

DOI: 10.20103/j.stxb.202404100781

李冰, 庞丹波, 陈林, 高锋, 吴梦瑶, 孙浩楠, 李学斌. 贺兰山不同海拔土壤团聚体有机碳稳定性. 生态学报, 2024, 44(24): 11241-11253.

Li B, Pang D B, Chen L, Gao F, Wu M Y, Sun H N, Li X B. Stability of organic carbon in soil aggregates at different elevations in Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11241-11253.

贺兰山不同海拔土壤团聚体有机碳稳定性

李冰^{1,2,3}, 庞丹波^{1,2,3}, 陈林^{1,2,3}, 高锋^{1,2,3}, 吴梦瑶^{2,3,4}, 孙浩楠^{1,2,3}, 李学斌^{1,2,3,*}

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

3 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

4 宁夏大学林业和草业学院, 银川 750021

摘要: 贺兰山是我国干旱半干旱地区的典型森林生态系统, 为了解土壤团聚体稳定性及有机碳组分变化特征随海拔变化的机制, 选择贺兰山 1300—2700 m 范围内的 7 种典型植被类型, 分析不同海拔土壤理化性质、团聚体分布特征及其稳定性、不同粒级团聚体有机碳组分的变化机制, 通过相关性热图分析和冗余分析, 揭示影响团聚体有机碳变化的驱动因素。结果表明: 随着海拔的上升贺兰山水稳性团聚体主要以大团聚体为主 (>0.25 mm), 大团聚体的含量和团聚体稳定性随海拔上升呈现先增后减的趋势, 2249 m 的山杨×油松混交处达到最大值。不同海拔各粒级团聚体土壤有机碳含量随着海拔上升逐渐增加, 总体上大团聚体内有机碳高于微团聚体内有机碳含量。团聚体有机碳氧化组分各粒级中有机碳含量随着海拔上升逐渐增多, 有机碳含量主要储藏在团聚体内, 在 2617 m 的高山草甸处达到最大值; 中高海拔 (1968—2617 m) 有机碳氧化稳定性显著低于低海拔 (1380—1650 m) 地区, 且大团聚体比微团聚体和粉黏粒中的有机碳容易氧化分解。相关分析表明, 土壤有机碳、海拔和全氮是影响有机碳氧化稳定性组分的主要影响因子, 各组分因子之间相互制约。冗余分析表明, 土壤理化性质及团聚体稳定性系数对有机碳氧化组分的贡献率为 62.25% 和 21.60%。结果揭示了贺兰山不同海拔团聚体稳定性及有机碳组分特征的影响因素, 对深入探讨贺兰山有机碳的储存具有重要意义。

关键词: 贺兰山; 海拔梯度; 团聚体; 有机碳氧化组分

Stability of organic carbon in soil aggregates at different elevations in Helan Mountain

LI Bing^{1,2,3}, PANG Danbo^{1,2,3}, CHEN Lin^{1,2,3}, GAO Feng^{1,2,3}, WU Mengyao^{2,3,4}, SUN Haonan^{1,2,3}, LI Xuebin^{1,2,3,*}

1 College of Ecological, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory for Restory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

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

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

Abstract: Helan Mountain is a typical forest ecosystem in the arid and semi-arid regions of China. In order to understand the mechanism of different altitudes on the stability of soil agglomerates and the change characteristics of organic carbon fractions with the change of altitude, the present study selected seven typical vegetation types within the range of 1300—2700 m in the Helan Mountain, and analyzed the physicochemical properties of soils, the characteristics of the distribution of the agglomerates and its stability in different elevations, and the mechanism of the change of organic carbon fractions of different grain sizes. We analyzed the physical and chemical properties of soils at different altitudes, the distribution

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32371964, 32360423, 32201631); 银川市重点研发计划项目 (2023SFZD04)

收稿日期: 2024-04-10; **网络出版日期:** 2024-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn

