DOI: 10. 11686/cyxb2025433 http://cyxb. magtech. com. cn
司静, 王瑶, 许仲林. 天山北坡草地矿物结合态有机碳的空间分异. 草业学报, 2026, 35(10): 1－14.
SI Jing, WANG Yao, XU Zhong-lin. Spatial variation of mineral-associated organic carbon in grassland on the northern slopes of the Tianshan Mountains. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(10): 1－14.

天山北坡草地矿物结合态有机碳的空间分异

司静[1,2], 王瑶[1,2], 许仲林[1,3,4,5*]
(1. 新疆大学生态与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆精河温带荒漠生态系统教育部野外科学观测研究站, 新疆 精河 833300; 4. 自然资源部荒漠-绿洲生态监测与修复工程技术创新中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 5. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 矿物结合态有机碳(mineral-associated organic carbon, MAOC)是土壤有机碳中较为稳定的重要组分, 其含量变化直接影响土壤碳库的组成与长期稳定性, 尤其在干旱区草地生态系统中, 对碳的长期固存与碳汇功能发挥关键作用。目前, 对中亚干旱与半干旱区草地MAOC空间格局及其主控因子的研究尚有不足。本研究以新疆天山北坡草地为对象, 从草地类型、土壤剖面及地形－气候－土壤因子3个维度, 探讨MAOC的空间分布特征及其驱动机制。结果表明: 1)MAOC含量随土层深度增加而降低, 不同草地类型间依次为山地草甸＞典型草原＞荒漠草原; 2)相关性分析表明, MAOC含量与气温和土壤pH呈显著负相关关系, 而与海拔、坡度、速效磷与全氮含量呈显著正相关关系; 3)碳稳定性指数(carbon stability index, CSI)显示, 深层土壤CSI值越高, 碳稳定性越好; 4)基于多元回归分析构建MAOC的空间预测模型揭示, MAOC含量呈现由西北向东南递增的空间异质性格局。研究结果有助于深入理解干旱半干旱区草地生态系统MAOC的空间特征与影响因素, 为新疆及干旱区"双碳"战略背景下制定陆地碳管理政策提供科学支撑。

关键词: 矿物结合态有机碳; 空间分布; 主控因子; 干旱草地

Spatial variation of mineral-associated organic carbon in grassland on the northern slopes of the Tianshan Mountains

SI Jing[1,2], WANG Yao[1,2], XU Zhong-lin[1,3,4,5*]
1. *College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi* 830017, *China*; 2. *Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi* 830002, *China*; 3. *Xinjiang Jinghe Observation and Research Station of Temperate Desert Ecosystem, Ministry of Education, Jinghe* 833300, *China*; 4. *Technology Innovation Center for Ecological Monitoring and Restoration of Desert-Oasis, Ministry of Natural Resource, Urumqi* 830002, *China*; 5. *Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education , Xinjiang University, Urumqi* 830017, *China*

Abstract: Mineral-associated organic carbon (MAOC) is a relatively stable and important fraction of soil organic carbon, and variations in its content directly affect the composition and long-term stability of soil carbon pools. In arid grassland ecosystems in particular, MAOC plays a key role in long-term carbon sequestration and the functioning of carbon sinks. However, studies on the spatial pattern of MAOC in grasslands of the arid and semi-arid regions of central Asia and the main factors controling it remain limited. In this study, we focused on grassland on the northern

收稿日期: 2025-10-20; 改回日期: 2025-12-09
基金项目: 新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划)(No. 2023E01006)和新疆自然科学基金科技创新人才-青年拔尖项目(2024TSYCCX0004)资助。
作者简介: 司静(2000－), 女, 新疆奎屯人, 在读硕士。E-mail: 107552301758@stu. xju. edu. cn
*通信作者 Corresponding author. E-mail: zlxu@xju. edu. cn

slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang, and examined the spatial distribution characteristics and driving mechanisms of MAOC considering grassland type, soil profile, and topographic—climatic—soil factors. The results show that: 1) The MAOC content decreased with increasing soil depth, with the largest decreases in mountain meadow, followed by typical steppe, and then desert steppe; 2) The MAOC content was significantly negatively correlated with air temperature and soil pH, and significantly positively correlated with elevation, slope, available phosphorus and total nitrogen; 3) The carbon stability index values were higher in deeper soil layers, indicative of higher carbon stability in deeper layers; 4) A spatial prediction model for MAOC based on multiple regression analyses revealed a spatially heterogeneous pattern where the MAOC content increased from northwest to southeast. These results deepen our understanding of the spatial characteristics of MAOC and factors influencing MAOC in arid and semi-arid grassland ecosystems, and provide scientific support for formulating land carbon management policies under the "dual carbon" strategy in Xinjiang and other dryland regions.

Key words: mineral-associated organic carbon (MAOC); spatial distribution; main controlling factors; arid grassland

在陆地生态系统中,土壤碳库是最大的碳储存体,其贮存与释放的微小变化都会对大气CO_2浓度造成显著影响,并直接影响全球的生态环境和碳平衡[1]。土壤有机碳全球储量为1450~2120 pg,约为大气碳库储量的3倍、生物量碳库储量的4倍以上[2-4]。在矿质土壤中,有机碳与具有较大比表面积和较高活性的土壤矿物质结合,形成矿物结合态有机碳(mineral-associated organic carbon, MAOC)[5-6],其稳定性较高,不易分解,在土壤中留存时间长,它们促进土壤团聚体的形成,并调控土壤中一系列物理、化学和生物学过程,对陆地生态系统中有机碳的长期储存起决定性作用[7-8]。最新研究表明,全球土壤MAOC储量约为840~1540 pg C,约占总有机碳(soil organic carbon, SOC)的34%~51%。MAOC作为大气CO_2的重要汇源,在影响和缓解全球气候变化中扮演着重要的角色[9]。了解MAOC组成及形成机制是深入理解土壤碳动态和应对气候变化的重要前提[10-11]。

草地生态系统作为全球分布最广的生态系统类型之一,覆盖面积达52.5亿hm^2,约占全球无永久冻土陆地面积的40.5%[12],在物质循环与能量流动中发挥关键作用。我国拥有丰富的草地资源,总面积约3.93亿hm^2,占全球草原总面积的12%、国土面积的41%,相当于农田与森林面积总和的4倍,是我国分布最广的陆地生态系统之一[13]。国内外围绕草地土壤有机碳的空间分布特征及其驱动因素已开展了广泛研究。准确评估草地土壤有机碳储量并揭示其动态变化规律,对于草地管理优化、碳汇功能提升及应对气候变化具有重要的参考价值。区域尺度研究表明,气候条件与植被特征是影响草地土壤有机碳积累的主要驱动因子[14]。丁金梅等[15]研究表明,年降水量与年均温是影响草地土壤有机碳空间分布的关键因子;常帅等[16]对锡林郭勒草原的研究发现,土壤有机碳含量与温度呈负相关关系,与降水量呈正相关关系。此外,植被类型、土壤质地以及人为活动亦会对草地土壤有机碳的分布产生显著影响[17]。在流域尺度,海拔与坡度等地形因子对土壤有机碳分异具有重要作用[18-19]。综上所述,关于草地土壤有机碳空间分布格局与驱动因素的研究已取得显著进展,但针对其组分的研究仍显不足。目前,分析土壤有机碳组分含量特征及其调控因素,已成为探究土壤有机碳形成、演化与稳定性的重要方向[20-23]。

