DOI: 10.20103/j.stxb.202405151109

魏佳媛,任侠,袁丽丽,王晓勤,赵娅茹,李慧,李冰,吴梦瑶,陈林,李学斌,庞丹波.贺兰山西坡不同海拔土壤有机碳热稳定性.生态学报,2025,45 (4):1999-2010.

Wei J Y, Ren X, Yuan L L, Wang X Q, Zhao Y R, Li H, Li B, Wu M Y, Chen L, Li X B, Pang D B. Thermal stability of soil organic carbon at different elevation on the western slope of Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4):1999-2010.

贺兰山西坡不同海拔土壤有机碳热稳定性

魏佳媛¹,任 侠²,袁丽丽²,王晓勤²,赵娅茹³,李 慧³,李 冰³,吴梦瑶³,陈 林³, 李学斌³,庞丹波^{3,*}

1 宁夏大学林业与草业学院,银川 750021

2 内蒙古贺兰山国家级自然保护区管理局,阿拉善左旗 750306

3 宁夏大学生态环境院,西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地,西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,宁夏贺兰山森林 生态系统国家定位观测研究站,银川 750021

摘要:土壤有机碳热稳定性有助于解析土壤对环境因子的响应、认识土壤有机碳稳定性和热动态特征,从而揭示环境要素对碳循环的影响。以贺兰山西坡不同海拔土壤为研究对象,分析土壤理化性质、盐基离子、热重曲线特征、热稳定性参数及热稳定性驱动因素。结果表明:随海拔升高,土壤理化性质除容重(BD)、pH和有效磷(AP)外均呈现递增的趋势;盐基离子主要富集在低海拔地区;TG(Thermogravimetry,热重)曲线所反映的质量损失速率增大;DTG(Derivative thermogravimetry,热重微分)曲线在中低海拔呈双峰趋势,在高海拔呈现单峰趋势;中低海拔 TG-T₅₀(SOC 质量减少一半时对应的温度)相对较高;随海拔升高, Exo₁/Exo₄(较低温度分解下 SOC /总分解 SOC)逐渐增加,而 Exo₂/Exo₄(较高温度分解下 SOC /总分解 SOC)逐渐减少,表明贺兰山西坡低海拔土壤有机碳的热稳定性较高;理化性质和土壤有机碳热稳定性之间的相关性显著水平更高;SOM 是影响土壤有机碳热稳定性的主导因素。综上,贺兰山西坡土壤有机碳热稳定性随海拔升高逐渐降低,低海拔土壤有机碳含有更多耐热成分 且相对更加稳定。

关键词:土壤有机碳;热稳定性;海拔梯度;盐基离子;贺兰山

Thermal stability of soil organic carbon at different elevation on the western slope of Helan Mountain

WEI Jiayuan¹, REN Xia², YUAN Lili², WANG Xiaoqin², ZHAO Yaru³, LI Hui³, LI Bing³, WU Mengyao³, CHEN Lin³, LI Xuebin³, PANG Danbo^{3,*}

1 School of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Administration of Helan Mountain National Nature Reserve Inner Mongolia, Alxa Left Banner 750306, China

3 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Understanding the thermal stability of soil organic carbon (SOC) facilitates interpreting soil responses to environmental factors, comprehending SOC stability, and its thermal dynamic characteristics, thereby revealing the impact of environmental elements on the carbon cycle. This study focuses on soils at various altitudes on the western slope of Helan Mountain, analyzing soil physicochemical properties, base cations, thermogravimetric (TG) curve characteristics, thermal stability parameters, and drivers of thermal stability. The results indicate that, with increasing altitude, soil

基金项目:国家自然科学基金项目(32201631);宁夏重点研发计划项目(2022BSB03069,2021BEG02005);银川市重点研发计划项目(2023SFZD04)

收稿日期:2024-05-15; 网络出版日期:2024-11-15

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: pang89028@163.com

http://www.ecologica.cn

physicochemical properties generally show an increasing trend, except for bulk density (BD), pH, and available phosphorus (AP); base cations are mainly concentrated in lower altitude areas; the mass loss rate reflected by the TG curves increases; derivative thermogravimetry (DTG) curves exhibit a bimodal trend at mid and low altitudes and a unimodal trend at high altitudes; the temperature at which SOC mass is halved (TG-T₅₀) is relatively higher at mid and low altitudes; with increasing altitude, the ratio of SOC decomposition at lower temperatures to total SOC decomposition (Exo_1 / Exo_1) gradually increases, while the ratio at higher temperatures (Exo_2 / Exo_1) decreases, indicating higher thermal stability of SOC in soils at lower altitudes on the western slope of Helan Mountain; the correlation between physicochemical properties and SOC thermal stability is significantly stronger; soil organic matter (SOM) is the dominant factor affecting SOC thermal stability. In summary, SOC thermal stability on the western slope of Helan Mountain decreases with increasing altitude, with lower altitude soils containing more heat-resistant components and being relatively more stable.

Key Words: soil organic carbon; thermal stability; elevational gradient; base cations; Helan mountain

近年来,随着全球环境变化和人类活动的增加,对陆地生态系统变化及其物质循环的研究成为科学界的 热门议题。碳循环是地球生态系统中的关键过程,对地球气候变化的调节具有重要作用。在全球变暖的背景 下,土壤碳储量及其稳定性成为研究热点之一。土壤有机碳(SOC)作为重要的碳汇,是固碳的关键介质^[1],也 是决定土壤健康和生产力的关键因素^[2]。有机碳对微生物降解的抵抗力,即有机碳稳定性,在很大程度上取 决于其内在特性以及周围环境的物理化学和生物影响^[3]。了解土壤有机碳稳定性,对于土壤碳储量、气候变 化以及土壤生态系统功能具有重要意义。SOC 的稳定性受多种因素的影响,包括土壤类型、植被类型、土地利 用方式和水分状况等^[4-5]。有机碳热稳定性是指有机碳在受热条件下的稳定性或持久性^[6]。目前关于有机 碳热稳定分析技术主要包括 Py-GC/MS(热裂解气相-质谱联用)测定技术、Rock-Eval 热分解技术、DSC 差示 扫描量热分析技术及 TG 热重分析,人们普遍认为 TG 操作简便、灵敏快速、试样微量化、结果易于分析^[7],准 确度较高,可以很好地表征 SOC 热稳定性。通过热重分析可以更好地了解 SOC 组分及其热稳定性,并为土壤 质量评估和山地生态环境研究提供重要数据参考。