characteristics of aggregates and their stability, and the mechanism of changes in organic carbon fractions in aggregates of different grain sizes. The study also revealed the driving factors affecting the changes in organic carbon in aggregates through correlation heat map analysis and redundancy analysis. The results showed that the water-stable agglomerates in the Helan Mountains mainly consisted of large agglomerates (>0.25 mm), and the content of large agglomerates and the stability of the agglomerates showed an increasing and then decreasing trend with the rise of altitude, and reached maximum at the poplar×turquoise hybrid at 2249 m. The results also showed that the organic carbon content and the stability of the agglomerates at different grain sizes at different altitudes showed an increasing and then decreasing trend with the rise of altitude. The soil organic carbon content of aggregates at different elevations increased gradually with the rise of elevation, and in general, the organic carbon in large aggregates was higher than that in micro-aggregates. The organic carbon oxidized fraction of agglomerates increased gradually with the rise of altitude, and the organic carbon content was mainly stored in large agglomerates, which reached the maximum value at the alpine meadow at 2617 m. The oxidative stability of organic carbon at middle and high altitudes (1968—2617 m) was significantly lower than that at low altitudes (1380—1650 m), and the organic carbon in large aggregates was easier to be oxidized and decomposed than that in micro-agglomerates and powdery clay particles. Organic carbon in large aggregates was easier to oxidize and decompose than that in microaggregates and powdery clay particles. Correlation analysis showed that soil organic carbon (SOC)、elevation and total nitrogen (TN) were the main factors affecting the oxidative stability of organic carbon, and the factors of each component constrained each other. The principal component analysis showed that the soil physicochemical properties and aggregate stability coefficients contributed 62.25% and 21.60% to the organic carbon oxidation components. The results of this study has revealed the influencing factors on the stability of aggregates and the characteristics of organic carbon fractions at different altitudes in Helan Mountain, which is of great significance for the in-depth discussion of the storage of organic carbon and the stability of mountain forest ecosystems in Helan Mountain.

Key Words: Helan Mountain; elevation gradient; aggregate; organic carbon oxidizing components

土壤作为陆地生态系统中最大的有机碳库和森林植被生长的基础,其表层有机碳含量约占总有机碳含量的 60%以上,因此,土壤有机碳储量的轻微变化就会导致大气中 CO_2 含量的显著改变,进而影响气候变化。森林是陆地生态系统中最大的碳库,在全球范围内,森林生态系统土壤碳库占陆地生态系统土壤碳库的 70%以上,是生态系统碳素的主要组成部分^[1],因此,森林土壤有机碳含量的动态变化对陆地生态系统碳储量以及全球碳平衡产生显著影响。山地森林生态系统又是全球碳循环的关键区域之一和全球陆地生态系统的组成部分,其中储藏了大量的有机碳,包含着植物生长所需的多种营养元素,是土壤肥力的物质基础,对土壤的物理、化学及生物性质产生一定的影响^[2],对维持生物多样性和生态系统平衡至关重要。

土壤团聚体是矿物颗粒和有机-无机复合体通过重排、絮凝和胶结作用所形成的不同大小的多孔结构体^[3]。团聚体是构成土壤结构的基础物质,它的组成对土壤抗腐蚀性能力和提高土壤质量具有重要作用,团聚体质量的好坏有利于植被的生长和恢复;土壤有机碳也可作为团聚体的胶结物质,促进团聚体的形成和稳定,其含量越高,越有利于土壤团聚体稳定性的提升^[4]。土壤团聚体也能够有效保护有机碳免受微生物分解,其结构对土壤有机质的稳定和养分循环等具有重要意义,两者相互关联,密不可分。由于不同林分类型会对土壤团聚体及其有机碳的分布产生影响^[5],不同粒径的团聚体对有机碳的保护机制和有机碳在不同粒径土壤团聚体中的稳定程度也有差异^[6]。

土壤有机碳是通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合体,具有不同程度的分解能力和稳定性^[7]。根据土壤有机碳氧化的难易程度,可将有机碳分为易氧化有机碳和难氧化有机碳两种类型,其中易氧化有机碳具有不稳定、易分解和矿化等特征,难氧化有机碳则有助于土壤结构稳定和有机碳的储存^[8-9]。Chan 等^[10]在 Walkley 和 Black 的基础上研究发现, F1(高氧化活性有机碳)和 F2(中氧化活性有机碳)与养分含量的高低与大团聚体的形成有关,它们对于维持土壤生产力和养分循环具有重要影响。Guareschi 等^[11]研究发现 F3(低氧化活性有机碳)和 F4(难氧化有机碳)组分与化学稳定性更强、分子量更高

