

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.05.019 CSTR:32310.14.stbcb.2025.05.019

褚保森,张帅发,刘峰,等.藏东南干旱河谷土壤有机碳组分空间分布及稳定性特征[J].水土保持学报,2025,39(5):169-178.

CHU Baosen, ZHANG Shuaifa, LIU Feng, et al. Spatial distribution and stability characteristics of soil organic carbon fractions in arid valleys of southeastern Xizang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 169-178.

藏东南干旱河谷土壤有机碳组分空间分布及稳定性特征

褚保森^{1,2}, 张帅发^{1,2}, 刘峰^{1,2}, 张鹏程^{1,2}, 张智勇^{1,2}, 陆子淳^{1,2}, 周金星^{1,2,3}

(1.北京林业大学水土保持学院,云南建水生态站,北京100083; 2.北京林业大学教育部林业生态工程研究中心,北京100083; 3.北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室,北京100083)

摘要: [目的] 探究干旱河谷区土壤有机碳组分及其稳定性变化特征,明确环境因子与土壤有机碳组分及其稳定性之间的关系,为生态脆弱区固碳减排的系统管理提供依据。[方法] 选择西藏波密干旱河谷区不同坡向(阴坡、阳坡、半阴坡、半阳坡)、坡位(坡下、坡中、坡上) 0~30 cm 土壤为研究对象,测定土壤理化性质、土壤有机碳及其组分。[结果] 1) 阴坡土壤有机碳质量分数为 11.37~34.74 g/kg,相较于半阴坡、半阳坡、阳坡分别提高 55%、138%、292%。土壤颗粒有机碳、易氧化有机碳、矿质结合态有机碳、可溶性有机碳质量分数随坡向均表现出与有机碳变化一致的趋势。阴坡土壤有机碳稳定性显著高于其他坡向,为 54.3%~62.1%,相较于半阴坡、半阳坡和阳坡分别提高 6%、12% 和 30%。2) 土壤有机碳质量分数沿坡位分布为坡下(17.29 g/kg) > 坡中(13.42 g/kg) > 坡上(9.73 g/kg),土壤颗粒有机碳、易氧化有机碳、矿质结合态有机碳、可溶性有机碳质量分数在坡位梯度上随坡位升高而降低。各坡位土壤有机碳稳定性大小为坡下(38.1%~62.1%) > 坡中(36.9%~59.9%) > 坡上(37.6%~58.7%)。3) 影响藏东南干旱河谷区土壤有机碳组分及其稳定性的主要环境因子为坡向、植被盖度、土壤全氮、碱解氮、全磷及黏粒质量分数。[结论] 藏东南干旱河谷区土壤有机碳组分及其稳定性在不同坡向和坡位上存在显著差异,环境因子中起主要调控作用的为坡向、植被盖度、土壤全氮、碱解氮、全磷和黏粒质量分数,研究结果可为藏东南干旱河谷区 SOC 的精准评估和土壤碳库调控提供参考。

关键词: 坡向; 坡位; 土壤有机碳; 有机碳稳定性

中图分类号: S153.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)05-0169-10

Spatial Distribution and Stability Characteristics of Soil Organic Carbon Fractions in Arid Valleys of Southeastern Xizang

CHU Baosen^{1,2}, ZHANG Shuaifa^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, ZHANG Pengcheng^{1,2},
ZHANG Zhiyong^{1,2}, LU Zichun^{1,2}, ZHOU Jinxing^{1,2,3}

(1. Jianshui Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the variation characteristics of soil organic carbon (SOC) fractions and their stability in arid valleys, clarify the relationships between environmental factors and SOC fractions as well as stability, and provide a scientific basis for systematic carbon sequestration and emission reduction management in ecologically fragile areas. [Methods] Soil samples (0–30 cm depth) were collected from different slope aspects (shady, sunny, semi-shady, and semi-sunny slopes) and slope positions (lower, middle, and upper) in the arid valleys of Bomi, Xizang. Soil physicochemical properties, SOC contents, and its fractions were measured. [Results] 1) The SOC content on shady slopes ranged from 11.37 to 34.74 g/kg,

收稿日期: 2025-01-26 修回日期: 2025-03-06 录用日期: 2025-03-21 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-18

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302900); 北京林业大学“5·5工程”科研创新团队项目(BLRC2023B09)

第一作者: 褚保森(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: 18734709122@163.com

通信作者: 周金星(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: zjx9277@126.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

representing increases of 55%, 138%, and 292% compared with semi-shady, semi-sunny, and sunny slopes, respectively. The contents of particulate organic carbon (POC), easily oxidizable organic carbon (EOC), mineral-associated organic carbon (MAOC), and dissolved organic carbon (DOC) all exhibited consistent variation trends with SOC across different slope aspects. SOC stability was the highest on shady slopes (54.3%–62.1%), exceeding that of semi-shady, semi-sunny, and sunny slopes by 6%, 12%, and 30%, respectively. 2) Along slope positions, SOC content decreased in the order was lower slope (17.29 g/kg) > middle slope (13.42 g/kg) > upper slope (9.73 g/kg). Similarly, POC, EOC, MAOC, and DOC contents all decreased with increasing slope position. The stability of SOC across different slope positions followed the pattern was lower slope (38.1%–62.1%) > middle slope (36.9%–59.9%) > upper slope (37.6%–58.7%). 3) The main environmental factors influencing SOC fractions and their stability in the arid valleys of southeastern Xizang were slope aspect, vegetation coverage, soil total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), total phosphorus (TP), and clay content. [Conclusion] Significant differences exist in SOC fractions and their stability across different slope aspects and positions in the arid valleys of southeastern Xizang. The key regulatory factors include slope aspect, vegetation coverage, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, total phosphorus, and clay content. These findings provide valuable references for accurate SOC assessment and soil carbon pool management in arid valleys of southeastern Xizang.