在现有研究中,气候被认为是SOC组分变化的主要控制因素,如Luo等[24]发现日照差对颗粒态有机碳(particulate organic carbon, POC)的变化产生正向影响,而与MAOC含量呈负相关关系;Georgiou等[25]的研究发现MAOC含量随年均温的升高而下降。干旱环境促进POC在土壤表层积聚,但因无法随降水迁移至深层土壤,从而整体降低SOC的稳定性[26]。地形因素引起的环境变化极大地影响SOC的含量变化,被视为SOC及其组分空间变异的主要因素之一。董玉清等[27]通过对比猫儿山不同海拔处土样及其组分含量发现,POC随海拔升高呈单峰曲线变化,MAOC随海拔升高而增加。土壤质地和pH等理化性质的差异会通过影响微生物活性和SOC的矿化过程[28]对有机碳的稳定性和积累速率产生影响[29]。天山北坡是典型的山地草原生态系统,位于干旱半干旱区过渡地带,植被类型多样,土壤形成过程受气候、地形和母质等多重因子的影响,具有复杂的空间异质性。因

此，本研究以天山北坡草地为对象，通过实地采样，分析该区域草地矿物结合态有机碳含量，探讨MAOC与气候、地形、土壤理化性质等影响因素的关系，明确影响MAOC的主控因素，引入碳稳定性指数评估土壤碳稳定性，并基于主控因子构建MAOC空间预测模型，从机制与空间双重维度深化对干旱区草地MAOC分布的理解。

1　材料与方法

1.1　区域概况

研究区位于新疆天山北坡（42°30′－44°00′ N，83°00′－85°30′ E），涵盖乌鲁木齐市、昌吉市、呼图壁县、玛纳斯县、沙湾县、乌苏市、精河县等多个县市（图1）。该区域海拔为1200～2200 m。属于典型的中温带干旱半干旱大陆性气候，年均温度5～10 ℃，年均降水量为200～400 mm，降水主要集中于夏季。研究区植被以山地草原为主，主要优势植物种包括针茅属（*Stipa* spp）、冷蒿（*Artemisia frigida*）、羊草（*Leymus chinensis*）等。土壤类型以栗钙土和灰钙土为主，母质多以风成黄土及山地冲积物为主。

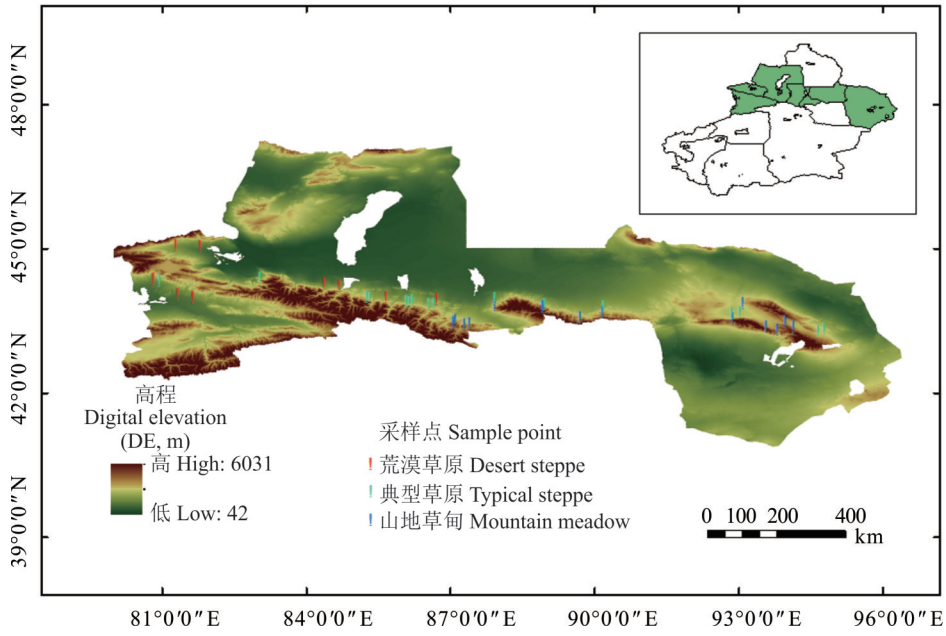


图1　天山北坡地理位置及土壤采样点分布

Fig. 1　Geographical location of the northern slpoes of the Tianshan Mountains and distribution of soil sampling sites

基于自然资源部标准地图服务网站GS（2024）0650号标准地图制作，底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2024)0650 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

1.2　数据采集与来源

土壤样品采集于2024年，采样区覆盖天山北坡不同海拔、坡度，共设置40个采样点，包括山地草甸15个、典型草原16个、荒漠草原9个。样点布设综合考虑草地类型、地形条件及分布均匀性。在每个样地采集0～10 cm、10～20 cm和20～30 cm 3个土层的样品，每类土层取样4～5个点并混合均匀形成一个复合样，共计样品120个。采集的土壤样本带回实验室后，经过自然风干、杂质剔除以及研磨过2 mm筛处理，以备后续分析使用。

本研究选用的环境因子包括地形因子（海拔、坡度、坡向）、气象因子（多年均温、多年降水）以及土壤理化性质（pH、电导率、全氮、全磷、速效磷）。地形数据来源于地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）的高程（digital elevation, DE）数据，2005至2024年的气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心（http://data.tpdc.ac.cn/）。

1.3　研究方法

1.3.1　土壤样品测定　　采用重铬酸钾容量法－外加热法[30]测定土壤有机碳含量。采用振荡分散物理分组

法[31]对颗粒态和矿物结合态有机碳进行提取，称取10 g过2 mm筛的土样与50 mL 0.5%的六偏磷酸钠溶液混合，摇匀后用振荡器振荡18 h；将分散液过53 μm筛，<53 μm组分记为MAOC，>53 μm组分记为POC。随后测定二者的有机碳含量，最后根据其占土壤样品质量的百分比，计算得到该土样的颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳含量。使用pH计(PHSJ-3F，上海)测定土壤pH，土壤电导率用电导率仪(DDSJ-307F，上海)测定。全氮测定采用半微量凯氏定氮法，全磷测定采用钼锑抗分光光度计法，速效磷采用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$—钼锑抗比色法分析[30]。

1.3.2 MAOC含量的空间预测　为提升MAOC空间分布预测的准确性，本研究未采用传统插值方法，而是基于MAOC与其显著影响因子之间的统计关系构建预测模型。首先，基于土壤实测数据，在建模前对自变量进行方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)检测并剔除共线变量后，选取与MAOC显著相关的因子(如海拔、pH、速效磷等)为自变量，MAOC含量作为因变量，采用多元线性回归方法建立预测方程。其次，根据回归方程，在ArcGIS中结合各因子栅格图层进行空间运算，获取区域MAOC的空间预测分布图。该方法较传统插值法更能体现碳稳定性空间异质性形成的生态驱动机制，提高空间模拟的科学性和生态解释力。

$$\text{预测栅格}=\text{截距}+\sum(\text{系数}\times\text{自变量栅格})$$

1.3.3 土壤碳稳定性指数(carbon stability index, CSI)　为进一步揭示草地土壤有机碳稳定性特征，本研究以POC与MAOC为基础，构建土壤碳库稳定性指数[32]。CSI为无量纲指标，反映土壤有机碳的难利用程度，数值越高，表明土壤碳库稳定性越强。计算公式如下：

$$CSI=MAOC/POC$$

1.4 数据处理

采用一般统计分析、相关性分析和随机森林分析研究区域土壤有机碳组分含量的基本统计特征。其中，变量间相关性采用Spearman分析方法。为量化各环境因子对MAOC的贡献率，按3层土壤(0～10 cm、10～20 cm、20～30 cm)分别建立随机森林回归模型，自变量包括海拔、坡度、坡向、年均气温、年均降水、pH、电导率、全氮、全磷、速效磷，因变量为MAOC含量。模型采用R语言ranger包，参数设定为ntree=1000、mtry通过网格优化确定、nodesize=5，并用袋外(out of bag, OOB)样本评估性能报告OOB-R^2、均方根误差(root mean squared error, RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)。变量的“相对重要性”采用置换重要性(permutation importance, %IncMSE)计算：将某一自变量随机置换后，比较OOB预测误差相对增加幅度，其值越大表示该因子对MAOC的贡献越高；将各因子的%IncMSE归一化后，即得到变量的相对重要性。在SPSS中完成统计分析、相关性分析和多重共线性诊断。在Origin 2024与ArcGIS 10.2中完成结果绘图。