的化合物相关,这些化合物来源于土壤有机质的分解和腐质化。孙彩丽等^[12]在黄土高原过渡带与毛乌素沙地研究发现易氧化有机碳组分之间相互影响,存在动态平衡。

山地森林生态系统的植被分布、气候变化以及土壤理化性质的变化都会导致土壤团聚体稳定性发生相应的变化。贺兰山是我国干旱半干旱地区森林生态系统的典型性代表,沿着海拔梯度开展土壤团聚体稳定性及有机碳组分特征的研究,可以深入了解有机碳的封存和转化,对于评估干旱半干旱山地森林生态系统有机碳库具有重要意义。因此,本研究选择贺兰山不同海拔梯度的土壤为研究对象,探究土壤团聚体稳定性及有机碳组分特征的影响因子,拟解决以下科学问题:(1)贺兰山土壤团聚体稳定性及团聚体有机碳含量沿海拔梯度如何变化?(2)土壤有机碳组分及其稳定性沿海拔升高是如何变化的?(3)驱动土壤团聚体有机碳组分的变化因素有哪些?鉴于此,本研究选择贺兰山不同海拔土壤为研究对象,探究土壤团聚体和有机碳组分稳定性沿海拔梯度的变化规律,为深入研究贺兰山土壤有机碳的稳定机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贺兰山东坡(105°49′—106°41′N,38°19′—39°22′E),该地区属于典型的大陆性气候,海拔约1300—3500 m,年均气温-0.8℃,年均降水量420 mm,年蒸发量约为2000 mm。山体主脉呈南北走向,保护区的植被类型主要为耐干旱性植物。随着海拔升高,将贺兰山划分为低海拔样地(1380—1650 m),中海拔样地(1968—2249 m)以及高海拔样地(2438—2617 m),对应的土壤垂直分布自下而上依次为:灰漠土,棕钙土,灰褐土,高山、亚高山草甸土。

1.2 样品采集与处理

在贺兰山自然保护区内,沿着海拔上升选择7种典型植被类型:荒漠草原(HM 1380 m)、蒙古扁桃灌丛(MG 1650 m)、灰榆林(HY 1968 m)、油松林(YS 2139 m)、油松×山杨混交林(HJ 2249 m)、青海云杉林(QH 2438 m)和亚高山草甸(CD 2617 m)作为实验样地。在每个实验样地选择随机设计3个具有典型性代表的采样点进行采样,采集表层0—20 cm的土样,荒漠草原样方为1 m×1 m,蒙古扁桃灌木丛样方为5 m×5 m,乔木林样方为20 m×20 m,草甸样方为1 m×1 m,不同的实验样地之间相隔20 m,拣出土样中的石砾和去除表面枯落物,将采集的土壤样品带回实验室进行处理。

1.3 样品测定

1.3.1 土壤理化性质测定

混合土样自然风干后过2 mm筛进行理化性质的测定。土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化外加热法,全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法,全磷含量测定采用钼锑抗比色法,土壤容重用环刀法测定,土壤pH采用电位法测定^[13]。

1.3.2 土壤团聚体的测定

将采集的原状土壤样品装入铝盒中带回实验室,除去石块和粗根,沿土壤自然结构面轻掰为直径10 mm的土块,自然风干后过10 mm筛。团聚体筛分采用干湿筛结合法,将风干土称取500 g依次通过2 mm,0.25 mm,0.053 mm的3个套筛进行筛分,将土壤筛分为>2 mm,2—0.25 mm,0.25—0.053 mm,<0.053 mm四个不同粒径的土壤团聚体,对筛分后的团聚体进行称重,将称重后的团聚体配比为100 g,放入2 mm,0.25 mm以及0.053 mm的套筛中震荡30 min后,将筛子上的团聚体洗出,得到四个不同粒级的水稳性团聚体,自然风干后称重装袋备用,计算各级团聚体的百分含量^[14]。

1.3.3 土壤团聚体有机碳氧化稳定性组分测定

采用改进的Walkley-Black氧化法测定SOC组分^[10],称取不同粒径的风干土样放入锥形瓶底部。加入K₂Cr₂O₇溶液10 ml,使其与土样混合均匀,然后分别加入5、10、20 mL浓硫酸,对应的浓硫酸浓度分别为6、9、12 mol/L,放置30 min后,加入60 mL蒸馏水和3—5滴邻菲罗啉指示剂,用FeSO₄溶液进行滴定,溶液由橙

红变绿,再经灰绿色变为砖红色后记下滴定数值,同时进行两份空白标定试验,得到四个不同组分的有机碳含量,高氧化活性有机碳(F1)=6 mol/L时测得的有机碳含量;中氧化活性有机碳(F2)=9mol/L时测得的有机碳含量-6mol/L时测得的有机碳含量;低氧化活性有机碳(F3)=12mol/L时测得的有机碳含量-9mol/L时测得的有机碳含量;难氧化活性有机碳(F4)=TOC(总有机碳含量)-12 mol/L时测得的有机碳含量;有机碳稳定系数(SI)=(F3+F4)/(F1+F2)。

1.4 数据处理与分析

土壤团聚体平均重量直径(MWD)

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

土壤团聚体几何平均直径(GMD)

$$GMD = \exp\left[\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i\right] \quad (2)$$

式中, X_i 为*i*粒径大小土壤团聚体的平均直径(mm), W_i 为*i*粒径大小土壤团聚体的质量(%)。

土壤团聚体分形维数(*D*)

$$\log_{10}\left[\frac{M(r < X_i)}{M_T}\right] = (3 - D) \log\left(\frac{X_i}{X_{\max}}\right) \quad (3)$$