赵龙华等^[8]基于农田生态系统的分析表明,使用 TG 分析技术测定的 Exo₁/Exo₁(较低温度分解下 SOC/ 总分解 SOC)和 TG-T₅₀(SOC 质量减少一半时对应的温度)能够表征土壤有机碳的热稳定性,且具有高度的一 致性,但 Exo₁/Exo₁对 SOC(土壤有机碳)的热稳定性更加敏感;朱玮玮等^[9]基于喀斯特地区的研究显示,将原 始森林砍伐转变为人工管理的生态系统后降低 SOC 储量,较低温度分解下 SOC 被消耗,土壤热稳定性提高; 赵世翔等^[10]基于苹果园研究发现,生物质炭因热解温度不同,自身理化性质和结构存在较大差异,其环境效 应也有所不同,500℃下制备的苹果枝条生物质炭,可显著增加 SOC 的稳定性和土壤腐殖化程度。

前期研究表明海拔梯度对土壤碳热稳定性具有重要的影响^[11-12]。张宇等^[13]在天山的研究结果表明,低海拔温性荒漠和温性草原化荒漠的 Exo₁/Exo₁和 TG-T_{so}显著低于高海拔的温性荒漠草原和山地草甸。张仲胜等^[14]基于长白山的研究结果显示,凋落叶元素对 SOC 的分子多样性和网络复杂性有较大的调节作用,土壤有机碳组分的种类和丰度随海拔升高而变得更加复杂和多变,促进了 SOC 在山地生态系统中的持久性。但关于高海拔山区土壤碳热稳定性是否较高以及低海拔地区的土壤碳热稳定性是否较低,目前学术界的结论并不一致^[15-17]。在高海拔地区,由于气候条件较为严酷,土壤有机质的分解速度较慢,有利于有机碳的长期储存,因此土壤碳热稳定性可能较高^[5,18]。低海拔地区通常气候较温暖,有机质的分解速度可能较快,导致土壤碳热稳定性较低^[19-21]。然而,并不是所有的研究都得出这样的结论^[22]。因此,并不能简单地认为高海拔地区的土壤碳热稳定性就一定较高,低海拔地区的土壤碳热稳定性就一定较高,低海拔地区的土壤碳热稳定性就一定较低。因此,需要进一步加强有关海拔梯度土壤有机碳热稳定性的研究。

山地生态系统因具有较高的生境异质性和气候多样性[23],是揭示土壤有机碳稳定性沿环境梯度变化的

天然实验室^[8]。目前围绕贺兰山土壤有机碳稳定性的研究主要集中在有机碳来源^[24]、有机碳与土壤微生物 和酶活性之间的相互作用,土地利用变化对有机碳稳定性的影响机制^[25]等方面,但这些研究仍未能很好地回 答土壤有机碳沿海拔垂直分异规律以及热稳定性响应机制。基于此,本研究以贺兰山西坡不同海拔土壤为研 究对象,采取野外调查和实验室分析相结合的方法,分析其理化性质、盐基离子和热重等相关指标,了解不同 海拔土壤有机碳积累及分布特征,明确土壤有机碳热稳定性的影响要素,以期为山地生态系统土壤有机碳热 稳定性研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区和土壤样品采集

贺兰山位于青藏高原、蒙古高原和华北平原的交界处,由于山地陡峭,地形复杂,特殊的地理环境塑造了 贺兰山脉独特的生物群,是我国西部气候和植被的重要分界线^[26]。贺兰山脉自东向西逐渐升高,海拔呈递增 趋势,东部险峻且海拔较低;西部地势较为平缓且海拔较高,主峰海拔3556 m,自然景观垂直带谱明显^[27]。随 海拔高度的变化,从基带至主峰,大致是灰漠土、棕钙土、灰褐土、以及高寒灌丛草甸土^[28]。山体日照充足,无 霜期为60—70 d,年平均气温-8 ℃,年降水量420 mm,年均蒸发量2000 mm,且降雨主要集中在6—8月,占 全年降水量的60%—80%^[29]。该地区气候干旱,植被稀疏,是干旱风沙区森林生态系统的典型代表。

本研究于 2021 年 8 月,在内蒙古贺兰山海拔 1848—2664 m 之间,选取具有代表性的 7 种典型天然林植 被类型,分别为荒漠草原(HM)、灰榆(HY)、灌木(GM)、天然油松林(YS)、青海云杉和油松混交林(HJ)、青海 云杉林(QH)和高山草甸(CD),在每个植被带内按等高线设置 5 个标准样地作为重复,森林样地选取 20 m× 20 m,灌木样方选取 5 m×5 m,草地样地选取 1 m×1 m。在每个标准样地采样时,去除表面的凋落物,利用五 点取样法采集表层土(0—10 cm)并混合,随后置于提前准备的自封袋带回实验室,去除土壤样品的植物根系 和石块过 2 mm 筛子后,自然风干用于土壤理化性质、盐基离子和土壤热重分析测定。

1.2 土壤基本属性测定

含水量(SWC)、容重(BD)、毛管孔隙度(CP)采用环刀取样转移至铝盒烘干称重法测定;全氮(TN)采用 凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用 HCIO₄-H₂SO₄外加热消煮法、紫外分光光度法测定;氨氮(AN)采用碱解扩散 法测定;有效磷(AP)采用浸提法、连续流动分析仪测定;有机质(SOM)采用重铬酸钾氧化外加热法测定;pH 采用 pH 计测定(水土比 2.5:1)^[30-31]。交换性 Na⁺、K⁺、Mg²⁺和 Ca²⁺盐基离子采用乙酸铵置换法测量^[31]。