2 结果与分析

2.1 不同草地类型下土壤有机碳含量变化特征

不同草地类型在各土层的SOC含量存在显著差异(图2)。在0～10 cm土层中，山地草甸SOC含量显著高于荒漠草原和典型草原($P<0.05$)，且典型草原显著高于荒漠草原($P<0.05$)。在10～20 cm土层中，山地草甸SOC含量仍显著高于荒漠草原和典型草原($P<0.05$)，且典型草原与荒漠草原差异显著($P<0.05$)。在20～30 cm土层中，3类草地SOC的含量均明显降低，其中山地草甸仍保持最高水平，并且显著高于荒漠草原与典型草原($P<0.05$)。在垂直分布上，3类草地的SOC含量均随土层深度增加而逐渐下降，但下降幅度存在差异。山地草甸SOC含量在0～10 cm土层显著高于20～30 cm土层。

综上，SOC含量整体分布趋势表现为：山地草甸>典型草原>荒漠草原，且0～10 cm>10～20 cm>20～30 cm。

2.2 不同草地类型土壤有机碳组分特征

随着土层的加深，荒漠草原、典型草原和山地草甸的POC和MAOC含量整体呈下降趋势(表1和表2)。在相同土层内，两类有机碳含量均表现出山地草甸>典型草原>荒漠草原的分布格局。山地草甸表层(0～10 cm)

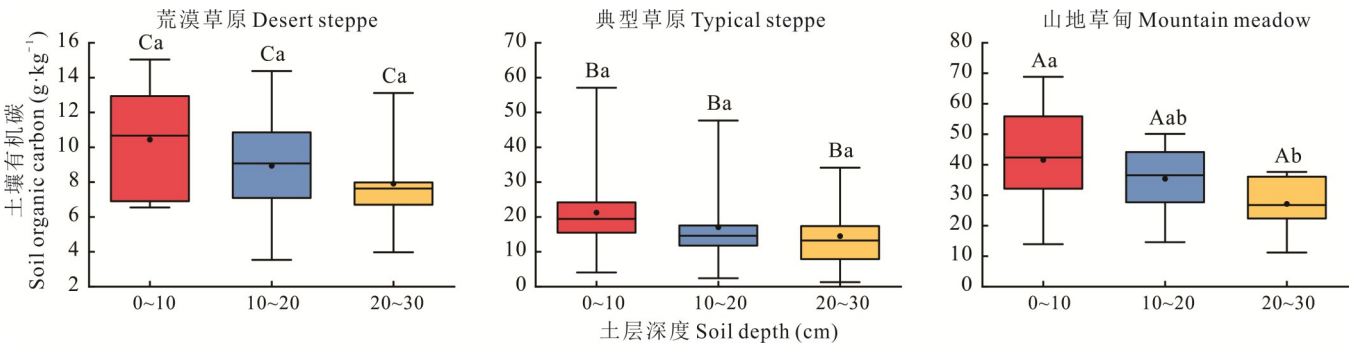


图 2　不同草地类型下土壤有机碳含量分布特征

Fig. 2　Distribution characteristics of soil organic carbon content under different grassland types

不同大写字母表示同一土层不同草地类型间差异显著($P<0.05$)；不同小写字母表示同一草地类型不同土层间差异显著($P<0.05$)。Different uppercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different grassland types in the same soil layer; different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different soil layers in the same grassland type.

表 1　3种草原类型各土层颗粒态有机碳含量

Table 1　Particulate organic carbon content of soil layer in three grassland types

草地类型 Grassland types	土层深度 Soil depth (cm)	最小值 Minimum (g·kg^{-1})	最大值 Maximum (g·kg^{-1})	平均值 Mean (g·kg^{-1})	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficients of variation (%)
荒漠草原 Desert steppe	0～10	1.45	5.58	3.28Ba	1.48	45.13
	10～20	1.03	4.74	2.86Ba	1.34	47.08
	20～30	0.58	4.07	2.01Ba	1.21	60.57
典型草原 Typical steppe	0～10	0.94	18.51	6.61Ba	3.92	59.20
	10～20	1.18	16.46	4.88Bab	3.53	72.25
	20～30	0.37	10.01	3.44Bb	2.06	60.00
山地草甸 Mountain meadow	0～10	3.88	23.65	13.15Aa	5.61	42.68
	10～20	4.03	18.63	11.64Aa	3.92	33.66
	20～30	2.49	12.85	8.17Ab	2.55	31.20

注：不同大写字母表示同一土层不同草地类型间差异显著($P<0.05$)；不同小写字母表示同一草地类型不同土层间差异显著($P<0.05$)。下同 。Note：Different uppercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different grassland types in the same soil layer; different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different soil layers in the same grassland type. The same below.

表 2　3种草原类型各土层矿物结合态有机碳含量

Table 2　Mineral-associated organic carbon content of soil layer in three grassland types

草地类型 Grassland types	土层深度 Soil depth (cm)	最小值 Minimum (g·kg^{-1})	最大值 Maximum (g·kg^{-1})	平均值 Mean (g·kg^{-1})	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficients of variation (%)
荒漠草原 Desert steppe	0～10	4.99	10.34	7.16Ba	1.87	26.10
	10～20	2.50	9.64	6.08Ca	2.39	39.28
	20～30	3.39	9.33	5.90Ca	1.98	33.46
典型草原 Typical steppe	0～10	3.14	38.58	14.64Ba	8.58	58.63
	10～20	1.23	31.23	12.17Ba	7.79	64.02
	20～30	0.92	29.46	11.05Ba	7.48	67.66
山地草甸 Mountain meadow	0～10	10.04	50.89	28.40Aa	11.63	40.96
	10～20	10.55	34.49	23.74Aab	7.44	31.35
	20～30	8.69	27.37	18.95Ab	5.87	30.97

POC与MAOC的平均值分别为13.15 g·kg^{-1}和28.40 g·kg^{-1},显著高于典型草原(6.61 g·kg^{-1}和14.64 g·kg^{-1})及荒漠草原(3.28 g·kg^{-1}和7.16 g·kg^{-1})(P<0.05)。

POC的下降幅度普遍大于MAOC。在典型草原中,POC由表层的6.61 g·kg^{-1}降至20~30 cm土层的3.44 g·kg^{-1},而MAOC由14.64降至11.05 g·kg^{-1};在山地草甸中,POC与MAOC分别由13.15 g·kg^{-1}和28.40 g·kg^{-1}降至8.17 g·kg^{-1}和18.95 g·kg^{-1}。

不同草地类型间的变异系数亦存在明显差异。POC的变异系数(coefficient of variation, CV)范围为31.20%~72.25%,MAOC为26.10%~67.66%,其中典型草原中层(10~20 cm)的变异性最高,表明其空间分布差异较大。总体而言POC和MAOC的含量遵循山地草甸最高、典型草原次之、荒漠草原最低的规律。其中,山地草甸各土层的POC和MAOC含量均显著高于典型草原与荒漠草原(P<0.05),而典型草原与荒漠草原之间的POC含量差异不显著。相关性分析结果表明(图3),各土层POC和MAOC均与土壤总有机碳呈极显著正相关关系(P<0.001)。