式中, $M(r < X_i)$ 为粒径小于 X_i 的团聚体重量, M_T 为团聚体的总质量, X_{\max} 为团聚体的最大直径。

本研究中对所有数据选择单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小差异性显著(LSD)进行多重比较,采用Excel对数据进行整理与前处理,SPSS 26.0对数据进行统计分析,Origin 2024进行绘图,Canoco 5.0进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤理化特征

由表1可知,不同海拔梯度下土壤理化性质存在显著差异,土壤全氮含量的变化范围在1.20—5.89 g/kg之间,土壤全氮含量随着海拔的升高逐渐增加;全磷和容重呈现波动趋势,在2438 m的青海云杉处最高;土壤有机碳和pH整体呈现先降低后升高趋势,在2249 m的油松×山杨混交处含量最高,在海拔1380—2438 m之间呈现稳步增加趋势,pH值在7.56—8.29之间,表明土壤样品呈弱碱性。土壤全氮、有机碳、容重、pH随着海拔梯度升高存在显著性差异($P < 0.05$)。

表1 不同海拔土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties at different altitudes

样地 Sample site	海拔 Elevation/m	容重 BD/(g/cm ³)	pH	有机碳 SOC/(g/kg)	全氮 TN/(g/kg)	全磷 TP/(g/kg)
HM	1380	1.15±0.05a	8.29±0.13a	8.56±0.73d	1.20±0.14d	0.99±0.05ab
MG	1650	1.26±0.07b	8.23±0.03a	16.61±1.30d	2.29±0.12c	0.93±0.06b
HY	1968	1.13±0.03b	8.09±0.03ab	43.47±2.57c	3.50±0.63b	1.13±0.19ab
YS	2139	0.81±0.03c	7.79±0.12bc	72.11±3.95b	3.69±0.13b	1.09±0.17ab
HJ	2249	0.88±0.09c	7.83±0.09bc	88.59±3.00a	3.94±0.14b	1.22±1.14ab
QH	2438	0.85±0.08c	7.56±0.15c	77.87±1.59b	4.33±0.23b	1.40±0.07a
CD	2617	0.89±0.01c	7.66±0.06c	76.96±3.19b	5.89±0.11a	1.13±0.07ab

HM:荒漠草原 Desert steppe;MG:蒙古扁桃灌丛 Amygdalus mogolica bush;HY:灰榆林 Ulmus glaucescens stand;YS:油松林 Pinus tabuliformis stand;HJ:油松×山杨混交林 Mixed forest of pinus tabuliformis and aspen;QH:青海云杉林 Picea crassifolia stand;CD:高山草甸 Alpine meadow;BD:容重 Bulk density; pH:酸碱度 Potential of hydrogen; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorous;表中数据均为平均值±标准差,不同小写字母表示不同海拔之间存在显著差异($P < 0.05$)

2.2 不同海拔土壤团聚体粒径分布及其稳定性

由表 2 可知,不同海拔下,各粒级水稳性团聚体中均以大团聚体为主,其中大团聚体(>0.25 mm)的含量占比 50%以上,沿着海拔梯度升高,呈现先增后减的趋势,在海拔 2249 m 处达到最大,显著高于其他海拔,低中海拔样地(1380—2249 m)的水稳性团聚体主要以大团聚体为主,高海拔地区(>2249 m)主要以微团聚体(0.25—0.053 mm)为主,土壤黏粉粒(<0.053 mm)含量随着海拔升高逐渐减小,海拔 2438 m 除外。不同海拔大团聚体的比例显著高于黏粉粒。

表 2 不同海拔土壤团聚体粒径占比

Table 2 Particle size ratio of soil aggregates at different elevations

样地 Sample site	海拔 Elevation/m	不同粒径团聚体的比例 Proportion of aggregates at different sizes/%			
		>2 mm	2—0.25 mm	0.25—0.053 mm	<0.053 mm
HM	1380	18.31	44.17	22.24	15.28
MG	1650	28.78	36.54	20.90	13.79
HY	1968	25.07	33.96	30.56	10.41
YS	2139	29.22	35.03	27.03	8.72
HJ	2249	37.19	30.32	25.53	6.96
QH	2438	16.90	29.00	43.36	10.74
CD	2617	24.53	31.19	38.49	5.79

土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)的变化范围在 1.41—2.61、0.42—0.97、2.36—2.56 mm 之间。由图 1 可知,贺兰山不同海拔土壤团聚体 MWD 和 GMD 随海拔升高的变化