Keywords: slope aspect; slope position; soil organic carbon; organic carbon stability

Received: 2025-01-26

Revised: 2025-03-06

Accepted: 2025-03-21

Online(www.cnki.net): 2025-06-18

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳储库,约 80% 的陆地碳储存在土壤中。即使碳储量发生微小变化,也会对全球气候和碳循环产生深远影响。其中,土壤有机碳(SOC)是动植物残体和腐殖质经微生物分解后形成的含碳有机物,是衡量土壤质量的重要指标,对全球碳循环的稳定和气候调节起着关键作用^[1]。土壤有机碳可分为活性有机碳(LOC)和惰性有机碳(ROC)。活性有机碳尽管质量分数较少,却是最活跃的成分,能准确反映土壤养分等变化^[2];而惰性有机碳的分解周期长,稳定性强,惰性有机碳质量分数的增加有助于增强土壤有机碳的积累,矿质结合有机碳(MAOC)作为惰性有机碳,对土壤有机碳的转化起到抑制作用,能直接影响土壤有机碳储量,对土壤有机碳的稳定性有着重要作用^[3]。

土壤 SOC 稳定性是指在一定条件下 SOC 抵抗外界因素干扰并保持自身性质的能力,是评估土壤碳库能否持久存在的关键指标。有研究^[4]表明,植被是土壤有机碳稳定性的主要驱动因素,其通过群落特征和凋落物输入量的改变,引起土壤理化性质发生变化,进而对土壤有机碳稳定性产生影响;王珍等^[5]研究发现,海拔对土壤有机碳稳定性有显著贡献,其通过影响水热条件的再分配,从而影响植被分布、土壤理化性质和微生物活性,进而影响土壤有机碳稳定性。但对坡面尺度下土壤有机碳稳定性研究缺乏系统性研究。

土壤有机碳质量分数及其分布受地形、土壤母质等多种环境因子的综合影响。其中,地形是影响土壤有机碳积累的主要因素。一方面地形通过水热条件再分配影响凋落物的产生与分解,进而影响有机碳质量分数;另一方面,地形通过影响土壤侵蚀和土壤养分等因素影响土壤有机碳质量分数。坡位和坡向作为关键地形因子,通过影响水热条件的重新分配形成不同的坡面小气候,改变土壤理化性质、微生物群落、植被类型及凋落物数量,导致不同坡向和坡位土壤有机碳质量分数分布存在显著差异^[6]。王艳丹等^[7]研究发现,坡位显著影响土壤有机碳及其组分的分布,呈坡上 > 坡下 > 坡中的趋势,有机碳的损失主要发生在坡中位置;卫玮等^[8]研究发现,土壤有机碳密度随坡位下降而增加,且不同坡位间差异显著;唐朋辉等^[9]在秦岭南坡的研究发现,阴坡土壤有机碳及其组分质量分数均大于阳坡。

藏东南干旱河谷区是典型的生态脆弱区,具有干旱少雨、土壤贫瘠和植被稀疏等特点^[10]。该地区独特的地理和气候条件造就其土壤有机碳汇有机质输入量低、强矿物保护作用和空间异质性高的特点^[11]。现有研究^[12]多集中于土壤有机碳对海拔、植被类型和土地利用方式的响应,鲜有对土壤有机碳组分及其稳定性在不同坡向和坡位下的空间分布规律及其影响因素的研究。为探究藏东南干旱河谷区土壤有机碳稳定性在坡面尺度下的变化特征,本研究选取干旱河谷区不同坡向(阴坡、阳坡、半阴坡、半

阳坡)和不同坡位(坡上、坡中、坡下)的不同深度土壤(0~10、10~20、20~30 cm)为研究对象,旨在探讨不同坡向和坡位对土壤有机碳组分及其稳定性的影响,为该区域土壤有机碳储量和土壤固碳潜力的精准评估提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于西藏林芝市波密县境玉普乡(29°21′~30°40′N,94°00′~96°30′E),地形为高山峡谷,年平均气温 8.5 °C,年平均日照时间 1 563 h,平均海拔 2 900 m,最低月平均气温 4 °C,最暖月平均气温 17 °C。年平均蒸发量 1 646 mm,年降雨量约 420 mm,降雨集中在 6—10 月,年无霜期 176 d。具有明显的季节性干旱和降水少、蒸散率高的干旱河谷气候特征。土壤类型多样,主要以棕壤、黑毡土和山地草甸土为主。土层浅薄,厚度为 0.4~1.0 m,砾石质量分数高。优势植物主要有高山栎(*Quercus semecarpifolia*)、高山松(*Pinus densata*)、山杨(*Populus davidiana*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、藏边栒子(*Cotoneaster affinis*)、波密小檗(*Berberis yalaica*)等。

1.2 样地设置与样品采集

土壤样品于 2023 年 9—10 月进行采集。研究选

取阴坡、阳坡、半阴坡、半阳坡 4 个坡向,各坡向坡长相近,约 800 m。根据实际地形和 BRUBAKER 等^[13]划分坡面的方法将研究的坡位分为 3 个部分(坡上、坡中、坡下),且各坡向的相同坡位处在同一等高线上(表 1)。不同坡位设置 3 个 10 m×10 m 样地,去除地表枯落物后,按五点取样法混合采集 0~10、10~20、20~30 cm 共 3 个土层,共计样品 108 份,剔除石块、根系和动植物残体等,过 2 mm 筛,用于测定土壤理化性质和碳组分。土壤基本理化性质见表 2 和表 3。

表 1 样地基本信息

坡向	坡位	坡度/(°)	坡面形态	植被覆盖度/%	植被类型
阴坡	坡下	13.26~14.37	凹坡	89.7~91.5	乔木
	坡中	23.47~24.50	凹坡	83.2~84.7	乔木
	坡上	26.73~27.52	凹坡	71.3~74.6	乔木
阳坡	坡下	16.46~19.39	凹坡	68.6~71.4	灌丛
	坡中	24.55~26.85	凹坡	61.4~62.5	灌丛
	坡上	27.41~29.64	凹坡	58.3~60.2	灌丛
半阴坡	坡下	11.31~12.17	凹坡	76.5~77.4	灌丛
	坡中	23.63~25.26	凹坡	68.1~69.3	乔木
	坡上	27.43~28.38	凹坡	61.2~63.7	乔木
半阳坡	坡下	22.25~23.19	凸坡	61.0~64.0	灌丛
	坡中	17.43~18.25	凸坡	66.3~68.9	乔木
	坡上	17.91~19.27	凸坡	70.5~74.3	乔木

表 2 阴坡、阳坡土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties in shady slopes and sunny slopes