1.3 热重分析

SOC 热重分析使用 STA 6000 热分析仪(Perkin Elmer, Waltham, USA),按照 Plante 等^[32]给出的分析方 案进行 TG 分析。在分析之前,使用标准纯度 99.9%的铟对热分析仪进行校准。取 20 mg 风干土壤样品过 2 mm筛子去除明显根系和石子,放入带 A 盖的 Al₂O₃坩埚中,然后以升温速率为 10℃/min 的速率进行加热。 载气提供了相对氧化的气氛(30 mL/min 合成空气;20% O₂和 N₂平衡)和 10 mL/min N₂作为保护气体^[32]。 1.4 数据处理

根据各海拔土样 TG 和 DTG 热重曲线的峰范围,计算并划分出本研究中包括 Exo₁、Exo₂和 Exo₁的百分比 含量。本研究将热重曲线分为三个温度范围段,即室温约 200℃、>200—350℃ 和>350—550℃。在其中, >200—350℃温度段的质量损失量(Exo₁)和>350—550℃温度段的质量损失量(Exo₂)分别代表着两类热稳定 性不同的 SOC 含量(即较低温度分解下 SOC 和较高温度分解下 SOC)。而 Exo₁则是 Exo₁和 Exo₂之和,是热分 析方法用来评价土壤有机碳含量和肥力水平的综合指标。

研究采用较低温度分解下(热易分解)SOC 含量与总分解SOC 含量的比值(Exo₁/Exo₁)、较高温度分解下(热难分解)SOC 含量与总分解SOC 含量的比值(Exo₂/Exo₁)、较低温度分解下SOC 与较高温度分解下SOC的比值(Exo₁/Exo₂)以及SOC 质量减少一半时的温度(TG-T₅₀)来表征SOC 热稳定性^[8,13]。

采用 Excel 对数据进行整理, SPSS 27.0 对理化性质、盐基离子、TG-T50、有机碳含量及其比值进行显著性

分析(T 检验)(P<0.05)等数据分析和统计,用 Origin 2021 对数据进行相关性分析和绘制 TG、DTG 和相关性 热图等,使用 Canoco5.0 进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤理化性质特征

贺兰山西坡不同海拔土壤理化性质存在显著差异(P<0.05,表1)。从表1中可以看出,随着海拔梯度上升,含水率、毛管孔隙度、全氮、氨氮和有机质含量整体呈现升高趋势;容重和 pH 含量呈现逐渐降低趋势;而 全磷和有效磷含量在各海拔之间变化规律不明显。

表1 不同海拔土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties at different elevations									
海拔 Altitude/m	含水率 SWC/%	容重 BD/(g/cm ³)	毛管孔隙度 CP/%	全氮 TN/(g/kg)	全磷 TP/(g/kg)	氨氮 AN/(mg/kg)	有效磷 AP/(mg/kg)	有机质含量 SOM(g/kg)	рН
1848	0.83±0.25d	1.43±0.13a	$45.27{\pm}0.03{\rm bc}$	$0.63 \pm 0.16 \mathrm{d}$	$0.49 \pm 0.05 \mathrm{b}$	$14.19 \pm 3.29c$	19.83±3.80a	8.71±1.87e	7.96±0.16a
1905	$2.68 \pm 0.46c$	1.30±0.20ab	$47.87{\pm}0.07{\rm bc}$	$1.05{\pm}0.03{\rm c}$	$0.41{\pm}0.07{\rm b}$	$11.47 \pm 2.14 d$	19.49±1.75a	$15.56{\pm}1.26\mathrm{d}$	$7.72 \pm 0.18 \mathrm{b}$
2134	$3.18 \pm 0.60c$	$1.19 \pm 0.09 \mathrm{b}$	$50.61{\pm}0.02{\rm bc}$	1.54±0.32a	0.71±0.09ab	19.64±1.80ab	18.44±1.68a	$17.30 \pm 1.16 d$	$7.54 \pm 0.12 \mathrm{bc}$
2150	11.12±2.29b	$0.94 \pm 0.19 c$	$54.93 \pm 0.03 \mathrm{ab}$	1.39±0.29ab	0.65±0.13ab	18.53±1.68ab	18.48±4.44a	$31.19 \pm 5.16c$	7.37 ± 0.17 cd
2160	$3.89{\pm}0.72c$	$1.25 \pm 0.18 \mathrm{b}$	$41.27{\pm}0.18{\rm c}$	$1.13 \pm 0.15 c$	$0.56{\pm}0.12{\rm b}$	$17.24{\pm}1.08\mathrm{b}$	16.25±2.00a	30.34 ± 2.74 c	$7.58 \pm 0.13 \mathrm{b}$
2635	16.75±2.89a	$0.67{\pm}0.09{\rm d}$	61.86±0.03a	$1.21{\pm}0.09{\rm bc}$	0.69±0.14ab	20.44±2.85a	17.67±4.01a	$49.81{\pm}4.38\mathrm{b}$	$7.33 \pm 0.19 \mathrm{d}$
2664	15.11±0.78a	$1.00 \pm 0.05 c$	54.36±0.02ab	1.41±0.20ab	0.87±0.49a	18.28±1.27ab	19.16±3.63a	61.49±4.91a	$7.18 \pm 0.29 \mathrm{d}$

表中数据均为平均值±标准差(n=5);不同小写字母表示差异显著(P<0.05);海拔: Altitude/m; SWC: 土壤含水率 Soil water content; BD: 容重 Bulk density; CP: 毛管孔隙度 Capillary porosity; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; AN: 氨氮 Ammonia nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; SOM: 有机质 含量 Organic matter content; pH: 酸碱度 Potential of hydrogen

2.2 不同海拔土壤盐基离子

不同海拔土壤盐基离子如表 2 所示。从表 2 中可以看出贺兰山西坡各海拔盐基离子存在明显的变化规律。随海拔梯度逐渐上升,钾(K)离子呈现先降低再上升再降低趋势,在 1848 m 海拔最高,2134 m 海拔最低;钙(Ca)离子呈现先上升后降低趋势,且呈现出显著差异性(P<0.05),在 1905 m 海拔显著高于其余海拔;镁(Mg)离子无明显变化规律;钠(Na)离子呈现先降低后上升趋势。