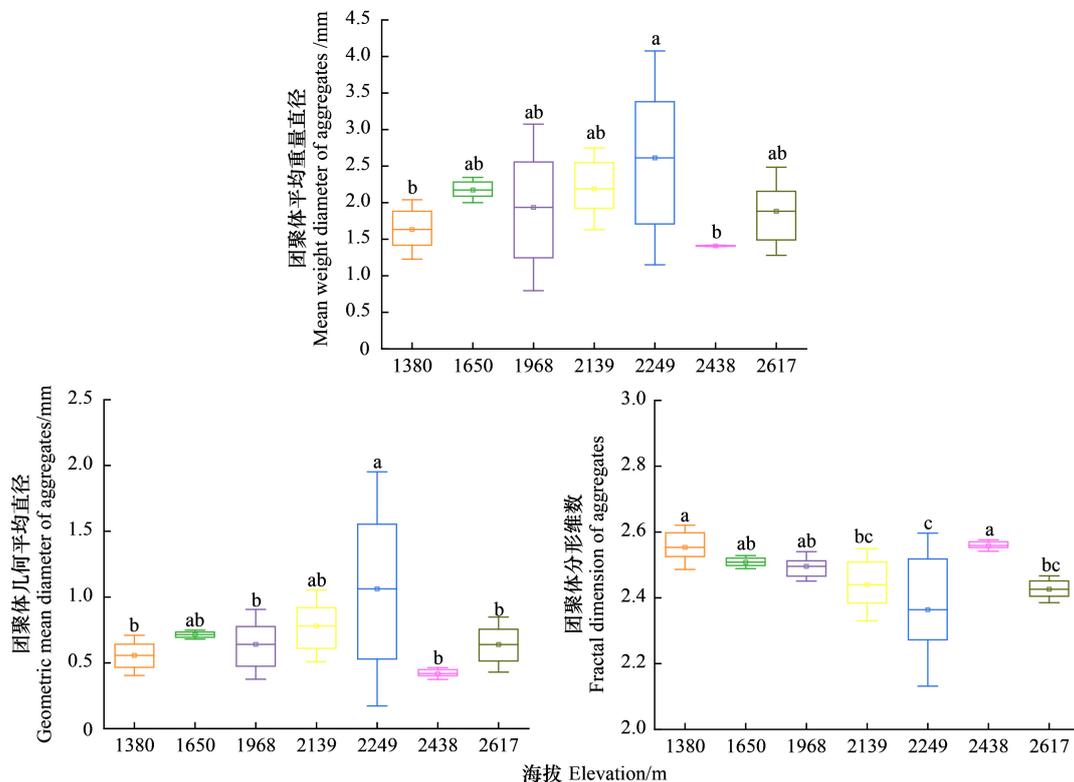


图 1 不同海拔土壤团聚体稳定性

Fig.1 Stability of soil aggregates at different altitudes

不同小写字母代表不同海拔土壤团聚体稳定性有显著差异($P<0.05$)

趋势相同,均呈现先增后减的趋势,在 2249 m 处达到最大值,分别为 2.61、1.06 mm,在 2438 m 处达到最小值,分别为 1.41、0.42 mm,2249 m 处土壤团聚体 MWD 和 GMD 值显著高于其他海拔 ($P<0.05$);而 D 的变化趋势与 MWD 和 GMD 相反。

2.3 不同海拔土壤团聚体有机碳氧化稳定性组分

2.3.1 不同海拔团聚体内土壤有机碳含量

土壤有机碳含量在团聚体组分中的分布随海拔升高而变化(图 2),在 1380 m 处的大团聚体中的有机碳含量最低,其余 6 种植被类型的不同粒径土壤有机碳的含量在粉黏粒中最少。随着海拔梯度上升,不同粒径团聚体内土壤有机碳含量随着海拔的上升而增大,在 1380 m 处的有机碳含量最低,2617 m 处的有机碳含量达到高,总体上大团聚体内有机碳含量高于微团聚体内有机碳,它们在不同海拔植被带之间差异性显著 ($P<0.001$)。

