands for Soil Organic Carbon Density, Slope stands for Slope Degree, Aspect stands for Slope Aspect, Slope position stands for Slope Position, Altitude stands for Altitude, CD stands for Canopy Density, AC stands for Age Class, DBH stands for Diameter at Breast Height, AN stands for Alkali-hydrolyzable Nitrogen, AP stands for Available Phosphorus, AK stands for Available Potassium, TN stands for Total Nitrogen, and SWC stands for Soil Water Content. The same applies hereafter.

图 4 不同土层 SOC、SOCD 与环境因子的 Pearson 相关性矩阵

Fig. 4 Pearson correlation matrix between SOC, SOCD and environmental variables in different soil layers

方差分解(VPA)分析结果(图 5)进一步揭示了不同类型因子对 SOC 和 SOCD 变异的解释能力及深度变化特征。结果显示，SOC 的解释率随土层深度增加而显著上升。在 0~20 cm 土层，地形、植被和土壤因子对 SOC 变异的总解释度为 54%，其中土壤因子贡献最大(45%)，

表明土壤理化性质对表层 SOC 积累起主导作用，地形与植被因子贡献分别为 5%和 2%，作用相对较弱。20~60 cm 层 SOC 的总解释度提高至 87%，主要由土壤因子控制。SOCD 的变化亦表现出类似规律。在 0~20 cm 土层中，地形与土壤因子对 SOCD 的总解释度达 90%，其中土壤因子贡献最大(84%)，地形因子仅通过与土壤因子的交互作用贡献约 5%。在 20~60 cm 土层，总解释度为 88%，土壤因子的独立贡献进一步上升至 85%，地形因子的直接影响趋于消失，仅以交互形式存在(4%)。综上，土壤因子对 SOC 和 SOCD 的解释度随深度增加而增强，而地形及植被因子的独立作用随深度递减。



注：S 为土壤因子，T 为地形因子，V 为植被因子。S×V 为土壤因素和植被因素交互应；S×T 为土壤因素和地形因素的交互效应，Residual 为残差。Note: S represents soil factors, T represents topographic factors, and V represents vegetation factors. S×V refers to the interaction between soil and vegetation factors; S×T refers to the interaction between soil and topographic factors, and Residual represents the residual.

图 5 地形、植被和土壤因子对不同深度土层 SOC 与 SOCD 变异的解释度

Fig.5 Explanatory power of topographic, vegetation and soil factors on SOC and SOCD variation across soil layers

2.4 土壤有机碳的结构方程模型

结构方程模型拟合结果(图 6)显示，表层(0~20 cm)与深层(20~60 cm)模型均具有较高的稳定性与可靠性。表层模型拟合指标为 $\chi^2/df=0.186$ ，CFI = 1.000，SRMR = 0.001，RMSEA = 0.000；深层模型为 $\chi^2/df=0.223$ ，CFI = 1.000，SRMR = 0.002，RMSEA = 0.000，各项指标均优于模型适配标准。

表层海拔、速效养分、pH、全氮与土壤容重共同解释了 SOC 变异的 53.9%。碱解氮对 SOC 表现出最强的直接正向效应(标准化路径系数 $\beta=0.86$)，其次为速效钾($\beta=0.14$)；全氮与海拔则呈现显著的负向直接效应($\beta=-0.30$ 、 -0.19)。pH 与有效磷的直接效应较小。结果表明，表层 SOC 主要受速效养分(尤其是氮)驱动，同时受地形与土壤酸碱度的抑制调控。在深层，模型对 SOC 变异的解释率上升至 86.4%。全氮成为首要正向驱动因子($\beta=0.71$)，含水量

次之($\beta=0.57$), 碱解氮与土壤容重亦表现为正向作用($\beta=0.24$ 、 0.08), 而海拔的影响显著减弱($\beta=-0.04$)。这表明深层 SOC 更依赖于氮库规模与水分条件等相对稳定的土壤属性。