不同海拔+博卦其南子

±ι

秋~ 小門四波上場皿盔肉」								
Table 2 Soil base cations at different elevations								
海拔 Altitude/m	钾 K/(cmol/kg)	钙 Ca/(cmol/kg)	镁 Mg/(cmol/kg)	钠 Na/(cmol/kg)				
1848	21.31±0.32a	$28.28{\pm}1.42{\rm c}$	11.72±1.18ab	13.07±0.22a				
1905	$18.41 \pm 0.96 \mathrm{b}$	62.41±0.86a	13.30±1.43a	$11.10\pm0.19c$				
2134	16.41±1.31c	$53.89{\pm}5.17\mathrm{b}$	11.95±1.65ab	$10.66 \pm 0.59 c$				
2150	$19.13 \pm 1.39 \mathrm{b}$	$16.60 \pm 0.92 e$	12.14±1.31ab	$12.47 \pm 0.49 \mathrm{b}$				
2160	$19.53{\pm}1.05{\rm b}$	$22.40{\pm}1.38\mathrm{d}$	12.51±2.02a	12.60±0.28ab				
2635	$18.83 \pm 1.10 \mathrm{b}$	$13.65 \pm 0.74 f$	11.21±1.15ab	$12.32 \pm 0.52 b$				
2664	$18.45 \pm 0.91 \mathrm{b}$	$14.68{\pm}1.08{\rm ef}$	$10.28{\pm}0.72{\rm b}$	11.18±0.59c				

2.3 不同海拔热重曲线特征

图 1 为不同海拔土壤有机质质量在 20—812℃内的 TG 曲线,所有海拔土壤 TG 曲线具有相似的变化趋势,即随着温度升高,土壤有机碳相对质量呈现逐渐降低的趋势。从图中可以看出,同一加热速率下,1848 m、1905 m 和 2134 m 海拔质量损失速率慢,斜率较小;2150 m、2160 m、2635 m 和 2664 m 海拔质量损失速率下降 迅速,斜率较大。中低海拔 1848 m、1905 m、2134 m、2150 m 和 2160 m 温度在 200—700℃ 出现明显的失重阶



梯,高海拔 2635 m 和 2664 m 温度在 300—700℃出现明显失重阶梯;当温度进一步升高,土壤有机碳失重趋势明显减缓,残留物缓慢分解,实验结束时,质量损失率分别为 9%、14%、16%、12%、11%、15% 和 19%。

Fig.1 The soil thermal gravimetric curves at different altitudes

HM: 荒漠草原 Desert steppe; HY 灰榆 Ulmus glaucescens stand; GM: 灌木 Amygdalus mongolica stand; YS: 天然油松林 Pinus tabuliformis stand; HJ: 混交林 Mixed forest; QH: 青海云杉林 Picea crassifolia stand; CD: 高山草甸 Alpine meadow

不同海拔土壤有机碳相对质量在 20—812℃内的 DTG 曲线(图 2),呈现了随温度升高其质量损失速率的 变化趋势。DTG 曲线图相较 TG 曲线图更加直观,从 DTG 图中可看出,贺兰山不同海拔样地所有土壤有机碳 的质量损失速率在加热过程中变化趋势、极值点温度和拐点温度比较相似。随着温度升高,土壤有机碳质量 损失速率在低海拔 1848 m、1905 m 和 2134 m 变化一致,呈双峰趋势,分别出现在 20—300℃和 300—600℃温 度区间范围;中海拔 2150 m 和 2160 m 变化趋势一致,呈双峰趋势,分别出现在 20—340℃和 340—650℃;高

海拔 2635 m 和 2664 m 变化一致,呈现单峰趋势,出现在 100—340℃。贺兰山不同海拔样地 DTG 曲线在 200℃处最为显著,高海拔样地 DTG 曲线在 300℃时为变化最低谷后缓慢上升。各海拔 DTG 曲线最小值约为 -0.035—-0.09%/min。



图 2 不同海拔土壤热重微分曲线

Fig.2 Soil thermal gravimetric weight of differentiation curves at different altitudes

2.4 不同海拔土壤热稳定性参数

TG-T₅₀在海拔 1905 m 最高,2160 m 最低。随着海拔梯度的上升,TG-T₅₀呈现先增高后降低再增高的趋势,统计分析表明差异无显著性(图 3)。沿海拔梯度上升,Exo₁/Exo₁和 TG-T₅₀之间关系不明显(图 4)。

随加热温度和加热时间的变化,不同海拔土壤 Exo₁、Exo₂和 Exo₁,均呈现先上升后下降再上升的变化趋势(图 5)。但总的来说,较高温度分解下 SOC 含量稍高于较低温度分解下 SOC 含量。随海拔的升高,Exo₁/Exo₂和 Exo₁/Exo₁呈现逐渐上升趋势,Exo₂/Exo₁呈现逐渐下降趋势(图 6)。

2.5 土壤有机碳热稳定性影响因素分析

图7显示了贺兰山西坡不同海拔土壤理化性质、盐基离子和热重分析之间的关系。%Exo1、%Exo2、%

2004

Exo₁、Exo₁/Exo₂、Exo₁/Exo₁、SWC、SOM 与%Exo₁、%Exo₂、%Exo₁、Exo₁/Exo₂和Exo₁/Exo₁之间呈现极显著正相 关(P<0.001);Exo₂/Exo₁、BD、pH、Ca与%Exo₁、%Exo₂、%Exo₁、Exo₁/Exo₂和Exo₁/Exo₁之间呈现极显著负相关 (P<0.001);CP、TN、TP、AN与%Exo₁、%Exo₂、%Exo₁、Exo₁/Exo₂和Exo₁/Exo₁之间显著正相关(P<0.05);Mg 与%Exo₁、%Exo₂、%Exo₁、Exo₁/Exo₂和Exo₁/Exo₂和Exo₁/Exo₂、%