坡向	坡位	土层深度/cm	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	pH	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
阴坡	坡下	0~10	2.15±0.01A	0.21±0.02Aa	6.12±0.30B	160.31A	7.36±0.02Bb	0B	25.39±0.51B	74.61±0.51A
		10~20	1.36±0.03A	0.17±0.01Aa	4.85±0.66B	95.18±2.36A	7.59±0.01Bb	0.88±0.02B	48.34±0.74B	44.91±0.87A
		20~30	1.14±0.02A	0.17Aa	6.79±0.64B	85.16±2.36A	7.78±0.04Bb	0.73±0.17B	57.19±0.59B	36.93±0.91A
	坡中	0~10	4.46±0.01A	0.29Ab	7.71±0.16B	308.92±30.70A	7.31±0.02Bab	0B	16.85±0.45B	83.15±0.45A
		10~20	4.40±0.06A	0.31Ab	7.81±0.04B	312.26±25.98A	7.27±0.03Bab	0B	61.25±1.00B	38.75±1.00A
		20~30	4.25±0.05A	0.28Ab	7.21±0.09B	294.15±23.96A	7.23±0.03Bab	1.86±0.06B	72.08±1.32B	26.06±1.38A
坡上	0~10	3.47±0.07A	0.49Ab	3.76±0.52B	255.49±11.81A	7.43±0.02Ba	0B	2.92±0.09B	97.08±0.09A	
	10~20	3.58±0.04A	0.3Ab	7.36±0.36B	252.15±21.25A	7.76±0.05Ba	0.02±0.019B	25.09±1.67B	74.89±1.69A	
	20~30	3.16±0.09A	0.24Ab	6.94±0.27B	245.47±2.36A	7.65±0.04Ba	2.870.082B	93.06±1.94B	4.07±2.03A	
阳坡	坡下	0~10	1.26±0.01C	0.38±0.01Aa	6.41±0.27A	83.49D	7.29±0.03Cb	2.24±0.10A	88.38±1.80A	9.38±1.86B
		10~20	1.21±0.04C	0.31±0.01Aa	11.67±0.74A	95.18±2.36D	7.17±0.03Cb	1.02±0.06A	45.37±1.65A	53.61±1.71B
		20~30	1.09C	0.45±0.12Aa	11.50±0.35A	80.15D	7.39±0.04Cb	2.2±0.18A	97.80±0.18A	0±0B
	坡中	0~10	0.73±0.01C	0.32±0.01Ab	9.36±0.06A	55.11±2.36D	7.49±0.02Cab	3.05±0.13A	91.65±2.06A	5.30±2.19B
		10~20	0.55±0.03C	0.27±0.01Ab	10.29±1.12A	38.41±2.36D	7.21±0.02Cab	0.59±0.02A	98.55±0.53A	0.86±0.55B
		20~30	0.52±0.01C	0.25±0.01Ab	8.11±0.33A	36.74D	7.59±0.03Cab	0A	5.18±0.18A	94.82±0.18B
坡上	0~10	0.96C	0.36Ab	10.88±0.74A	71.80±2.36D	7.17±0.04Ca	1.14±0.01A	94.28±0.83A	4.58±0.84B	
	10~20	0.77±0.01C	0.28±0.07Ab	14.55±0.06A	65.12±2.36D	7.21±0.04Ca	5.22±0.11A	75.25±1.31A	19.53±1.36B	
	20~30	0.63±0.03C	0.21±0.01Ab	10.52±0.06A	45.09±2.36D	7.42±0.03Ca	2.58±0.24A	82.38±0.63A	15.04±0.86B	

注:表中同列不同大写字母表示土壤理化性质指标在不同坡向间存在显著差异($p < 0.05$);不同小写字母表示土壤理化性质指标在不同坡位间存在显著差异($p < 0.05$)。下同。

表 3 半阴坡、半阳坡土壤理化性质
Table 3 Soil physicochemical properties in semi-shady slopes and semi-sunny slopes

坡向	坡位	土层深度/cm	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	pH	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	
半阴坡	坡下	0~10	2.70±0.05B	0.49Ba	8.24±0.39B	200.38±18.89B	7.68±0.01Bb	3.14±0.13AB	83.87±0.58AB	12.99±0.71AB	
		10~20	1.44±0.11B	0.32±0.01Ba	5.75±0.14B	125.24±16.53B	8.01±0.04Bb	1.82±0.06AB	75.63±0.73AB	22.55±0.78AB	
		20~30	1.66B	0.39±0.01Ba	5.70±1.06B	106.87±4.72B	7.59±0.02Bb	0.46±0.02AB	74.15±2.10AB	25.39±2.12AB	
	坡中	0~10	2.50B	0.22±0.01Bb	8.58±0.32B	183.68±4.72B	7.32±0.01Bab	0AB	18.57±0.36AB	81.43±0.36AB	
		10~20	2.61±0.01B	0.19Bb	7.65±2.26B	183.68±4.72B	7.40±0.02Bab	1.27±0.22AB	47.84±1.36AB	50.89±1.57AB	
		20~30	2.50±0.01B	0.2Bb	6.75±0.07B	173.66±4.72B	7.31±0.02Bab	0AB	2.49±0.31AB	97.51±0.31AB	
	坡上	0~10	2.09±0.02B	0.2Bb	6.53±0.88B	140.27±9.45B	7.33±0.02Ba	2.12±0.23AB	62.88±1.30AB	35.00±1.52AB	
		10~20	2.42±0.02B	0.23Bb	8.38±0.39B	161.98±2.36B	7.51±0.02Ba	3.38±0.20AB	86.48±1.05AB	10.14±1.19AB	
		20~30	2.97±0.02B	0.27Bb	7.78±0.39B	218.75±2.36B	7.49±0.01Ba	0.82±0.19AB	80.57±3.28AB	18.61±3.46AB	
	半阳坡	坡下	0~10	4.30±0.03B	0.24Aa	10.33±0.74B	268.85±16.53C	7.70±0.01Ab	3.24±0.10A	79.67±1.24AB	17.09±1.34AB
			10~20	2.57±0.03B	0.16Aa	6.25±0.35B	175.33±11.81C	7.69±0.02Ab	0.92±0.07A	38.08±0.57AB	61.00±0.56AB
			20~30	2.89±0.11B	0.14Aa	8.60±0.57B	205.39±2.36C	7.83±0.02Ab	0.94±0.142A	98.32±0.58AB	0.74±0.44AB
坡中		0~10	2.08±0.01B	0.21±0.01Ab	7.60±0.99B	150.29C	7.60±0.02Aab	0A	5.66±0.16AB	94.34±0.16AB	
		10~20	0.56±0.02B	0.08Ab	6.18±0.25B	45.09±2.36C	7.65±0.01Aab	2.89±0.23A	84.26±6.28AB	12.85±6.51AB	
		20~30	0.49±0.03B	0.1Ab	4.75±0.85B	36.74±4.72C	7.82±0.01Aab	0A	3.38±0.29AB	96.62±0.29AB	
坡上	0~10	0.98B	0.14Ab	5.65±0.64B	78.48±2.36C	7.52±0.02Aa	3.45±0.08A	95.93±0.45AB	0.62±0.53AB		
	10~20	0.96±0.01B	0.12Ab	5.00±0.07B	73.47±4.72C	7.56±0.02Aa	3.80±0.13A	91.38±1.23AB	4.82±1.35AB		
	20~30	0.96±0.06B	0.12Ab	5.58±0.04B	63.45±4.72C	7.53±0.02Aa	0.27±0.16A	72.95±1.36AB	26.78±1.48AB		