在 0~20 cm 土层, 环境变量对 SOCD 变异的联合解释率为 89.6%。SOC 对 SOCD 的直接正向路径系数最高($\beta=0.90$), 土壤容重次之($\beta=0.43$); 海拔、pH 等环境因子主要通过 SOC 对 SOCD 产生间接效应。在 20~60 cm 土层解释率进一步提高至 91.4%, 土壤容重对 SOCD 的直接解释作用占据主导($\beta=0.60$), 全氮($\beta=0.48$)与 SOC($\beta=0.44$)的直接路径系数紧随其后。与表层相比, 深层 SOCD 的控制机制由“SOC 含量主导”转变为“土壤容重主导”, 强调了土体物理结构在深层碳储量固存中的关键作用。

SEM 结果显示, 随着土层加深, SOC 的主控因子由表层的速效养分(AN、AK)转变为深层的全氮与水分条件, 体现了从快速周转到缓慢周转组分的深度依赖性转变; SOCD 的控制机制表现出显著的位移特征, 表层以 SOC 主导($\beta=0.90$), 而深层转变为土壤容重主导($\beta=0.60$)。全氮在深层对 SOC 与 SOCD 均保持了显著且稳定的正向路径。表明表层碳库更受速效养分驱动与地形抑制的共同作用, 深层碳库则更依赖物理保护(土壤容重)与氮库规模(全氮)。

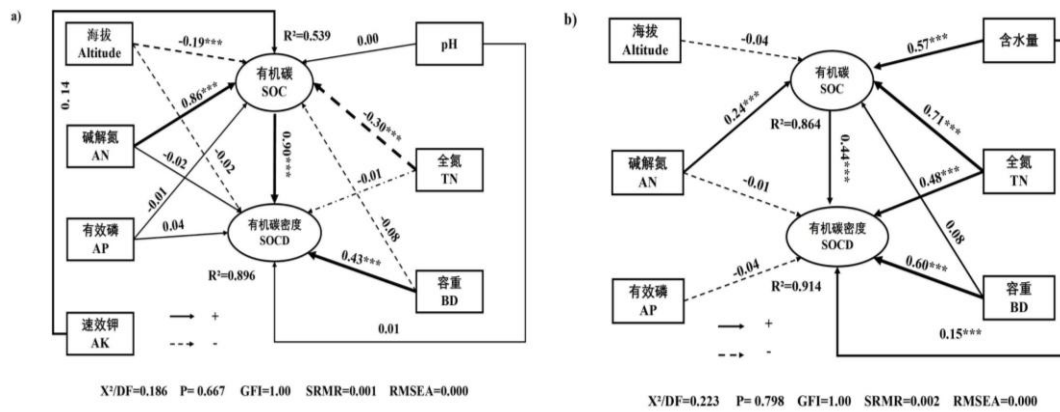


图 6 不同土层 (a. 0~20 cm, b. 20~60 cm) SOC 与 SOCD 影响因素的路径分析

Fig. 6 Path analysis of the influencing factors of SOC and SOCD in different soil layers (a. 0~20 cm, b. 20~60 cm)

3 讨论

3.1 不同土层 SOC、SOCD 的空间分布特征

本研究结果显示, 天山云杉林土壤 SOC 与 SOCD 随土层加深显著递减, 表现出明显的表聚性特征。在采样点尺度上, 这一格局主要受天山云杉林特殊的输入与转化模式驱动。表层 0~20 cm 密集的林下调落物与细根系通过活跃的微生物过程实现碳素富集^[18-19], 深层 20~60 cm 由于水分淋溶受限及有机质向下迁移的屏障导致碳输入量显著降低^[20-21]。这种垂直分布的差异性不仅反映了局地生物化学过程的梯度, 也呼应了全球尺度上亚表层土壤碳库具有更高不确定性及环境敏感性的共识^[22-23]。

土壤容重是解析该研究区域土壤 SOCD 空间异质性及其面状格局偏移的核心变量。虽然深层土壤 SOC 含量较低, 但由于土体物理压缩作用, 部分样地深层土壤 SOCD 仍维持在较高水平。地统计学结果显示, 深层土壤 SOCD 的块金效应(6.11%)远低于表层 SOCD(21.21%), 且显著低于深层 SOC(50.00%), 表明深层碳密度的分布并非随机波动, 而是受地形、压实度等强结构性因子主导的必然结果^[24-25]。这种强自相关性在克里金插值图中