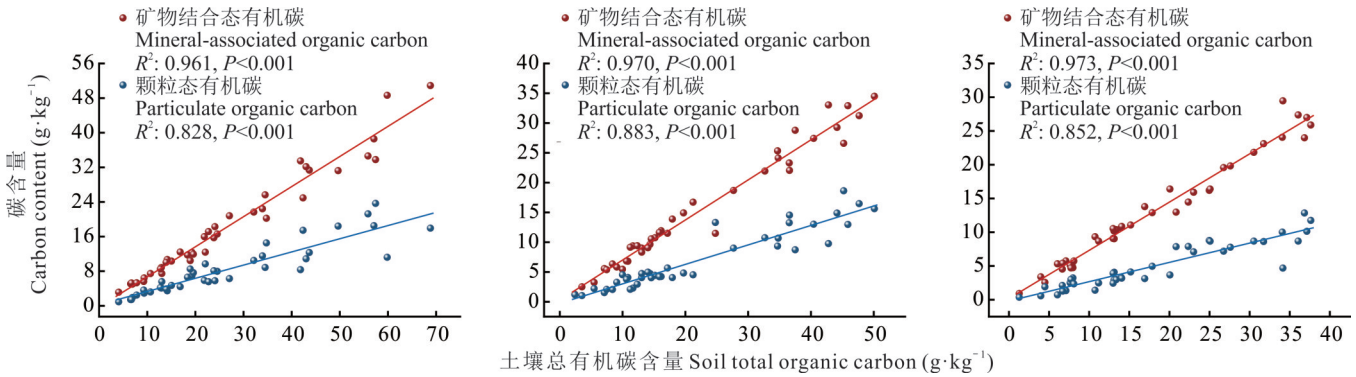


图3 土壤有机碳组分与总有机碳的关系

Fig. 3 Relationship between soil organic carbon fractions and soil total organic carbon

2.3 不同草地类型下各土层的土壤理化性质

对土壤理化性质的研究发现,pH为中性—微碱性,自表层向下略微下降;电导率整体处于0.3~0.9 dS·m^{-1},随土层深度增加而小幅下降,全氮与速效磷含量随土层深度增加明显降低,全磷含量维持在0.02~0.03 g·kg^{-1},变化较小。对比不同草地类型,山地草甸的全氮与全磷含量普遍较高(表层尤为突出),典型草原居中,荒漠草原最低(表3)。

2.4 矿物结合态有机碳的环境影响因素

为探明MAOC含量变化的影响因素及其之间的相互作用,选用地形因子(海拔、坡度、坡向)、土壤理化性质(pH、电导率、全氮、全磷、速效磷含量)、气象因子(多年均温、多年降水)与MAOC含量进行相关性分析。

2.4.1 MAOC与土壤理化特征的相关性 在0~10 cm与10~20 cm土层中,MAOC含量与土壤pH显著负相关(图4),且随着土层深度的增加这种负相关性逐渐减弱,在20~30 cm土层中,MAOC含量与pH相关性不显著。这表明土壤pH对MAOC含量的影响主要集中在表层土壤,而深层土壤中pH对MAOC含量的调控作用减弱。电导率在各土层与MAOC含量之间均未表现出显著相关性,表明研究区土壤盐分相对稳定。

MAOC与速效磷在各土层均呈正相关关系,且在0~20 cm极显著(图4,P<0.01)。全氮在0~10 cm和10~20 cm土层中均与MAOC含量具有极显著正相关关系,随着土层深度的增加相关性减弱。全磷与MAOC含量在10~20 cm土层中呈显著正相关(P<0.05)关系,而在0~10 cm和20~30 cm土层中相关性不显著。

2.4.2 MAOC与地形因子的相关性 采用海拔、坡度、坡向3个地形因子与不同土层MAOC含量进行相关性分析(图4)。结果显示,海拔与MAOC呈极显著正相关关系(P<0.01),表明高海拔地区低温、低氧和高植被覆

表 3　天山北坡草地不同土层的土壤理化性质

Table 3　Soil physicochemical properties across soil layers in northern slope of Tianshan Mountains grasslands

草地类型 Grassland types	土层 Soil depth (cm)	pH	电导率 Electric conductivity ($dS \cdot m^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g \cdot kg^{-1}$)	全磷 Total phosphorus ($g \cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available phosphorous ($g \cdot kg^{-1}$)
荒漠草原 Desert steppe	0～10	7.83±0.30Aa	0.86±1.04Aa	0.22±0.05Aa	0.03±0.01Aa	12.91±3.76Aa
	10～20	7.78±0.30Ab	0.80±0.96Ab	0.17±0.03ABa	0.02±0.01Aa	9.08±1.47Aa
	20～30	7.74±0.28Ac	0.76±0.90Aa	0.14±0.02Ba	0.03±0.01Aa	7.07±1.07Aa
典型草原 Typical steppe	0～10	7.66±0.27Ab	0.38±0.23Aa	0.29±0.11Aa	0.03±0.01Aa	14.36±4.39Aa
	10～20	7.61±0.27Aa	0.36±0.23Ab	0.19±0.04ABa	0.02±0.01Aa	9.34±3.54Aa
	20～30	7.57±0.27Ab	0.35±0.22Aa	0.14±0.03Ba	0.02±0.01Aa	7.83±2.35Aa
山地草甸 Mountain meadow	0～10	7.52±0.22Aa	0.89±2.25Aa	0.33±0.14Aa	0.03±0.01Aa	26.40±29.72Aa
	10～20	7.48±0.22Ab	0.88±2.20Ab	0.24±0.12ABa	0.03±0.01Aa	18.68±21.49Aa
	20～30	7.43±0.22Ac	0.87±2.18Aa	0.15±0.04Ba	0.03±0.01Aa	13.45±17.18Aa

注：数值为：平均值±标准差。不同大写字母表示同一土层不同草地类型间差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母表示同一草地类型不同土层间差异显著（$P<0.05$）。

Note: Values are presented as mean ± standard deviation (SD). Different uppercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different grassland types in the same soil layer; different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different soil layers in the same grassland type.

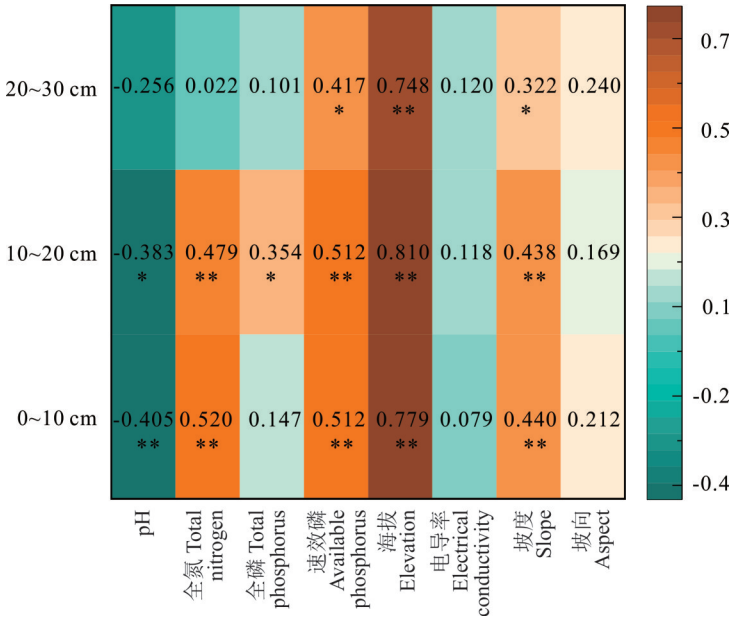


图 4　矿物结合态有机碳含量与各影响因子的相关性分析

Fig. 4　Correlation analysis between mineral-associated organic carbon content and influencing factors