1.3 测定方法

试验于 2024 年 7—9 月在中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心开展,土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;土壤可溶性有机碳(DOC)采用去离子水浸提后利用总有机碳分析仪(TOC-VCPH, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定;易氧化有机碳(EOC)采用高锰酸钾氧化法测定;土壤颗粒有机碳(POC)采用六偏磷酸钠分散法测定,并过 53 μm 筛,筛上为颗粒有机碳,筛下为矿质结合有机碳(MAOC),并分析有机碳质量分数。

土壤粒径组成采用激光粒度仪(Microtrac S3500)测定,土壤质地划分参考美国制;土壤 pH 由 PHS-320 高精度智能酸度计测定(水土比为 2.5:1);土壤全氮(TN)采用凯氏法消煮—全自动定氮仪测定;全磷(TP)采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定;碱解氮(AN)采用碱解扩散吸收法测定;速效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提—钼蓝比色法测定。

1.4 数据分析

以矿质结合有机碳与有机碳的比值来表征土壤有机碳稳定性(CSI),计算公式^[14-15]为:

$$CSI = \frac{MAOC}{SOC} \times 100\% \quad (1)$$

式中:MAOC 为土壤矿质结合有机碳, g/kg; SOC 为土壤有机碳, g/kg。

本研究对所有数据选择单因素方差分析和最小差异性显著进行多重比较,采用 Excel 2019 软件对数据进行整理与前处理,SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析,Origin 2022 软件进行绘图,Canoca 5.0 软件进行冗余分析,R 4.4.2 软件进行 Mantel 分析。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳的分布特征

坡向、坡位、土层深度、坡向和坡位、坡向和土层深度、坡位和土层深度及三者间的交互作用对土壤有机碳有显著影响($p < 0.05$) (表 4)。土壤有机碳(SOC)随土层深度的增加逐渐降低。在不同坡向条件下,阴坡的土壤 SOC 最高,为 11.37~34.74 g/kg,显著高于其他坡向($p < 0.05$)。相较于半阴坡、半阳坡和阳坡,阴坡的 SOC 分别增加 55%、138% 和 292%。土壤 SOC 在不同坡位上的分布呈一定梯度变化,其中坡下区域的 SOC 最高,为(17.29±9.72) g/kg,其次为坡中,为(13.42±7.59) g/kg,坡上区域最低,为(9.73±5.66) g/kg (图 1)。

2.2 土壤有机碳组分的空间变化

坡向、坡位、土层深度及其两两交互作用和三者的交互作用均对土壤 EOC、POC 和 MAOC 质量分数产生显著影响($p < 0.05$),而对土壤 DOC 质量分数具有显著影响的是坡向、坡位、土层深度、坡向

和坡位及坡向和土层深度的交互作用($p < 0.05$) (图 2)。土壤中各组分有机碳(POC、EOC、MAOC、DOC)质量分数随坡向由阳坡向阴坡转变表现出逐渐增加的趋势。阴坡土壤颗粒有机碳(POC)质量分数为 4.57~14.21 g/kg,分别是半阴坡、半阳坡和阳坡的 1.43、2.10、3.00 倍;易氧化有机碳(EOC)质量分数

为 2.19~3.62 g/kg,分别是半阴坡、半阳坡和阳坡的 1.14、1.55、1.29 倍;矿物结合有机碳(MAOC)质量分数为 (13.54 ± 4.09) g/kg,是半阴坡的 1.65 倍、半阳坡的 2.66 倍和阳坡的 5.13 倍;可溶性有机碳(DOC)质量分数为 0.11~0.37 g/kg,相较于半阴坡、半阳坡和阳坡分别增加 118%、206% 和 311%。

表 4 坡向、坡位和土层深度对土壤有机碳组分及稳定性影响的三因素方差分析

Table 4 Three-way ANOVA of slope aspect, position, and soil layer effects on soil organic carbon (SOC) fractions and stability

因子	土壤有机碳	土壤有机碳组分				有机碳稳定性
		可溶性有机碳	易氧化有机碳	颗粒有机碳	矿物质结合有机碳	
坡向	4 497.872*	481.441*	468.018	4 848.885*	5 223.023*	75.309*
坡位	1 530.934*	106.069*	783.884	3 254.119*	1 032.886*	20.716*
土层深度	1 634.213*	13.928*	31.114	2 016.533*	1 780.529*	11.518*
坡向×坡位	47.032*	22.753*	45.008	65.629*	49.313*	0.388
坡向×土层深度	146.149*	12.473*	33.859	157.096*	180.431*	0.141
坡位×土层深度	22.159*	1.586	21.958	30.685*	20.143*	0.032
坡向×坡位×土层深度	25.274*	1.320	13.001	42.329*	21.460*	0.134

注:*表示 $p < 0.05$ 。

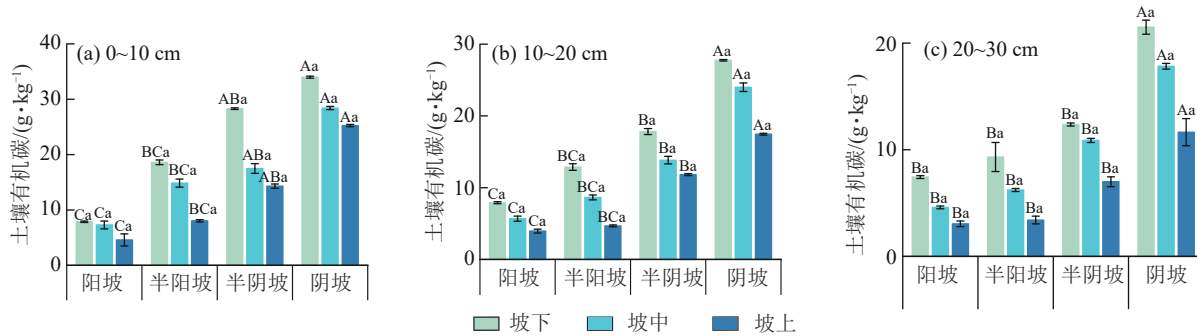


图 1 不同坡向和坡位对土壤有机碳的影响

Fig. 1 Effects of slope aspect and position on SOC content

在坡位梯度上,各组分有机碳随坡位升高而逐渐降低。坡下区域的 POC 质量分数为 (7.98 ± 3.84) g/kg,显著高于坡中和坡上($p < 0.05$),分别增加 34% 和 97%;坡下 EOC 质量分数为 (2.90 ± 0.53) g/kg,相较于坡中和坡上分别增加 21% 和 52%;坡下 MAOC 质量分数为 (9.15 ± 4.39) g/kg,分别高于坡中和坡上的 25% 和 65%;坡下 DOC 质量分数为 (0.15 ± 0.11) g/kg,较坡中和坡上分别增加 17% 和 76%。