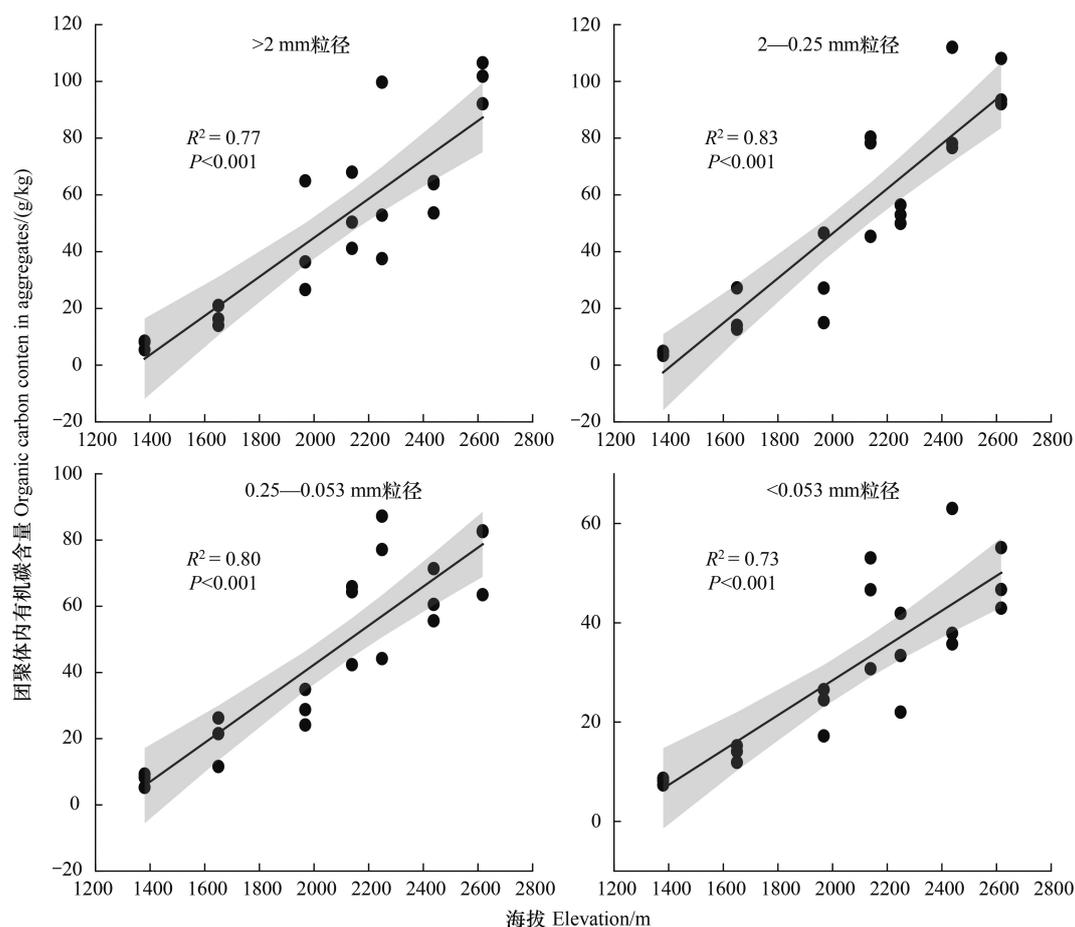


图 2 不同海拔团聚体内有机碳含量

Fig.2 Organic carbon content at different altitudes

图中阴影部分代表 95% 的置信带区间

2.3.2 不同海拔土壤团聚体有机碳氧化稳定性组分

由图 3 可知,沿着海拔梯度上升,有机碳氧化稳定性组分的整体变化趋势为 $F1>F2>F4>F3$,其中 $F1$ 组分占总有机碳含量 (TOC) 的比例最大(图 3)。各粒级水稳性团聚体有机碳氧化组分含量随着海拔上升逐渐增大,且在中高海拔地区显著大于低海拔地区。 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 和 $F4$ 四个组分中有机碳含量主要储藏在大团聚体内 (>0.25 mm),在 2617 m 处大团聚体中的易氧化有机碳含量最多。不同海拔团聚体相同粒径 $F1$ 、 $F2$ 和 $F4$ 组分中存在极显著性差异 ($P<0.01$), $F3$ 组分中除了大团聚体 (>0.25 mm) 不存在显著性差异,微团聚体 (0.25—0.053 mm) 和粉黏粒 (<0.053 mm) 中存在显著差异 ($P<0.05$)。