*和**分别表示显著水平为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$。* and ** indicate significance at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

盖度更有利于 MAOC 的积累。坡度与 MAOC 具有显著正相关关系，而坡向与各土层 MAOC 含量之间的相关性均不显著。

2.4.3　分层土壤 MAOC 与气象因子的相关性分析　　相关性分析结果表明（图 5），MAOC 与年均气温呈极显著负相关关系（$P<0.001$），而与年均降水量无显著相关关系。随着年均气温的升高，MAOC 含量呈现明显下降趋势，表明年均气温是该研究区影响 MAOC 含量的主要气候限制因子，而降水在现有范围内对其积累的影响相对较弱。

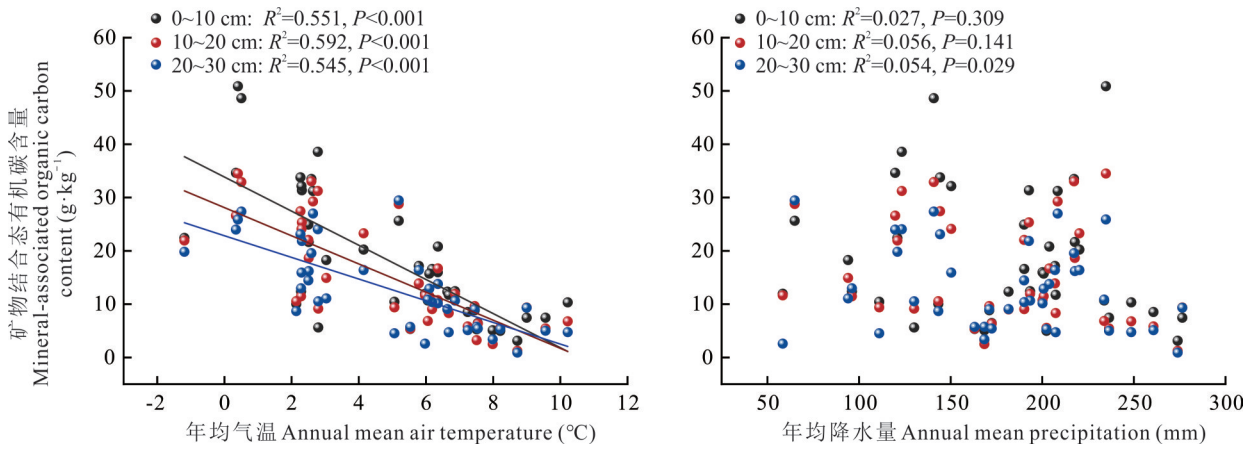


图5 矿物结合态有机碳含量与年均气温和降水量的关系

Fig. 5 Relationship between mineral-associated organic carbon content and annual mean air temperature and precipitation

2.5 MAOC的主控因素

在不同土层深度下,环境因子对MAOC含量的相对重要性存在明显差异(图6)。在0~10 cm土壤中,MAOC含量主要受气温控制,其次是海拔和全氮。此外,速效磷、pH和坡度等因子也表现出一定作用,而降水量和坡向的影响相对较弱。这表明表层MAOC更易受到温度与养分输入的调控。在10~20 cm土壤中,海拔成为最重要的驱动因子,其次是气温,而养分因子的贡献下降,地形因子和电导率等的作用趋于均衡。该结果说明在中层土壤,地形与气候因子对MAOC的调控作用增强,而养分因子的作用有所减弱。在20~30 cm土壤中,海拔的贡献率高达49.4%,呈现出主导地位;气温的影响仍然存在(19.3%)但低于表层。此时坡向和全磷的作用增强,而氮素和速效磷的影响进一步减弱。

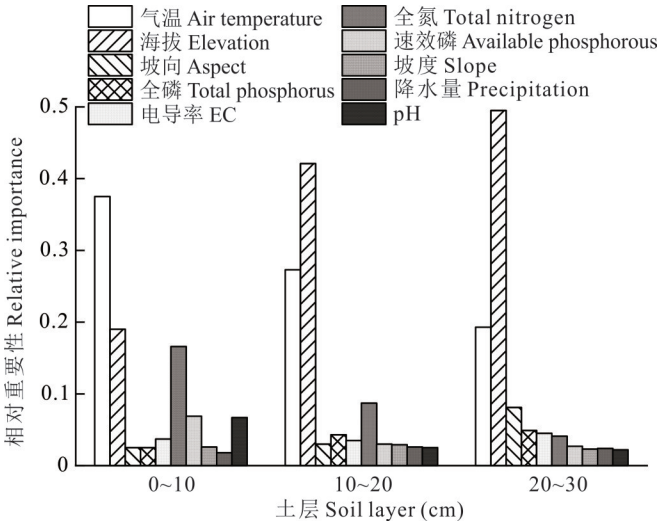


图6 各影响因素对矿物结合态有机碳含量的相对重要性

Fig. 6 Relative importance of factors influencing mineral-associated organic carbon content

2.6 MAOC的空间分布特征

从各土层MAOC含量的空间预测分布结果可以看出(图7),矿物结合态有机碳含量在研究区呈相似的空间分布格局,表现为由西北向东南逐渐升高的空间分异特征,且与3种草地类型的分布相一致,均表现为荒漠草原最低,典型草原次之,山地草甸最高。

2.7 土壤的碳稳定性指数特征

不同草地类型及土层深度下CSI呈现出随土层加深而增加的趋势(图8)。在0~10 cm与10~20 cm土层中,各草地类型的CSI值相对较低,且差异不显著,表明表层土壤中颗粒态有机碳(POC)占比较高。随着土层加深(20~30 cm),荒漠草原CSI平均值显著高于典型草原和山地草甸(P<0.05)。CSI值随土层深度增加而增加的规律说明下层土壤中MAOC比例更高。

3 讨论

3.1 土壤有机碳组分特征分析

随着土层深度的增加,POC和MAOC含量均呈现下降的趋势(表1和表2)。这与宁南山区不同恢复年限柠条(*Caragana korshinskii*)林土壤[33]和天山北坡玛纳斯河流域有机碳垂直分布特征[34]研究结果相一致,可能是由

于植物凋落物会优先输送到表层土壤中，因此土壤有机碳在表层土壤中积累较多。天山北坡草地土壤有机碳以矿物结合态有机碳为主，占土壤总有机碳的 2/3，约是颗粒态有机碳含量的 2 倍，与已有研究结果相一致，即草地土壤中颗粒态有机碳含量通常低于矿物结合态有机碳[35]。这种差异主要是源于这两种有机碳组分的密度差异以及形成机制的不同[36]。颗粒态有机碳主要由部分分解的植物残体组成，密度较低，易被微生物分解；而矿物结合态有机碳则与矿物紧密结合，密度较高，稳定性强，不易被分解，从而在土壤中积累较多[37]。本研究的 CSI 结果进一步验证了这一点（图 8），表层土壤受植被输入的影响显著，颗粒态有机碳比例高，易被微生物分解，而深层 POC 含量低，MAOC 比例高，碳受矿物保护作用增强；天山北坡干旱半干旱气候条件下，深层土壤湿度波动较小，碳分解速率低，有助于碳固存。有研究表明青藏高原东缘典型高寒草甸土壤 POC 主要积聚在 0～10 cm，并且随着土层深度的增加而降低，本研究结果与其一致[38]。进一步说明了 MAOC 在土壤有机碳库中占据重要地位，MAOC 的高稳定性有助于提升土壤的碳汇功能。因此，深入研究 MAOC 的稳定机制，有助于优化土壤管理策略，提升土壤的碳固存能力，为应对气候变化提供科学依据。