2.3 土壤有机碳稳定性变化特征

坡向和坡位显著影响土壤有机碳稳定性指数(CSI)($p < 0.05$)(图 3)。在不同坡向条件下,阴坡土壤有机碳稳定性最高,为 54.3%~62.1%,相比于半阴坡、半阳坡和阳坡,分别增加 6%、11% 和 28%,且不同坡向间土壤有机碳稳定性差异显著($p < 0.05$)。不同坡位条件下,土壤 CSI 依次为坡下(38.1%~62.1%) > 坡中(36.9%~59.9%) > 坡上(37.6%~58.7%)。不同坡位的土壤有机碳稳定性未表现出显著差异($p > 0.05$)。

2.4 土壤有机碳组分及稳定性的影响因素

冗余分析结果(图 4)表明,RDA1 和 RDA2 轴分别能解释土壤有机碳组分的 67.49% 和 5.79%,总解释度为 73.28%。9 个环境因子中碱解氮、碳氮比和 pH 对土壤有机碳各组分及其稳定性贡献率高,其贡献率分别为 40.6%、42.7%、7.5%。其中土壤 TN、AN、C:N 和砂粒与土壤有机碳组分及稳定性存在显著正相关;土壤黏粒、AP 与土壤 SOC、POC、DOC、MAOC 及 CSI 存在显著负相关;土壤 TP 与 EOC 存在显著正相关,与 CSI 存在显著负相关;土壤 pH 与土壤 EOC 存在显著负相关,与 CSI 呈显著正相关。

Mantel 分析结果(图 5)表明,影响土壤 SOC、POC、DOC 和 MAOC 的主要环境因子为坡向、植被盖度、土壤全氮和碱解氮;而影响土壤 EOC 的主要环境因子为坡向、土壤全氮和全磷。相较于土壤 POC、DOC 与 EOC,土壤 SOC 和 MAOC 呈强正相关(r 值 0.5 以上),表明二者受到环境因子的影响较大。

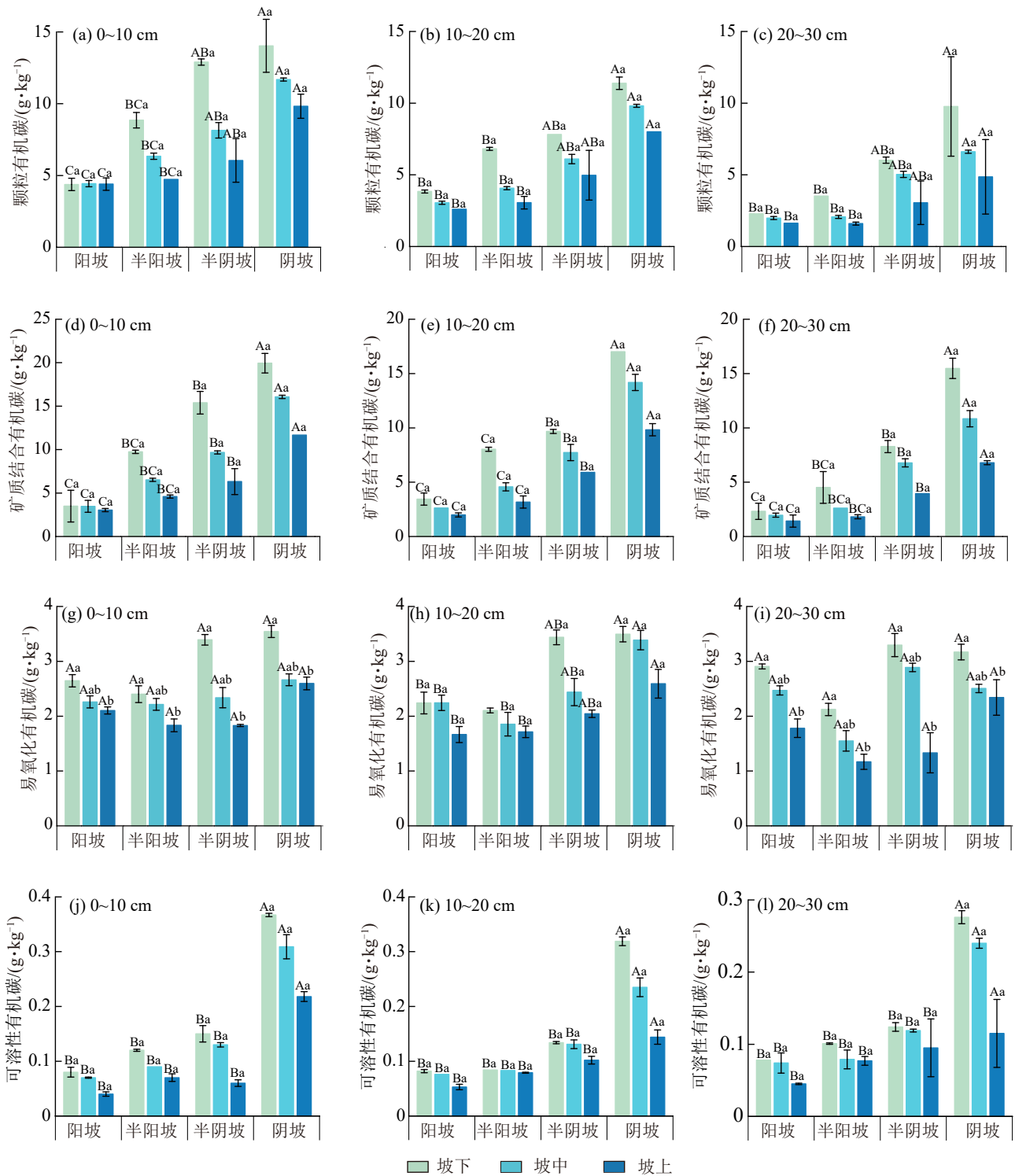


图 2 不同坡向和坡位对土壤有机碳组分的影响
Fig. 2 Effects of slope aspect and position on SOC fractions

3 讨论

3.1 不同坡向和坡位对土壤有机碳的影响

坡向作为重要的地形因子显著影响土壤有机质的空间分布及腐殖化和矿化过程。不同坡向因受太阳辐射强度和持续时间的差异,导致水热分配模式显著变化^[16],进而影响土壤SOC质量分数。