Fig.3 Soil organic carbon decomposition temperature at different elevations ($TG-T_{50}$)

TG-T₅₀: SOC 质量减少一半时对应的温度 The temperature at which the SOC mass is halved



图 5 不同海拔土壤低温分解下有机碳/高温分解下有机碳/总分 解有机碳含量

Fig.5 Organic carbon content at different altitudes under soil low-temperature decomposition/organic carbon content at high temperatures under soil decomposition/total organic carbon content under soil decomposition

Exo₂:较高温度分解下有机碳 Organic carbon decomposes at higher temperatures;不同小写字母表示差异显著(P<0.05)





Exo1:较低温度分解下有机碳 Organic carbon decomposes at lower temperatures;Exo1:总分解有机碳 Total decomposed organic carbon; Exo1/Exo1:较低温度分解下有机碳/总有机碳 Organic carbon at lower temperature decomposition/total decomposition of organic carbon



图 6 不同海拔土壤低温分解下有机碳/高温分解下有机碳/总分 解有机碳含量比值

Fig.6 Ratio of organic carbon content at low temperature decomposition in soil at different altitudes/organic carbon content at high temperature decomposition in soil/total decomposed organic carbon content in soil

Exo₂/Exo₁: 较高温度分解下有机碳/总分解有机碳 Organic carbon decomposes at higher temperatures/Total decomposed organic carbon; Exo₁/Exo₂: 较低温度分解下有机碳/较高温度分解下有机碳 Organic carbon decomposes at lower temperatures/Organic carbon decomposes at higher temperatures

进一步采用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)揭示土壤理化性质和盐基离子对热重相关指标的影响(图 8,表 3)。RDA1和 RDA2分别解释了土壤理化性质及盐基离子对 SOC 热稳定性贡献率的 73.48%和 24.72%。Exo₂/Exo₁与 pH、K、Mg、AP、Na 以及 BD 正相关,与 SOM、AN、SWC、TN 以及 CP 负相关; TG-T₅₀与

4 期



图 7 土壤理化性质及盐基离子与热稳定性指标的相关性分析

Fig.7 Analysis of the correlation between soil physicochemical properties and salt-based ions and thermal stability indexes

SWC: 土壤含水率 Soil water content; BD: 容重 Bulk density; CP: 毛管孔隙度 Capillary porosity; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; AN: 氨氮 Ammonia nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; SOM: 有机质含量 Organic matter content; *: P<0.05, **: P<0.01, ***: P<0.001

AP、CP、TN、SWC、Mg、K 正相关,与 pH、BD、Na、SOM、AN 负相关; Exo₂、Exo₁、Exo₁/Exo₂和 Exo₁/Exo₁与 AN、SOM、SWC、TN、CP 正相关,与 AP、Mg、K、pH、BD、Na 负相关。由表 3,各调控因素中解释度最大且 P 值最 小的为 SOM (P<0.05),表明 SOM 是影响土壤热稳定性的主要因素。

Table 3 The explanatory power and significance test results of environmental factors on soil thermal stability indicators							
环境因子 Soil factors	解释度 Explains/%	F	Р	环境因子 Soil factors	解释度 Explains/%	F	Р
有机质 SOM	66.1	64.2	0.002	容重 BD	0.4	0.5	0.606
钠 Na	4.5	4.9	0.01	рН	0.5	0.6	0.562
有效磷 AP	2.3	2.6	0.1	氨氮 AN	0.4	0.5	0.554
镁 Mg	2.2	2.6	0.094	含水率 SWC	0.4	0.5	0.61
钾 K	0.6	0.8	0.486	毛管孔隙度 CP	< 0.1	< 0.1	0.942
全氮 TN	0.9	1.1	0.348				

表 3 环境因子对土壤热稳定性指标的解释量和显著性检验结果

3 讨论

3.1 海拔梯度对土壤理化性质和盐基离子的影响

海拔梯度作为一个重要的生态因子,通过影响土壤温度、pH、孔隙度、有机质含量、水分等环境因子,直接



图 8 土壤理化性质及盐基离子与热稳定性指标的冗余分析 Fig.8 Redundancy analysis of soil physicochemical properties, salt-based ions and thermal stability indexes

或间接地影响植被结构和土壤性质,从而对土壤碳库的积累产生影响。本研究中 SWC 和 SOM 等随着海拔的 升高整体均呈现逐渐上升的变化趋势,pH 和 BD 随海拔上升而降低,SWC、SOM、pH 和 BD 的变化趋势与许多 研究结果相似^[33-35]。中低海拔 SWC 含量较低,高海拔含量较高;BD 整体趋势与 SOM 相似,但是 BD 在 1848 m 含量最大,在 2635 m 含量最小;关于 SWC、BD 和 SOM 研究结果与何文强等^[36]在贺兰山东坡沿海拔梯度研 究的变化规律相同。SOM 在 2664 m 海拔处含量最高,在 1848 m 含量最低,pH 与之相反。表明土壤理化性质 会因海拔梯度差异产生不同结果,究其原因可能有以下四点:①由于海拔高度会导致气候条件发生变化,这些 气候因素对土壤形成和发育具有重要影响^[37];②海拔高度的变化通常伴随着地形和地貌特征的变化,从而影 响土壤理化性质;③不同海拔梯度下的植被类型和覆盖情况也存在显著差异,影响有机质的输入、根系分泌物 输入以及土壤表面的保护层;④海拔梯度的变化会影响水文过程,不同的水文过程会导致土壤水分状况、盐分 迁移和溶解物质输送等方面的不同^[38]。