表现为土壤 SOCD 空间重心由西北向东南的地理偏移(图 3)。这种空间错位本质上是微地形驱动下碳源供给与物理权重权衡的结果,说明在复杂山地地形中,微地形通过重塑土体物理结构(BD)而非单纯调节生物输入(SOC),主导了深层碳库的空间格局稳定性^[25-26]。这一发现也强调了在区域尺度碳汇估算时,获取高精度实测土壤 BD 数据对于降低空间外推误差至关重要^[22]。

3.2 不同土层 SOC 与 SOCD 的驱动机制及主控因子

本研究 Pearson 相关分析与方差分解(VPA)结果显示,土壤理化性质对 SOC 与 SOCD 空间变异的解释度随土层加深显著增强(54%升至 87%),而地形与植被因子的独立贡献率相对较小且趋于减弱。这一发现强调了在山地针叶林微尺度研究中,土壤因子在碳库容量中占绝对主导地位^[27]。

不同土层间的主控因子存在显著差异。在表层(0~20 cm),SOC 与碱解氮、有效磷、速效钾及全氮呈显著或极显著正相关,与 pH、海拔及 BD 呈负相关。这表明表层 SOC 积累主要受速效养分供给及活性有机质转化驱动。SOCD 受 SOC 与 BD 的协同影响。一方面养分有效性促进 SOC 积累从而使 SOCD 升高;另一方面, BD 作为计算乘数具有直接物理压缩效应。高 SOC 常伴随低土壤 BD(土壤疏松化),使得表层 SOCD 对 BD 的变化表现出极高的敏感性^[27]。在深层(20~60 cm),SOC 与全氮、碱解氮及含水量呈极显著正相关,显示深层碳库更依赖于氮库规模与水分条件的长期维持^[28-29]。水分过程通过调控碳输入路径,对深层 SOC 组分的稳定性与周转具有重要作用^[30]。值得注意的是深层土壤 SOCD 虽然与土壤 BD、全氮及 SOC 呈正相关,却与含水量呈显著负相关(图 5)。这反映出深层土壤存在物理结构权衡作用,含水量升高虽然有利于 SOC 形成,但往往伴随土壤 BD 下降;不同于表层以凋落物输入为主,深层 SOC 多以矿物结合态等稳定性较强的形式存在,且受深层钙积层及机械压实作用形成的物理屏障保护。当水分含量升高时,虽可能略微促进有机质下移,但更显著的作用在于改善土壤孔隙结构,导致 BD 下降。由于深层 SOC 基数较低,由水分诱导的容重下降效应在数值上盖过了 SOC 增加效应,因此,深层 SOCD 是碳输入(氮、水)与物理结构(BD)综合作用的结果,且土壤 BD 的贡献更为突出^[27]。

结构方程模型(SEM)结果进一步验证了上述分层机制,表层土壤以速效氮驱动—SOC 积累—SOCD 提升的生物化学路径为主,其中 SOC 的直接效应最为显著;深层土壤则表现为全氮与水分对 SOC 的正向作用增强,而 SOCD 的主导因子转变为 BD, TN 与 SOC 次之。整体上,土壤碳积累驱动机制由表层的速效养分驱动逐渐转变为深层的氮库+物理保护(BD)驱动。

基于以上发现,建议在今后的 SOCD 精确评估中坚持分层测定策略,尤其在深层土壤中应优先获取可靠的土壤容重数据。采样设计应覆盖典型微地形梯度以及水分和压实度差异显著的地段,以降低空间外推的不确定性^[31],同时加强深层样点的布设,以弥补全球亚表层 SOC 数据的不足^[30-31]。此外,针对本研究在固碳机制量化及时空尺度上的局限,未来可结合跨季节与年际监测,引入 SOC 组分分级、稳定同位素示踪以及土壤质地—矿物学指标,在更广泛的植被与气候梯度上验证深层碳库的稳定机制,从而提升模型的预测能力与结论的普适性。

4 结 论

本研究揭示了天山中部天山云杉林土壤 SOC 与 SOCD 的小尺度空间分异特征及其驱动机制。主要研究结论如下:(1)天山云杉林 SOC 与 SOCD 具有显著的表聚性,0~20 cm 层含量显著高于 20~60 cm 层;SOCD 的空间格局受 SOC 与土壤容重的共同调节,且在空间分