本研究发现,干旱河谷区土壤SOC呈阴坡>半

阴坡>半阳坡>阳坡的分布格局。表明阴坡的SOC积累速率高于其他坡向,且SOC质量分数显著高于阳坡、半阳坡和半阴坡。是由于阴坡土壤氮高于其他坡向,土壤氮素与土壤SOC呈显著正协同变化($p < 0.05$),与碳氮循环的耦合作用有关,较高的土壤氮促进微生物对有机质的分解,从而增加SOC质量分数^[17]。

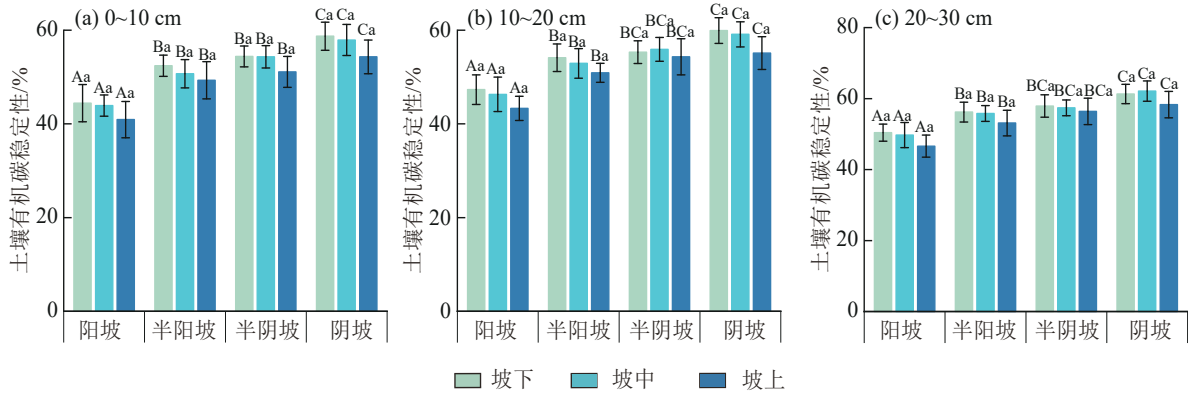


图 3 不同坡向和坡位对土壤有机碳稳定性的影响

Fig. 3 Effects of slope aspect and position on SOC stability

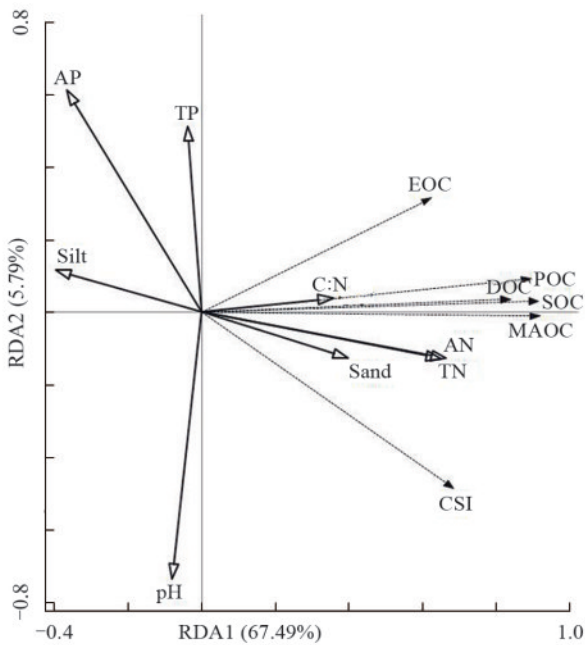
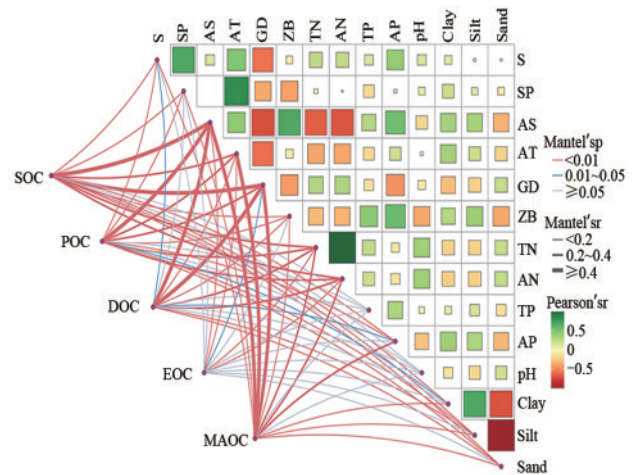


图 4 土壤有机碳组分及稳定性与影响因素的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis between SOC fractions, stability, and influencing factors

土壤氮通过增强植被生产力,提高凋落物输入量,直接提升土壤SOC的积累。有研究^[18]发现,土壤中氮素与有机质通过氨基-羧基反应形成稳定的有机矿物复合体,抑制SOC矿化。同时,阴坡的砂粒质量分数较高,促进微团聚体和颗粒结合形成大团聚体,使得土壤SOC通过闭蓄在团聚体中形成物理隔绝,降低微生物对其的矿化分解速率,减少土壤SOC损失^[19]。本研究发现,干旱河谷阴坡相较阳坡土壤含水率高,其植被长势好、生物量多,进而增加对土壤有机碳的输入量;阳坡所接受的太阳辐射强度大,辐射时间长,地表温度偏高,增强微生物活性,加快有机质的矿化速率,不利于有机碳的积累^[6]。本研究发现,干旱河谷土壤有机碳整体偏高,可能是由于干旱河谷较低的降水量抑制土壤呼吸速率,有利于土

壤有机碳的积累^[20]。



注:S为坡度;SP为坡位;AS为坡向;AT为海拔;GD为植被盖度;ZB为植被类型。

图 5 土壤有机碳组分影响因子的 Mantel 分析

Fig. 5 Mantel test for drivers of SOC fractions

山地条件下,坡位变化导致环境因子呈阶梯性变化,进而引起土壤SOC的分布差异^[21]。本研究显示,干旱河谷区土壤SOC均随坡位的升高而逐渐降低,与陈志林等^[22]在青海、周鑫等^[23]在张广才岭的研究结果均一致,坡下土壤有机碳质量分数高的原因一方面是由于坡面侵蚀造成的富碳土壤物质的沉积;另一方面,与坡上相比,坡下林分生产力高,凋落物数量较大,从来源上提高有机碳的输入,促使土壤微生物和土壤动物更加活跃,加快林下凋落物的分解,进而造成坡下与坡上有机碳积累的差异^[24]。