进一步相关性分析发现 POC 和 MAOC 均与土壤总有机碳存在极显著正相关关系（图 3，$P<0.001$），MAOC 与 SOC 之间具有更紧密的线性关系并贡献了更大比例的 SOC 变异，而 POC 更为活跃、对环境变化更敏感，其根本原因在于两类碳组分具有不同的周转速率与稳定化机制。总体而言，MAOC 与 SOC 的显著相关性说明，在干旱与半干旱草地生态系统中，短期有机质输入为 MAOC 的形成提供了必需碳源，但长期稳定碳库的大小更受土壤矿物条件及其保护能力的限制，这与 Chen 等[39]的研究结果相符。

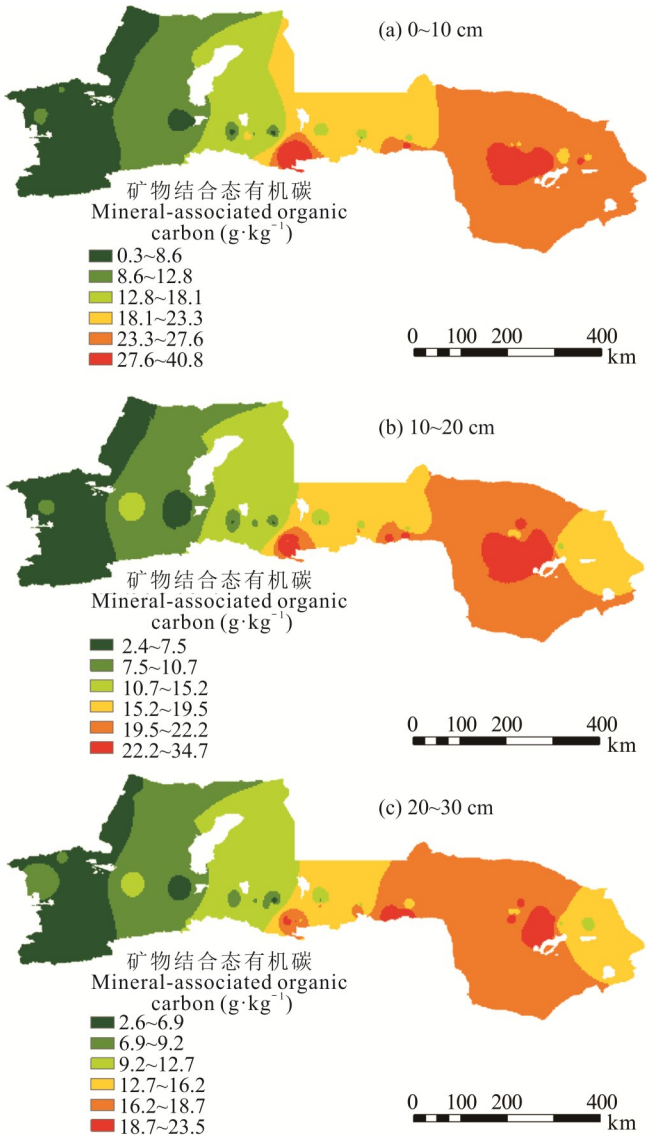


图 7　各土层矿物结合态有机碳含量的分布特征

Fig. 7　Distribution characteristics of mineral-associated organic carbon content across soil layers

基于自然资源部标准地图服务网站 GS（2024）0650 号标准地图制作，底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2024) 0650 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

3.2　关键因子对 MAOC 含量的影响

鉴于 MAOC 的形成与稳定受气候、地形和土壤理化性质等多种环境因子共同调控，因此进一步从气候、地形与土壤理化性质 3 条路径解析其主控因子。

在气象因子中，天山北坡草地 MAOC 含量与年均气温呈极显著负相关关系（图 5，$P<0.001$），主要由于气温变化影响植物光合作用的速率、植被生长以及土壤微生物活性，进而影响生态系统碳库的输入和输出量[40]。然而，MAOC 含量与年均降水量不具有相关性，这与刘伟等[41]对黄土高原草地土壤有机碳的研究结果相似。随机森林与相关性分析结果一致表明（图 6），年均温是 MAOC 的主要控制因子，而年均降水量的作用较弱。温度对 MAOC 呈显著负向影响，反映出较高温度会加速有机质分解，降低微生物残体转化为稳定有机碳的效率。

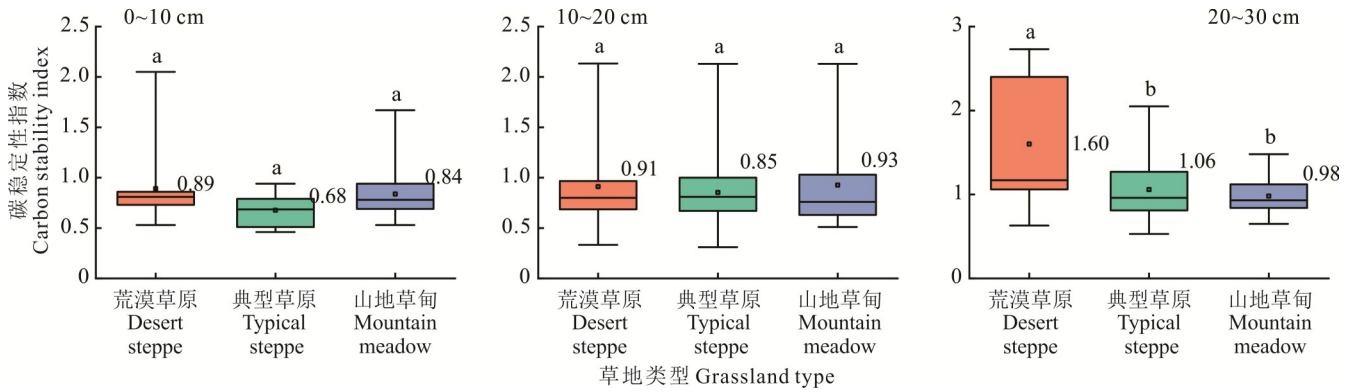


图8 不同草地类型下碳稳定性指数的垂直分布特征

Fig. 8 Vertical distribution characteristics of the carbon stability index (CSI) under different grassland types

不同小写字母表示同一土层不同草地类型之间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among grassland types within the same soil layer.