本研究表明,中低海拔土壤 K、Ca、Mg、Na 离子高于高海拔,这可能与淋溶强度作用有很大的关系^[39],究 其原因可能是由于:①高海拔地区通常降雨较多,同时地势陡峭,易发生雨水冲刷、土壤侵蚀等水文过程^[40]; ②高海拔地区常常受到更强烈的风化和侵蚀作用^[41],导致岩石中的矿物质被分解并释放出来;③高海拔地区 的气候条件和土壤特性可能导致土壤中的有机物质分解速率较低,从而使得土壤中的盐基离子得以积累。这 些过程有助于将土壤中的盐基离子重新分配,从而提高土壤表层盐基离子含量。相对于高海拔,低海拔地区 受风化、侵蚀和沉积等自然因素的影响较大,导致中低海拔土壤 K、Ca、Mg、Na 离子高于高海拔。同时,4 种盐 基离子含量大小表现为 Ca>K>Na>Mg,该研究 K、Na 和 Mg 离子结果与石澎雨等^[42]、姜林等^[43]研究结论相 反,但二者研究均表明,土壤中 Ca 离子占比最大。Ca 与有机物质相互作用形成腐殖酸钙,使有机质得到积 累、土壤结构稳定性增加^[44-47]。张宁等^[48]对腾格里沙漠 3 种土壤有机质和碳酸钙的关系进行研究,结果表 明土壤有机质的分布格局与碳酸钙的分布格局大体相同,土壤碳酸钙含量与土壤有机质含量均呈显著的正相 关关系。适量的土壤 Ca 离子可以促进土壤中有益微生物的生长,抑制土壤中的病原微生物的生长,提高土壤 生物活性和健康状态。

3.2 海拔梯度对土壤热重分析的影响

热重(TG)是一种反映样品在加热循环期间重量变化的技术。其分析可用于评估所研究材料的热稳定性

和成分^[32]。本研究表明,低中海拔土壤有机质质量的温度在 200℃时受热分解速率开始迅速下降,这与 Cafer SAKA^[49]在土耳其橡子壳中 TG 热解分析结果一致。200—700℃出现明显的失重阶梯;高海拔样地温度在 300℃时开始剧烈分解,300—700℃出现明显失重阶梯;各海拔土壤随着温度的升高,受热分解速率显著加快, 热分解剧烈进行均在 700℃结束。

本研究中,在土壤样品热重微分曲线上观察到两个明显的吸热峰,DTG 在<200℃温度下损失的物质是毛 细水和吸湿水,两个吸热峰分别出现在 350℃和 550℃,DTG 曲线上 SOC 吸热反应的特征温度与前人关于土 壤 SOC 分解温度的结论基本一致^[32,50]。随温度升高,低海拔在 20—300℃,300—600℃观察到两个放热峰,分 别代表了在加热过程中腐殖化程度较低的碳水化合物(热易分解的物质)和腐殖化程度较高的芳香族类化合 物(热难分解的物质)的分解和燃烧所引起的变化。中海拔 DTG 曲线在 20—340℃,峰值约在 200℃时变化最 显著,整体呈双峰趋势。高海拔以单峰呈现,DTG 曲线在约 300℃时达到最低谷。与高海拔相比,低海拔 DTG 曲线峰值出现在更高的温度,表明由于植被分布的复杂性和海拔梯度的增加,低海拔中存在更多的耐热成分。

SOC 的热稳定性指土壤在受热条件下,SOC 抵抗分解的能力。SOC 的热稳定性不仅决定于 SOC 的类型和结构,而且与 SOC 和矿物间的结合程度有关。本研究中,随海拔上升,TG-T₅₀的温差呈波动式且变化较小,但仍可以看出中低海拔温度稍高于高海拔,这可能是由于海拔升高,气温、降水量、土壤质地、有机质含量和植被覆盖发生变化,这些差异会影响土壤热传导和热容量,从而影响温度变化速率。沿海拔上升,热易分解有机碳和热难分解有机碳呈现上升趋势,除 2664 m 海拔外,其余海拔热难分解有机碳含量均高于热易分解有机碳,这意味着土壤中的大部分碳质量是由热难分解有机碳构成,这些有机碳在较高温度下才开始失去质量,表明贺兰山西坡土壤热难分解有机碳比较稳定。随海拔梯度升高,本研究中 Exo₁/Exo₁比值逐渐增加,而 Exo₂/Exo₁逐渐减少,表明贺兰山西坡高海拔不稳定或热不稳定的 SOC 较高,低海拔梯度稳定或热稳定的 SOC 较高。

3.3 土壤热稳定性的调控因素

冗余分析结果表明土壤理化性质相比于盐基离子对热分析结果影响更大,土壤热稳定性主要受土壤理化性质中 SOM 含量(贡献率大于 50%)调控。有机碳对土壤物理性质有重要影响,SOM 可以改善土壤结构,增加土壤的稳定性和抗压强度。研究结果显示,SOM 与 CP、TN、TP、AN 呈显著正相关(P<0.05),这一结果与杨军刚等^[51]在古尔班通古特沙漠腹地的研究结果一致,可以推测出贺兰山西坡不同海拔土壤有机质含量越高,其理化性质越低。本研究中 SOM 与 SWC 呈极显著正相关(P<0.001),这与张倩等^[52]在甘肃天祝南泥沟的研究结果相似。SOM 与 BD 和 pH 呈极显著负相关(P<0.001),这与王平等^[53]基于山地土壤带的研究结果相同。SOM 是土壤的主要营养来源之一,可以提供植物生长所需的养分,本研究中 SOM 与 Exo₁、Exo₂、Exo₁、Exo₂和 Exo₁/Exo₁这些热稳定性指标之间呈极显著正相关(P<0.001),表明当热易分解有机碳增加时,热难分解有机碳通常也会增加,反之亦然。此外,本研究发现贺兰山西坡不同海拔土壤中 Mg、Ca 与 SOM 呈显 著负相关(P<0.05),这一结果与刘秉青等^[31]在宁夏盐池的研究结果相反,他们研究结果显示:交换性 Ca²⁺和 Mg²⁺与 SOM 呈现显著正相关,交换性 Ca²⁺和 Mg²⁺会通过与土壤表面吸附或者与阳离子交换来限制 SOM 的可用性。综上表明,海拔梯度通过影响土壤理化性质和盐基离子进一步影响有机碳热稳定性。