不同坡位土壤理化性质存在差异,影响土壤SOC及其组分的质量分数。随着土壤体积质量增大,土壤渗透率降低,土壤酶活性降低,不利于SOC的形成;土壤氮磷是土壤物质循环的核心,对林木生长和土壤微生物有重要作用,而植物根系分泌物可以促进团聚体的形成,增强对SOC的物理保护,有利于SOC的积累^[22]。

3.2 不同坡向和坡位对土壤有机碳组分及其稳定性的影响

土壤 POC 和 DOC 在不同坡向之间的分布趋势与土壤 SOC 一致,而土壤 EOC 则表现为阴坡和半阴坡显著大于半阳坡和阳坡。是由于阴坡和半阴坡相比阳坡和半阳坡全氮更高,从而使得凋落物和植物中所含木质素被迅速降解,阴坡和半阴坡土壤 EOC 质量分数明显高于阳坡和半阳坡^[25]。土壤 MAOC 呈阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡,是因为土壤 MAOC 在很大程度上取决于土壤 SOC,使得阴坡土壤 MAOC 高于其他坡向^[26]。

在不同坡位条件下,土壤 EOC、POC 和 DOC 均呈坡下>坡中>坡上。一方面由于坡上接受光照多,蒸发量大,有利于有机质的分解,使得 SOC 组分质量分数小于坡下;另一方面,坡上表层土壤在雨水和径流的冲刷下沿坡面向下迁移,使得底层土壤裸露,易被微生物分解矿化,导致坡上土壤 SOC 质量分数降低,坡下 SOC 质量分数提高^[27]。土壤 MAOC 的分布为坡下>坡中>坡上,一方面与不同坡位间微生物量的差异有关;另一方面,土壤侵蚀导致坡上和坡中的植物残体被冲刷至坡下,使坡下 MAOC 质量分数较高^[28]。

土壤有机碳稳定性主要受土壤理化性质、外部环境条件及土壤微生物活性强弱的影响。目前对土壤有机碳稳定机制的观点暂未统一,但都认可矿质结合有机碳在土壤有机碳稳定方面发挥的重要作用^[14]。本研究结果表明,阳坡土壤有机碳稳定性显著低于其他坡向($p < 0.05$),而坡位梯度上土壤有机碳稳定性表现为坡下>坡中>坡上。阳坡土壤 MAOC 占 SOC 比例相较于其他坡向最低,而颗粒有机碳占比则更高,说明阳坡土壤碳库最不稳定;随着坡位上升,土壤有机碳稳定性呈下降趋势,是由于坡上受到的土壤侵蚀强度大,土壤结构稳定性差,重组有机碳占比逐渐降低,活性有机碳占比逐渐上升,进而减弱土壤有机碳稳定性^[26]。阴坡和坡下土壤 DOC 相比其他坡向和坡位高,其质量分数升高导致易分解有机物增加,微生物碳利用性提高,使得转化为微生物残体碳质量分数升高,形成矿质结合有机碳的比例增加,提高土壤有机碳稳定性^[29]。

4 结论

1)干旱河谷区坡向和坡位显著影响土壤 SOC 及其组分(DOC、EOC、POC、MAOC)质量分数,土壤 SOC 及其组分质量分数随着坡向由阴坡向阳坡转变

均呈降低趋势,且在不同坡向表现出显著性差异。土壤 SOC 及其组分质量分数随坡位上升呈下降趋势。

2)干旱河谷区坡向和坡位对土壤 CSI 影响显著,阴坡土壤 CSI 最高,总体表现为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡,阴坡与阳坡和半阳坡之间存在显著差异。在坡位条件下土壤 CSI 随着坡位的上升呈下降趋势,但不同坡位间无显著差异。

3)相关分析表明,土壤 TN、AN 和粒径组成显著影响土壤 SOC 及其组分质量分数,土壤 TN、MAOC 和 DOC 显著影响土壤 CSI。冗余分析结果表明,土壤理化性质解释土壤有机碳各组分及其稳定性变化的 75.92%,其中 AN、C:N 和黏粒质量分数是主要影响因素。

参考文献:

- [1] 洗海英,肖波,姚小萌,等.黄土高原生物结皮覆盖下表层土壤有机碳组分对模拟气候暖湿化的响应[J].应用生态学报,2025,36(1):132-140.
XIAN H Y, XIAO B, YAO X M, et al. Responses of organic carbon fractions in biocrust-covered surface soil to simulated warming and wetting on the Loess Plateau, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(1):132-140.
- [2] 吴彬,徐晶晶,成艳红,等.石灰施用对酸性土壤矿物结合有机碳形成的影响[J].中国农学通报,2021,37(21):98-105.
WU B, XU J J, CHENG Y H, et al. Effects of liming on formation of mineral-associated organic carbon in acidic soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021,37(21):98-105.
- [3] WANG B R, LIANG C, YAO H J, et al. The accumulation of microbial necromass carbon from litter to mineral soil and its contribution to soil organic carbon sequestration[J]. Catena, 2021, 207: e105622.
- [4] 宋瑞朋,杨起帆,郑智恒,等.3种林下植被类型对杉木人工林土壤有机碳及其组分特征的影响[J].生态环境学报,2022,31(12):2283-2291.
SONG R P, YANG Q F, ZHENG Z H, et al. Effects of three understory vegetation types on soil organic carbon and its components in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022,31(12):2283-2291.
- [5] 王珍,常顺利,王冠正,等.天山中段北坡森林土壤有机碳库稳定性组分沿海拔的分异规律[J].生态学报,2023,43(18):7390-7402.
WANG Z, CHANG S L, WANG G Z, et al. Altitudi-