MAOC的形成主要依赖于微生物残体及其代谢产物在矿物表面的吸附与包埋作用。温度升高会降低微生物的碳利用效率,增加呼吸损耗,从而减少被矿物结合的潜在碳源;同时高温环境也增强了酶促分解活性,加速有机质矿化,进一步限制MAOC的积累。相较之下,降水虽能通过调节土壤湿度影响有机质的输入与微生物活性,但在本研究区年降水量较低且蒸散作用强烈的条件下,降水变化对有效土壤水分和有机碳稳定化的贡献较小,因此未表现为显著控制因子。

地形因子对MAOC的空间分异也具有重要影响。海拔是影响天山北坡草地MAOC的关键因子之一(图4),各土层MAOC含量均随海拔升高而增加,这主要与气温变化有关,高海拔地区通常具有低温、低氧的环境特征,这导致微生物活性降低,各类凋落物和残体分解速度减缓,从而促进有机碳的积累[42]。此外,高海拔区域往往植被覆盖度更高,枯落物输入量较大,进一步增强了MAOC的稳定性。同时,较高海拔的土壤物理结构通常较好,团聚体发育较为完善,这也有助于通过物理保护机制将有机碳与矿物颗粒紧密结合,防止其被微生物快速分解。坡度是地形因素的重要组成部分,其对土地利用分配和植被类型均有显著影响[43]。相关研究表明,坡度能够影响土壤温度、含水量和微生物活性,从而延缓或加速土壤有机碳分解[44]。本研究结果表明(图4),坡度与MAOC含量之间呈正相关关系,可能是随着坡度的增大,受人为干扰的程度减小,植被保持自然状态,生长时间长,生物量大,因此土壤有机碳积累较多[45]。同样,随机森林结果显示(图6),海拔是MAOC的首要控制因子。随着海拔升高,气温下降、湿度增加,植被生长条件改善,微生物残体输入增加且分解速率减缓,从而促进MAOC的积累。同时,地形差异还通过影响径流、侵蚀和辐射格局间接改变矿物结合位点的分布。

土壤化学性质在MAOC的形成与稳定化过程中同样发挥关键作用。研究结果表明土壤pH与MAOC含量呈负相关关系(图4),这与Díaz-Martínez等[46]对全球旱地MAOC的研究结果一致,均得出土壤pH是限制MAOC的重要因素之一。土壤pH影响矿物表面电荷与有机分子的吸附能力,中性或微酸性环境有利于Fe/Al氧化物与有机分子的结合,而碱性环境下结合能力减弱。土壤pH对土壤有机碳组分会产生一定影响[47-48],一方面土壤pH影响金属阳离子的溶解性及淋溶流失程度,进而影响土壤有机碳的积累[49];另一方面土壤pH影响土壤微生物群落结构及活性,进而影响微生物对有机碳的代谢[50]。研究表明,随着土层深度的增加,全氮、全磷、速效磷逐渐降低[51],这与土壤养分的垂直迁移相符[52],上层土壤中的有机质和养分向下迁移过程中受到截流作用,使下层土壤中养分含量相对较低[53]。

综上,天山北坡草地MAOC的空间分异是气候、地形与土壤化学因子共同作用的结果。其中,温度变化通过影响微生物残体形成与矿物吸附过程,对MAOC的形成起主导作用;地形条件通过调节水热格局与矿物结合位点分布,决定了MAOC在不同地貌位置的差异;而土壤化学环境则通过影响矿物吸附强度与微生物碳代谢效率,调节有机碳的稳定化程度。冷湿高海拔地区具备更有利的微生物残体积累与矿物吸附条件,形成更高比例的稳

定碳库，而干旱低海拔区域受热量胁迫和结合位点限制，MAOC稳定化作用较弱。这表明在干旱区草地生态系统中，温度主导的微生物碳转化与矿物结合位点供给之间的平衡机制，是决定土壤有机碳长期稳定化的关键过程。

4　结论

天山北坡草地土壤有机碳以矿物结合态有机碳为主。垂直分布上，土壤矿物结合态有机碳随土层深度的增加含量逐渐降低；水平分布上，矿物结合态有机碳呈现出由西北向东南逐渐增加的趋势，并与草地类型相符（山地草甸＞典型草原＞荒漠草原）。MAOC含量与气温和土壤pH呈显著负相关关系，海拔升高、坡度增大、全氮和速效磷含量升高是MAOC形成与稳定的关键因素。碳稳定性指数结果表明，深层土壤具有更高的碳稳定性，反映了土壤深度对有机碳稳定性的关键影响。综上所述，天山北坡草地MAOC分布受气候、地形及土壤多因子的共同驱动，CSI可为草地土壤碳稳定性评估提供科学依据。

参考文献 References：

[1] Wang Y, Huang L M, Jia X X, *et al*. Distribution characteristics and controls of soil organic carbon at different spatial scales in China's Loess Plateau. Journal of Environmental Management, 2021, 293: 112943.

[2] Zhang R, Zhao X Y, Wang R X, *et al*. Review of the effects of land use/cover change on soil organic carbon dynamic in arid and semi-arid areas. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(7): 2222－2230.
张蕊, 赵学勇, 王瑞雄, 等. 干旱半干旱区土地利用/覆被类型变化对土壤有机碳动态影响的研究进展. 生态学杂志, 2024, 43(7): 2222－2230.

[3] Batjes N H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. Geoderma, 2016, 269: 61－68.

[4] Balesdent J, Basile-Doelsch I, Chadoeuf J, *et al*. Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth. Nature, 2018, 559(7715): 599－602.

[5] Heckman K, Hicks Pries C E, Lawrence C R, *et al*. Beyond bulk: Density fractions explain heterogeneity in global soil carbon abundance and persistence. Global Change Biology, 2022, 28(3): 1178－1196.

[6] Sokol N W, Whalen E D, Jilling A, *et al*. Global distribution, formation and fate of mineral-associated soil organic matter under a changing climate: A trait-based perspective. Functional Ecology, 2022, 36(6): 1411－1429.

[7] Mikutta R, Mikutta C, Kalbitz K, *et al*. Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals via different binding mechanisms. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(10): 2569－2590.

[8] von Lützow M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, *et al*. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(9): 2183－2207.

[9] Trumbore S E, Czimczik C I. An uncertain future for soil carbon. Science, 2008, 321(5895): 1455－1456.

[10] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, *et al*. Climate-smart soils. Nature, 2016, 532(7597): 49－57.

[11] Angst G, Mueller K E, Nierop K G J, *et al*. Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 156: 108189.

[12] Qiu X. The effect of grazing and climate change on characteristics of vegetation and cycle of soil carbon and nitrogen in grassland ecosystem. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
邱晓. 放牧和模拟气候变化对草地生态系统植被与土壤碳氮循环特征的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.

[13] Zhao J L, Liu Y J, Tang F L, *et al*. Evaluation of the necessity of grassland natural park establishment in China. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(4): 1－7.
赵金龙, 刘永杰, 唐芳林, 等. 中国草原自然公园建设的必要性. 中国草地学报, 2020, 42(4): 1－7.

[14] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, *et al*. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. Scientia Sinica (Vitae), 2010, 40(7): 566－576.
方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566－576.

[15] Ding J M, Wang W Z, Mi W B, *et al*. Spatial characteristics of soil organic carbon in grassland of Ningxia and its influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1913－1922.
丁金梅, 王维珍, 米文宝, 等. 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(5): 1913－1922.

[16] Chang S, Yu H B, Cao C M, *et al*. Distribution characteristics of soil organic carbon in Xilin Gol steppe and its influencing factors. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1355-1366.
常帅, 于红博, 曹聪明, 等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1355-1366.

[17] Yin S L, Wang X Q, Li S H. A study on the soil carbon density of different artificial shrub community in Gonghe Basin in Qinghai Province. Soils, 2016, 48(2): 409-413.
尹书乐, 王学全, 李少华. 青海共和盆地不同人工灌木群落土壤碳密度研究. 土壤, 2016, 48(2): 409-413.

[18] Zhu M, Feng Q, Zhang M X, *et al*. Patterns and influencing factors of soil organic carbon in grassland of the middle Qilian Mountains. Acta Agrestia Sincia, 2018, 26(6): 1322-1329.
朱猛, 冯起, 张梦旭, 等. 祁连山中段草地土壤有机碳分布特征及其影响因素. 草地学报, 2018, 26(6): 1322-1329.

[19] Li L, Jiang L N, Bai J H. Multi-scale correlations between spatial variability of soil organic carbon and its influencing factors in semiarid zone. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(5): 40-48.
李龙, 姜丽娜, 白建华. 半干旱区土壤有机碳空间变异及其影响因素的多尺度相关分析. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 40-48.