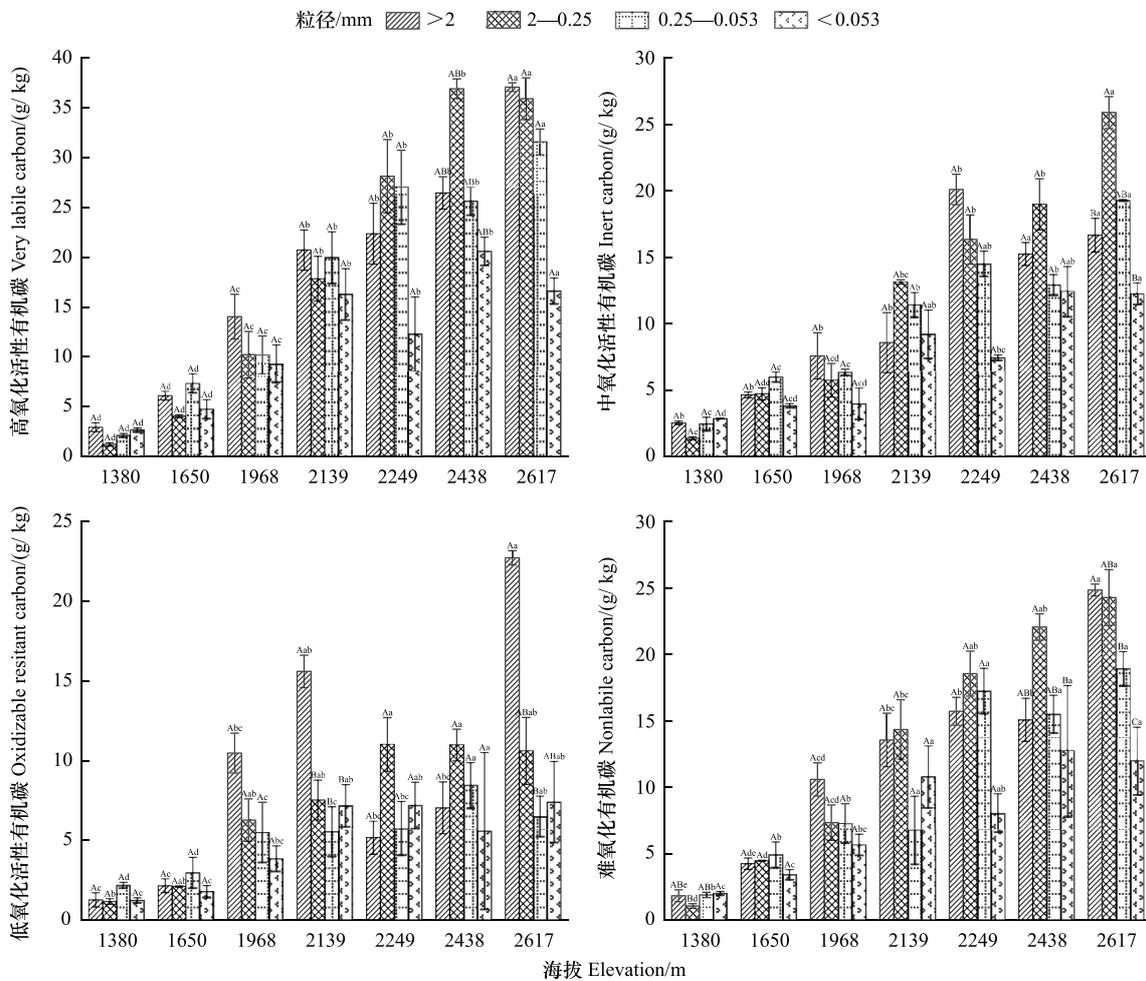


图3 不同海拔团聚体有机碳氧化稳定性组分

Fig.3 Oxidation stability components of organic carbon in aggregates at different altitudes

2.3.3 不同海拔土壤团聚体有机碳稳定性系数

贺兰山不同海拔各粒级有机碳氧化稳定系数的变化范围分别在 0.51—0.99、0.56—1.09、0.49—0.93 和 0.60—0.77 之间(图 4),随着海拔升高有机碳氧化稳定性小于低中海拔地区,且大团聚体比微团聚体和粉黏粒的有机碳容易氧化分解。除低海拔 1380 m 和 1650 m 外,其余 5 个海拔大团聚体的氧化稳定性系数高于微团聚体和粉黏粒,不同海拔各粒径团聚体有机碳稳定性系数之间差异不显著($P>0.05$)。

2.4 土壤团聚体稳定性及理化性质对有机碳氧化组分的影响

对贺兰山不同海拔土壤团聚体有机碳氧化组分、稳定性系数及稳定性与土壤理化性质进行分析(图 5),海拔和 SOC 与 TN、F1、F2、F4 组分之间存在极显著正相关性($P<0.01$),TN 与 F3 组分之间存在显著性正相关性($P<0.05$);F1、F2、F3 组分与 F4 组分之间存在极显著正相关性($P<0.01$);土壤 pH 与 TN、SOC、F1、F2、F4 组分之间存在极显著负相关($P<0.01$),与 TP 之间存在显著负相关性($P<0.05$)。

进一步采用冗余分析探明团聚体稳定性指标、土壤理化因子对有机碳氧化稳定性组分及有机碳氧化稳定性系数的影响因子。冗余分析结果表明(图 6、表 3),SOC、海拔、TN、TP 与有机碳氧化各组分之间存在显著正相关关系,GMD、MWD 与 F1、F2 组分之间存在显著正相关,与 F3、F4、SI 组分之间存在显著负相关关系,各理化指标对土壤有机碳氧化组分和稳定性系数的贡献率为 SOC>海拔>pH>TN>BD>TP>GMD>D>MWD;RDA-1 和 RDA-2 表示了土壤理化性质及团聚体稳定性系数对有机碳氧化组分的贡献率,分别为 62.25%和 21.60%。