4 结论

本研究结果表明,海拔梯度对贺兰山西坡土壤理化性质有显著影响,随海拔升高,理化性质除 BD、pH 和 AP 外均呈现递增趋势,而盐基离子更多集中在低海拔区域。通过对土壤热重分析发现,TG 曲线质量损失速 率随海拔梯度增加,中低海拔 DTG 曲线呈双峰趋势,高海拔呈单峰趋势。TG-T_{s0}在中低海拔温度较高。随海 拔上升,Exo₁/Exo₁升高,Exo₂/Exo₁降低,表明贺兰山西坡低海拔土壤热稳定性有机碳较高。低海拔地区的 DTG 曲线峰值温度较高且含有更多耐热成分。相关性分析显示,与盐基离子相比,理化性质和土壤有机碳热 稳定性相关性更显著。SOM 在调控土壤有机碳热稳定性中占据主导地位。研究结果对理解环境条件变化下

贺兰山西坡不同海拔土壤有机碳热稳定性具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. Nature, 2015, 528(7580): 60-68.
- [2] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, Plante A F, Six J. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(2): 357-366.
- [3] Wang M M, Guo X W, Zhang S, Xiao L J, Mishra U, Yang Y H, Zhu B, Wang G C, Mao X L, Qian T, Jiang T, Shi Z, Luo Z K. Global soil profiles indicate depth-dependent soil carbon losses under a warmer climate. Nature Communications, 2022, 13: 5514.
- [4] Zhang Y, Gao Y, Zhang Y, Huang D D, Li X J, McLaughlin N, Zhang X P, Chen X W, Zhang S X, Gregorich E. Linking Rock-Eval parameters to soil heterotrophic respiration and microbial residues in a black soil. Soil Biology and Biochemistry. 2023: 108939.
- [5] 唐朋辉, 党坤良, 王连贺, 马俊. 秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度影响因素. 生态学报, 2016, 36(4): 1030-1039.
- [6] Mohd Z, Zhou W J, Wu C S, Lin Y, Parappurath Abdul A, Song Q H, Liu Y T, Zhang Y P, Lu Z Y, Sha L Q. Soil heterotrophic respiration in response to rising temperature and moisture along an altitudinal gradient in a subtropical forest ecosystem, Southwest China. Science of The Total Environment, 2022, 816: 151643.
- [7] 张延,高燕,张旸, Gregorich Edward,李秀军,陈学文,张士秀,梁爱珍. Rock-Eval 热分解法及其在土壤有机碳研究中的应用. 土壤与作物, 2022, 11(3): 282-289.
- [8] 赵龙华,刘小粉,王雅婧,任图生.基于热分析技术的土壤有机质含量和稳定性分析.农业工程学报,2016,32(10):105-114.
- [9] 朱玮玮. 广西环江喀斯特地区土地利用变化背景下土壤有机质热稳定性分析[D]. 北京:中国地质大学, 2019.
- [10] 赵世翔. 热解温度对苹果枝条生物质炭理化性质及其环境效应的影响[D]. 陕西:西北农林科技大学, 2017.
- [11] Wu M Y, Pang D B, Chen L, Li X B, Liu B, Li J Y, Wang J F, Ma L L. Chemical composition of soil organic carbon and aggregate stability along an elevation gradient in Helan Mountains, northwest China. Ecological Indicators, 2021, 131: 108228.
- [12] Wu M Y, Chen L, Ma J P, Zhang Y Q, Li X B, Pang D B. Aggregate-associated carbon contributes to soil organic carbon accumulation along the elevation gradient of Helan Mountains. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 178: 108926.
- [13] 张宇, 刘耘华, 滕俐闯, 白崇皓, 盛建东. 灌丛化对干旱区草地土壤有机碳化学结构和热稳定性的影响. 土壤, 2022, 54(6): 1138-1148.
- [14] Zhang Z S, Wu H B, Zhao W W, Jiang S, Lei X, Guan Q, Wu H T. Changes in molecular composition, diversity, and network complexity of soil organic carbon along the elevation in Changbai Mountain, Northeast China. Geoderma, 2024, 443: 116842.
- [15] Zhang Z S, Jiang S, Zhao W W, Guan Q, Wu H T. Which is more important in stabilizing soil organic carbon in mountain ecosystems: molecular features, mineral protection, soil nutrients, or elevation? Catena, 2023, 232: 107395.
- [16] 康成芳,宫渊波,车明轩,许蔓菁,吕宸,刘韩.川西高寒山地灌丛草甸不同海拔土壤有机碳矿化的季节动态. 生态学报, 2020, 40(4): 1367-1375.
- [17] 柴曦,李英年,段呈,张涛,宗宁,石培礼,何永涛,张宪洲.青藏高原高寒灌丛草甸和草原化草甸 CO₂通量动态及其限制因子. 植物生态学报,2018,42(1):6-19.
- [18] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 龚兰兰. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局. 生态学报, 2020, 40(2): 629-639.
- [19] Berryman E M, Marshall J D, Kavanagh K. Decoupling litter respiration from whole-soil respiration along an elevation gradient in a Rocky Mountain mixed-conifer forest. Canadian Journal of Forest Research, 2014, 44(5): 432-440.
- [20] 赵盼盼,周嘉聪,林开森,林伟盛,袁萍,曾晓敏,苏莹,徐建国,陈岳民,杨玉盛.不同海拔对福建戴云山黄山松林土壤微生物生物量 和土壤酶活性的影响.生态学报,2019,39(8):2676-2686.
- [21] 孟苗婧,张金池,郭晓平,吴家森,赵有朋,叶立新,刘胜龙.海拔变化对黄山松阔叶混交林土壤有机碳组分的影响.南京林业大学学报 (自然科学版),2018,42(6):106-112.
- [22] 加鹏华,李春雨,尹海魁,许皞.太行山区不同海拔梯度土壤有机碳库及组分变化特征.林业与生态科学, 2021, 36(3): 269-276.
- [23] 祖奎玲, 王志恒. 山地物种海拔分布对气候变化响应的研究进展. 生物多样性, 2022, 30(5): 123-137.
- [24] Wu X, Wang S, Cheng H, Yang Y. Variation of soil organic matter with particle size in the wind erosion region of northern China. Catena, 2024, 241: 108025.
- [25] 陈乐,张福平,司建华,冯起,魏永芬.贺兰山地区植被固碳功能空间分异特征及其驱动因素.生态学报,2023,43(24):10250-10262.
- [26] Ma T, Hu Y, Wang J, Beckline M, Pang D B, Chen L, Ni X L, Li X B. A novel vegetation index approach using sentinel-2 data and random forest algorithm for estimating forest stock volume in the Helan mountains, Ningxia, China. Remote Sensing, 2023, 15(7): 1853.
- [27] Hou H, Yan P X, Xie Q M, Zhao H L, Zhang H Y, Lv Y Z, Pang D B, Hu Y, Li J Y, Wang F, Ni X L. Distribution Characteristics and Influence Factors of Rhizosphere Glomalin-Related Soil Protein in Three Vegetation Types of Helan Mountain, China. Forests, 2022, 13 (12): 2092.
- [28] 李佳婧,梁咏亮,李静尧,李小伟,杨君珑.基于叶片功能性状的贺兰山西坡植物生态策略分析. 生态环境学报, 2024, 33(1): 45-53.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社. 2000.
- [30] 侯晖,颜培轩,谢沁宓,赵宏亮,庞丹波,陈林,李学斌,胡杨,梁咏亮,倪细炉.贺兰山蒙古扁桃灌丛根际土壤 AM 真菌群落多样性特征研究. 生态环境学报, 2023, 32(5): 857-865.