[20] Lugato E, Lavallee J M, Haddix M L, *et al*. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. Nature Geoscience, 2021, 14(5): 295-300.

[21] Liu F T, Qin S Q, Fang K, *et al*. Divergent changes in particulate and mineral-associated organic carbon upon permafrost thaw. Nature Communications, 2022, 13(1): 5073.

[22] 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. Global Change Biology, 2020, 26(1): 261-273.

[23] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, *et al*. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. Nature Geoscience, 2019, 12(12): 989-994.

[24] Luo Z K, Viscarra Rossel R A, Shi Z. Distinct controls over the temporal dynamics of soil carbon fractions after land use change. Global Change Biology, 2020, 26(8): 4614-4625.

[25] Georgiou K, Jackson R B, Vindušková O, *et al*. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. Nature Communications, 2022, 13(1): 3797.

[26] Du X, Wang H Y. Active components of forest soil organic carbon and its influencing factors in China. World Forestry Research, 2022, 35(1): 76-81.
杜雪, 王海燕. 中国森林土壤有机碳活性组分及其影响因素. 世界林业研究, 2022, 35(1): 76-81.

[27] Dong Y Q, Guan P, Lu Y, *et al*. Fraction and content of soil organic carbon at different elevations in Maoer Mountain. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(5): 1142-1151.
董玉清, 官鹏, 卢瑛, 等. 猫儿山不同海拔土壤有机碳组分构成及含量特征. 土壤通报, 2020, 51(5): 1142-1151.

[28] Wang Y B, Zhao R F, Zhang L H, *et al*. Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe River wetland. Pratacultural Science, 2020, 37(5): 833-844.
王圆博, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黑河中游湿地不同植物群落土壤有机碳分布及影响因素. 草业科学, 2020, 37(5): 833-844.

[29] Zhao Z Z, Zhao Z, Fu B, *et al*. Characteristics of soil organic carbon fractions under different land use patterns in a tropical area. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(2): 689-697.

[30] Bao S D. Soil and agricultural chenmistry analysis (the 3rd edition). Beijing: China Agriculture Press, 2005.
鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005.

[31] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter change across a grassland cultivation sequence. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 777-783.

[32] Chen L Y, Liu L I, Qin S Q, *et al*. Regulation of priming effect by soil organic matter stability over a broad geographic scale. Nature Communications, 2019, 10(1): 5112.

[33] Zhang Y H, Li Y, Zhou Y, *et al*. Changes of soil nutrients and organic carbon fractions in *Caragana korshinskii* forests with different restoration years in mountainous areas of southern Ningxia, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 639-647.
张羽涵, 李瑶, 周玥, 等. 宁南山区不同恢复年限柠条林土壤养分及有机碳组分变化特征. 应用生态学报, 2024, 35(3): 639-647.

[34] 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. 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. 中国生态农业学报, 2025, 33(3): 449－461.

[35] Haddix M L, Gregorich E G, Helgason B L, *et al*. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. Geoderma, 2020, 363: 114160.

[36] Li W D, Chen D, Cheng J L, *et al*. Characteristics and influencing factors of soil particulate and mineral-associated organic carbon in cropland soil across Sichuan Basin. Environment Science, 2025, 46(1): 388－398.
李文丹, 陈丹, 成金礼, 等. 四川盆地耕地土壤颗粒态和矿物结合态有机碳含量特征及其影响因素. 环境科学, 2025, 46(1): 388－398.

[37] Pu N N, Sun Z J, Fan Y M, *et al*. Influencing of grazing intensity on the soil organic carbon and microbial biomass carbon of meadow steppe in Zhaosu area. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2013(1): 66－70.
蒲宁宁, 孙宗玖, 范燕敏, 等. 放牧强度对昭苏草甸草原土壤有机碳及微生物碳的影响. 新疆农业大学学报, 2013(1): 66－70.

[38] Zheng J J, Fang H J, Cheng S L, *et al*. Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5363－5372.
郑娇娇, 方华军, 程淑兰, 等. 增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5363－5372.

[39] Chen R, Yin L, Wang X, *et al*. Mineral-associated organic carbon predicts the variations in microbial biomass and specific enzyme activities in a subtropical forest. Geoderma, 2023, 439: 116671.

[40] Zhang L, Zhou G S, Ji Y H, *et al*. Spatiotemporal dynamic simulation of grassland carbon storage in China. Scientia Sinica (Terrae), 2016, 46(10): 1392－1405.
张利, 周广胜, 汲玉河, 等. 中国草地碳储量时空动态模拟研究. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(10): 1392－1405.

[41] Liu W, Cheng J M, Gao Y, *et al*. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 68－76.
刘伟, 程积民, 高阳, 等. 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.

[42] Zhou X Q, Wu F Z, Yang W Q, *et al*. Dynamics of microbial biomass during litter decomposition in the alpine forest. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 4144－4152.
周晓庆, 吴福忠, 杨万勤, 等. 高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态. 生态学报, 2011, 31(14): 4144－4152.

[43] Mu M. Analysis of spatial and temporal changes and influencing factors of key attributes of soil organic carbon pool in Anhui Province. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2023.
慕明. 安徽省土壤有机碳库关键属性时空变化及影响因素分析研究. 合肥: 安徽理工大学, 2023.

[44] Yan A. Spatial distribution and storages estimation of soil organic carbon and soil inorganic carbon in Xinjiang, China. Beijing: China Agricultural University, 2015.
颜安. 新疆土壤有机碳/无机碳空间分布特征及储量估算. 北京: 中国农业大学, 2015.

[45] Wang B Q. The dynamics and transfer of soil organic carbon and nitrogen in the scenario of erosion and aridity in the loessial region. Yangling: Northwest A&F University, 2004.
王百群. 黄土区侵蚀与干旱环境中土壤有机碳氮的变化与迁移. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.

[46] Díaz-Martínez P, Maestre F T, Moreno-Jiménez E, *et al*. Vulnerability of mineral-associated soil organic carbon to climate across global drylands. Nature Climate Change, 2024, 14(9): 976－982.

[47] Apori S O, Giltrap M, Tian F R. Topsoil organic carbon and soil pH across different peatland use types in Co-offaly, Ireland. Soil Science Annual, 2024, 74(4): 1－7.

[48] Zhou Z F, Zhang L, Wu T, *et al*. Changes in ecosystem service values of forests in southwest China's karst regions from 2001－2020. Forests, 2023, 14(8): 1534.

[49] Shen Z, Han T F, Huang J, *et al*. Soil organic carbon regulation by pH in acidic red soil subjected to long-term liming and straw incorporation. Journal of Environmental Management, 2024, 367: 122063.

[50] Liu F C, Yang Y H, Jiang J, *et al*. Effects of acid rain on soil respiration in Chinese terrestrial ecosystems: A meta-analysis. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10191－10200.
刘丰彩, 杨燕华, 江军, 等. 酸雨对中国陆地生态系统土壤呼吸影响的整合分析. 生态学报, 2022, 42(24): 10191－10200.

[51] Guo N, Degen A A, Deng B, *et al*. Changes in vegetation parameters and soil nutrients along degradation and recovery

successions on alpine grasslands of the Tibetan Plateau. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 284: 106593.

[52] Müller M, Oelmann Y, Schickhoff U, *et al*. Himalayan treeline soil and foliar C∶N∶P stoichiometry indicate nutrient shortage with elevation. Geoderma, 2017, 291: 21－32.

[53] Zhang T. Soil organic carbon components and carbon source metabolism characteristics and their influencing factors in the Qilian Mountain. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024.
张婷. 祁连山土壤有机碳组分和碳源代谢特征及其影响因素. 兰州: 兰州交通大学, 2024.