- nal distribution of the forest soil organic carbon fractions on the northern slope of the middle Tianshan Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(18): 7390-7402.
- [6] 张凯,徐慧敏,李秧秧.坡向与植物群落对水蚀风蚀交错带土壤有机碳氮的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):156-165.
ZHANG K, XU H M, LI Y Y. Effects of slope aspects and plant community types on soil organic carbon and nitrogen in the crisscross area of wind-water erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 156-165.
- [7] 王艳丹,何光熊,宋子波,等.酸角人工林不同坡位土壤有机碳及其活性组分的变化[J].土壤,2020,52(6):1256-1262.
WANG Y D, HE G X, SONG Z B, et al. Study on soil organic carbon and its active fractions at different slope sites of *Tamarindus indica* plantation [J]. *Soils*, 2020, 52(6):1256-1262.
- [8] 卫玮,党坤良.秦岭南坡林地土壤有机碳密度空间分异特征[J].林业科学,2019,55(5):11-19.
WEI W, DANG K L. Spatial variation of the density of soil organic carbon in forest land on the southern slope of Qinling Mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(5): 11-19.
- [9] 唐朋辉,党坤良,王连贺,等.秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度影响因素[J].生态学报,2016,36(4):1030-1039.
TANG P H, DANG K L, WANG L H, et al. Factors affecting soil organic carbon density in *Betula albo-sinensis* forests on the southern slope of the Qinling Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1030-1039.
- [10] 范建容,杨超,包维楷,等.西南地区干旱河谷分布范围及分区统计分析[J].山地学报,2020,38(2):303-313.
FAN J R, YANG C, BAO W K, et al. Distribution scope and district statistical analysis of dry valleys in southwest China [J]. *Mountain Research*, 2020, 38(2): 303-313.
- [11] LV C, SABA T, WANG J Y, et al. Conversion effects of farmland to *Zanthoxylum bungeanum* plantations on soil organic carbon fractions in the arid valley of the upper reaches of the Yangtze River, China [J]. *Catena*, 2022, 217:e106523.
- [12] 常博然,陈茹岚,王彪,等.藏东南折拉山不同林分类型土壤有机碳及其组分分布特征[J].生态环境学报,2024,33(10):1495-1505.
CHANG B R, CHEN R L, WANG B, et al. Characteristics of soil organic carbon and its component distribution in different forest stand types on mount Zola in southeast Tibet [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(10):1495-1505.
- [13] BRUBAKER S C, JONES A J, LEWIS D T, et al. Soil properties associated with landscape position [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 235-239.
- [14] LAVALLEE J M, SOONG J L, COTRUFO M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261-273.
- [15] 姜永孟,苏浩浩,陆宇明,等.针阔混交措施对红壤侵蚀区马尾松林土壤有机碳稳定性的影响[J].水土保持学报,2024,38(5):323-331.
JIANG Y M, SU H H, LU Y M, et al. Effect of coniferous and broadleaf mixture measures on soil organic carbon stability of *Pinus massoniana* plantation in red soil erosion area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5):323-331.
- [16] 崔梦莹,周荣磊,郑诚,等.黄土丘陵区草地上生物量及土壤水分养分对微地形变化的响应[J].水土保持研究,2024,31(1):18-26.
CUI M Y, ZHOU R L, ZHENG C, et al. Responses of aboveground biomass and soil moisture and nutrients to microtopographic changes in grassland in the loess hilly region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1):18-26.
- [17] 毛馨月,沈育伊,褚俊智,等.模拟氮沉降对中亚热带桉树人工林土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响[J].环境科学,2025,46(2):1032-1045.
MAO X Y, SHEN Y Y, CHU J Z, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil organic carbon fractions and carbon pool management indicators in mid-subtropical *Eucalyptus* plantations [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2):1032-1045.
- [18] 李瑾璞,于秀波,夏少霞,等.白洋淀湿地区土壤有机碳密度及储量的空间分布特征[J].生态学报,2020,40(24):8928-8935.
LI J P, YU X B, XIA S X, et al. The spatial distribution of soil organic carbon density and carbon storage in Baiyangdian wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24):8928-8935.
- [19] 李冰,庞丹波,陈林,等.贺兰山不同海拔土壤团聚体有机碳稳定性[J].生态学报,2024,44(24):11241-11253.
LI B, PANG D B, CHEN L, et al. Stability of organic

- carbon in soil aggregates at different elevations in Helan Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (24): 11241-11253.
- [20] 刘尉, 王丽华, 符饶, 等. 增加降水对干旱河谷区云南松人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1391-1400.
- LIU W, WANG L H, FU R, et al. Effects of precipitation increase on soil respiration of a *Pinus yunnanensis* plantation in a dry river valley area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1391-1400.
- [21] 彭晓滢, 郭赓, 蒯杰, 等. 坡位对杉木人工林土壤有机碳及其活性组分特征的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(10): 1319-1327.
- PENG X Y, GUO G, KUAI J, et al. Effects of slope positions on soil organic carbon and its labile fractions in Chinese fir plantations [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(10): 1319-1327.
- [22] 陈志林, 强浪浪, 向安民, 等. 地形因子对青海祁连山圆柏林土壤有机碳空间分布的影响[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(6): 68-74.
- CHEN Z L, QIANG L L, XIANG A M, et al. Effects of topographical factors on the spatial distribution of soil organic carbon of *Juniperus przewalskii* forest in Qinghai Province [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(6): 68-74.
- [23] 周鑫, 姜航, 孙金兵, 等. 地形因子和物理保护对张广才岭次生林土壤有机碳密度的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(4): 94-106.
- ZHOU X, JIANG H, SUN J B, et al. Soil organic carbon density as affected by topography and physical protection factors in the secondary forest area of Zhangguangcai Mountains, northeast China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38 (4): 94-106.
- [24] 王文虎, 王世林, 梁国玲, 等. 坡向和坡位对祁连山高寒灌丛植物群落多样性的影响[J]. *草业学报*, 2025, 34(1): 17-28.
- WANG W H, WANG S L, LIANG G L, et al. Effects of slope categories of differing aspect and position on plant community diversity in alpine shrubland in the Qilian Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(1): 17-28.
- [25] 黄斌, 王泉泉, 李定强, 等. 南岭山地土壤有机碳及组分海拔梯度变化特征[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 374-383.
- HUANG B, WANG Q Q, LI D Q, et al. Variation characteristics of organic carbon and fractions in soils along the altitude gradient in Nanling mountains [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(2): 374-383.
- [26] 王紫颖, 谷思玉, 车延静, 等. 东北风蚀区不同土地利用方式下土壤有机碳组分及其稳定性[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(7): 1815-1824.
- WANG Z Y, GU S Y, CHE Y J, et al. Soil organic carbon fractions and their stability under different land uses in wind erosion area of northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(7): 1815-1824.
- [27] 潘蕊蕊, 李小雁, 胡广荣, 等. 青海湖流域季节性冻土区坡面土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6374-6384.
- PAN R R, LI X Y, HU G R, et al. Characteristics of soil organic carbon distribution and its controlling factors on hillslope in seasonal frozen area of Qinghai Lake basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6374-6384.
- [28] 唐开钊, 张君耀, 吴聪, 等. 不同坡位柑橘园土壤团聚体矿物结合态有机碳矿化特征[J]. *土壤学报*, 2024, 61(6): 1639-1652.
- TANG K Z, ZHANG J Y, WU C, et al. Mineralization characteristics of mineral-associated organic carbon in citrus orchards soil aggregates at different slope positions [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (6): 1639-1652.
- [29] 薛志婧, 李霄云, 焦磊, 等. 土壤矿质结合态有机碳形成及稳定机制的研究进展[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 12-23.
- XUE Z J, LI X Y, JIAO L, et al. Advance in the formation and stabilization mechanisms of soil mineral-associated organic carbon [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 12-23.