- [31] Liu B Q, Gao R L, Ndzana G M, An H, Huang J Y, Liu R T, Du L T, Kamran M, Xue B. Nutrient addition affects stability of soil organic matter and aggregate by altering chemical composition and exchangeable cations in desert steppe in northern China. Land Degradation & Development, 2023, 34(5): 1430-1446.
- [32] Plante A F, Fernández J M, Haddix M L, Steinweg J M, Conant R T. Biological, chemical and thermal indices of soil organic matter stability in four grassland soils. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(5): 1051-1058.
- [33] 庞丹波,吴梦瑶,吴旭东,倪细炉,董立国,陈林,李学斌,胡杨.贺兰山东坡不同海拔梯度土壤酶化学计量特征.生态学报,2023,43 (19):7950-7962.
- [34] 马进鹏, 庞丹波, 陈林, 万红云, 陈高路, 李学斌. 贺兰山不同海拔植被下土壤微生物群落结构特征. 生态学报, 2022, 42(2): 667-676.
- [35] 马进鹏, 庞丹波, 陈林, 万红云, 陈高路, 李学斌. 贺兰山东坡不同海拔典型植被带土壤微生物磷酸脂肪酸分析. 生态学报, 2022, 42 (12): 5045-5058.
- [36] 何文强, 陈林, 庞丹波, 曹萌豪, 张雅琪, 李学斌. 贺兰山东坡不同植被类型土壤层水文效应. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(2): 102-113.
- [37] 张仲胜,李敏,宋晓林,薛振山,吕宪国,姜明,武海涛,王雪宏.气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展.土壤 学报,2018,55(2):273-282.
- [38] 刘瑞亮, 庞丹波, 何文强, 李学斌, 马进鹏, 杨勇, 陈林. 贺兰山西坡不同混交方式云杉林土壤物理性质与水文特征研究. 甘肃农业大学 学报, 2022, 57(5): 154-163.
- [39] 张玉革,梁文举,姜勇.不同利用方式下潮棕壤交换性钙镁的剖面分布.应用生态学报,2008,(4):813-818.
- [40] 赖瑶. 基于土壤水分动态变化对高寒山区降雨及蒸散发的估算[D]. 甘肃: 兰州大学, 2023.
- [41] 陈立萍. 黑河流域关键带表层风化强度及其影响因素研究[D]. 甘肃: 兰州大学, 2019.
- [42] 石澎雨,田晓萍,石晓萍,侯玉梅,车宗伟.祁连山国家公园祁丰林场四种典型植被类型土壤盐基离子含量变化特征.农业与技术, 2023,43(20):77-81.
- [43] 姜林, 耿增超, 李珊珊, 佘雕, 何绪生, 张强, 梁策, 刘贤德, 敬文茂, 王顺利. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分 布. 生态学报, 2012, 32(11): 3368-3377.
- [44] Peele T C. The effect of calcium on the erodibility of soils. Soil Science Society of America Journal, 1937, 1(C): 47-58.
- [45] Peterson J B. Calcium linkage, a mechanism in soil granulation. Cabidigital Library, 1948: 29-34.
- [46] Muneer M, Oades J M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. I: Laboratory studies with glucose ¹⁴C, CaCO₃ and CaSO₄-2H₂O. Soil Research, 1989, 27(2): 389-399.
- [47] Muneer M, Oades J M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. II. Field studies with ¹⁴C-labeled straw, CaCO₃ and CaSO₄-2H₂O. Soil Research, 1989, 27(2): 401-409.
- [48] 张宁, 何兴东, 邬畏. 腾格里沙漠 3 种土壤有机质和碳酸钙特征. 生态学报, 2009, 29(8): 4094-4101.
- [49] Saka C. BET, TG-DTG, FT-IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with ZnCl₂. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012, 95: 21-24.
- [50] Panwar N L, Pawar A. Influence of activation conditions on the physicochemical properties of activated biochar: A review. Biomass Conversion and Biorefinery, 2020: 1-23.
- [51] 杨军刚, 张玲卫, 郭星, 陆永兴, 郭浩, 张元明, 周晓兵. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮下土壤有机碳垂直分布特征及影响因素. 生态 学报, 2024, 44(7): 2946-2954.
- [52] 张倩,姚宝辉,王缠,康宇坤,郭怀亮,杨晶,杨莹博,苏军虎.不同坡向高寒草甸土壤理化特性和微生物数量特征.生态学报,2019,39
 (9): 3167-3174.
- [53] 王平,俞筱押,丁智强,谭小爱,华红莲,李玉辉.海拔梯度和原生林转换对北热带山地土壤有机碳密度的影响.土壤通报,2024,55 (2):391-400.