布上较 SOC 发生了受微地形驱动的地理偏移。(2) 区域 SOC 与 SOCD 的主控因子存在显著的垂直分异, 0~20 cm 主要由速效养分主导, 20~60 cm 则转向氮库规模与物理结构主导, 氮库与土壤容重成为决定深层 SOCD 空间分配的关键因子。(3) 深层 SOCD 对土壤容重表现出高度的依赖性与敏感性, 水分过程通过影响土壤容重对 SOCD 产生物理结构权衡效应。本研究结果明确了天山云杉林碳库在微尺度上的垂直分化路径, 强调了在区域碳循环模型构建与碳汇管理中, 获取高精度深层土壤容重及全氮数据对降低空间估算不确定性具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Wang S, Zhuang Q L, Jia S H, et al. Spatial variations of soil organic carbon stocks in a coastal hilly area of China[J]. *Geoderma*, 2018, 314: 8-19.
- [2] Liu B, Chen L, Pang D B, et al. Altitudinal distribution rule of *Larix principis-rupprechtii* forest's soil organic carbon and its influencing factors in Liupan Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17): 6773-6785. [刘波, 陈林, 庞丹波, 等. 六盘山华北落叶松土壤有机碳沿海拔梯度的分布规律及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6773-6785.]
- [3] Liu J F, Su S J, He Z S, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil organic carbon in mid-subtropical *Castanopsis kawakamii* natural forest[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(6): 641-648. [刘金福, 苏松锦, 何中声, 等. 格氏栲天然林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. *山地学报*, 2011, 29(6): 641-648.]
- [4] Xie W Y, Liu S, Guo Z C, et al. The impact of cover crop on organic carbon and microbial community in biopore sheaths of Shajiang Black Soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, 63(5): 1583-1595. [谢婉玉, 刘帅, 郭自春, 等. 覆盖作物对砂姜黑土生物孔隙鞘有机碳及微生物群落的影响[J]. *土壤学报*, 2026, 63(5): 1583-1595.]
- [5] Wang X F, Huang X F, Hu J W, et al. The spatial distribution characteristics of soil organic carbon and its effects on topsoil under different karst landforms[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(8): 2889.
- [6] Guo X W, Luo T S, Li Y D, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon density in a tropical mountain rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23): 7878-7886. [郭晓伟, 骆士寿, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7878-7886.]
- [7] Wei Y C, Ouyang Z Y, Miao H, et al. Spatial heterogeneity of soil properties in Jianfengling Nature Reserve[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2): 197-203. [魏彦昌, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 尖峰岭自然保护区土壤性质空间异质性[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(2): 197-203.]
- [8] Tsegaye T, Hill R L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements[J]. *Soil Science*, 1998, 163(2): 155-165.
- [9] Wang G Z, Shen J B, Zhang J L, et al. Plant-soil feedback driven mechanisms and regulation strategies for soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, 63(5): 1385-1397. [王光州, 申建波, 张俊伶, 等. 植物-土壤反馈驱动的土壤健康机制与调控策略[J]. *土壤学报*, 2026, 63(5): 1385-1397.]
- [10] Li J, Min Q W, Li W H, et al. Spatial variability analysis of soil nutrients based on GIS and geostatistics: A case study of Yisa township, Yunnan, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(4): 348-355.
- [11] Shi L L, Luo T S, Xu H, et al. The fine scale spatial heterogeneity of soil physical properties in a primary tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China[J]. *Forest Research*, 2012, 25(3): 285-293. [时雷雷, 骆士寿, 许涵, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(3): 285-293.]
- [12] Solie J B, Raun W R, Stone M L. Submeter spatial variability of selected soil and bermudagrass production variables[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(6): 1724-1733.

-
- [13] Stoyan H, De-Polli H, Böhm S, et al. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale[J]. *Plant and Soil*, 2000, 222(1): 203-214.
- [14] Xinjiang Soil Survey Office. Xinjiang Soil[M]. Beijing: Science Press, 2000.[新疆土壤普查办公室. 新疆土壤[M] 北京: 科学出版社, 2000.]
- [15] GB/T 26424-2010 Forest Resources Planning and Design Survey Technical Regulations [S]. [GB/T 26424-2010 森林资源规划设计调查技术规程 [S].]
- [16] Meng X Y. Dendrometry[M]. 3rd. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006. [孟宪宇. 测树学[M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006.]
- [17] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10-21.
- [18] He Y, Zhang Y, Lin S, et al. Spatial heterogeneity and key influencing factors of soil organic carbon, soil total nitrogen, and carbon to nitrogen ratio in main plantations of *Torreya grandis* cv. *Merrillii*[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(9): 5441-5450. [何影, 张勇, 林松, 等. 香榧主产区 SOC、STN 和 C : N 空间异质性及其关键影响因素[J]. *环境科学*, 2024, 45(9): 5441-5450.]
- [19] Li J M, Zhang Y T, Li X, et al. Impact of precipitation intensity on the decomposition of floor litter and the fine roots of *Picea schrenkiana*[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2017, 37(3): 360-369. [李吉玫, 张毓涛, 李翔, 等. 降水强度变化对天山云杉地表凋落物和细根分解的影响[J]. *植物研究*, 2017, 37(3): 360-369.]
- [20] Zhou X H, Zhou L Y, Nie Y Y, et al. Similar responses of soil carbon storage to drought and irrigation in terrestrial ecosystems but with contrasting mechanisms: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 228: 70-81.
- [21] Thaysen E M, Reinsch S, Larsen K S, et al. Decrease in heathland soil labile organic carbon under future atmospheric and climatic conditions[J]. *Biogeochemistry*, 2017, 133(1): 17-36.
- [22] Wang H Y, Cai T Y, Tian X S, et al. Global patterns of soil organic carbon distribution in the 20–100 cm soil profile for different ecosystems: A global meta-analysis[J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17(7): 3375-3390.
- [23] Schiedung M, Tregurtha C S, Beare M H, et al. Deep soil flipping increases carbon stocks of New Zealand grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(7): 2296-2309.
- [24] Sun G J, Li W H, Zhu C G, et al. Spatial variation analysis of topsoil bulk density in the Yili Valley, Xinjiang[J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1222-1228. [孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等. 新疆伊犁河谷表层土壤容重的空间变异性分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(7): 1222-1228.]
- [25] Wu X D, Fang H B, Zhao Y H, et al. A conceptual model of the controlling factors of soil organic carbon and nitrogen densities in a permafrost-affected region on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(7): 1705-1717.
- [26] Zhu M, Liu W, Qin Y Y, et al. Distribution of soil organic carbon at hillslope scale in forest-steppe zone of Qilian Mountains[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(3): 741-748. [朱猛, 刘蔚, 秦燕燕, 等. 祁连山森林草原带坡面尺度土壤有机碳分布[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 741-748.]
- [27] Gao L, Zhang D S, Long H Y, et al. Interaction mechanism of climate, vegetation and soil factors on soil organic carbon at different soil depths in Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10081-10091.[高琳, 张登山, 龙怀玉, 等. 气候、植被及土壤因素交互作用对宁夏土壤有机碳的影响机制[J]. *生态学报*, 2023, 43(24): 10081-10091.]
- [28] Ho V H, Morita H, Bachofer F, et al. Random forest regression Kriging modeling for soil organic carbon density estimation using multi-source environmental data in central Vietnamese forests[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2024, 10(6): 7137-7158.
- [29] Zhang Q Q, Zhang G L, Wu H B, et al. Soil organic carbon distribution and its relationship with soil physicochemical properties in different forest types of Shanghai City[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*,

2019, 36(6): 1087-1095.[张青青,张桂莲,伍海兵,等.上海市林地土壤有机碳分布特征及其与土壤理化性质的关系[J].浙江农林大学学报,2019,36(6):1087-1095.]

[30] Xu S, Wang J J, Sayer E J, et al. Precipitation change affects forest soil carbon inputs and pools: A global meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168171.

[31] Wang J Q, Li F D, Li J F, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in the Manas River Basin on the northern slope of Tianshan Mountain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(3): 449-461. [王健祺, 李发东, 李俊峰, 等. 天山北坡玛纳斯河流域土壤有机碳分布特征与影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2025, 33(3): 449-461.]

(责任编辑: 檀满枝)