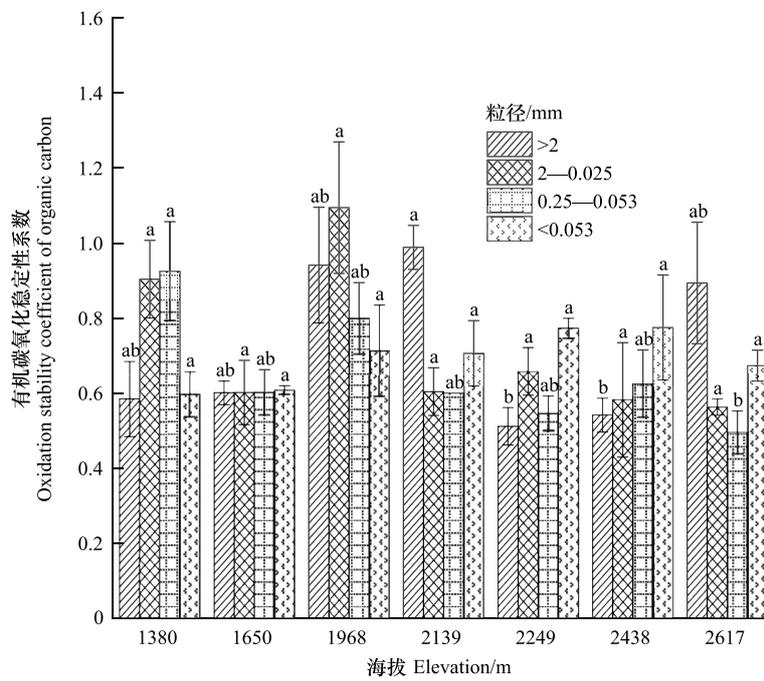


图 4 不同海拔团聚体有机碳氧化稳定性系数

Fig.4 Oxidation stability coefficient of organic carbon in aggregates at different altitudes

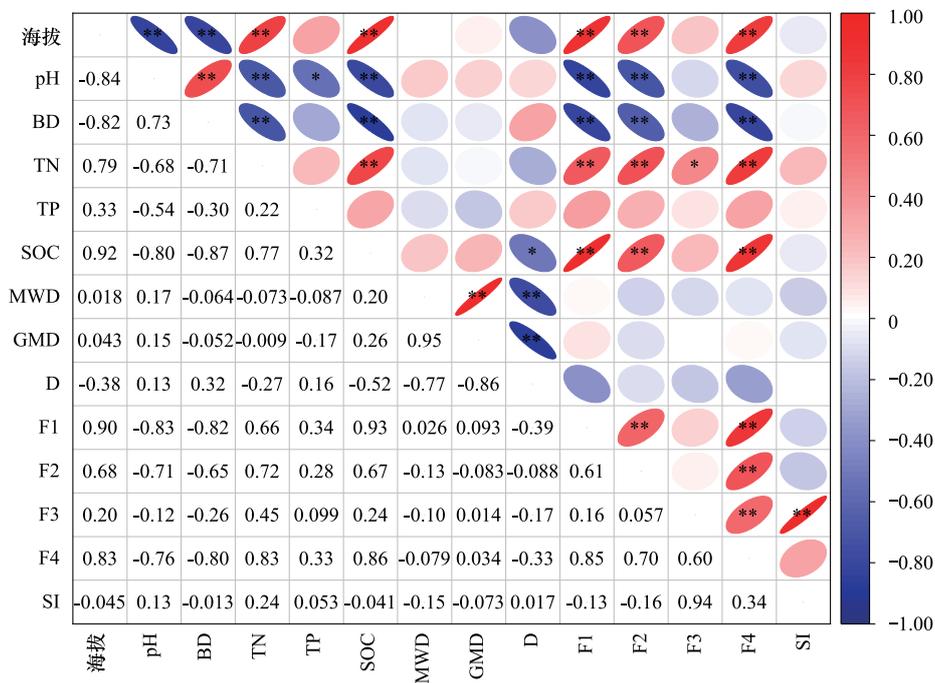


图 5 土壤有机碳组分与土壤理化性质、团聚体稳定性的 Pearson 相关性分析

Fig.5 Pearson correlation analysis of soil organic carbon with soil physicochemical properties, aggregate stability and organic carbon components

颜色的深浅表示变量之间关系的强度(蓝色和红色分别表示正相关和负相关); * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; BD:容重 Bulk density; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorous; SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; MWD:平均重量直径 Mean weight diameter; GMD:几何平均直径 Geometric mean; D:分形维数 Dimension; F1:高氧化活性有机碳 Very labile carbon; F2:中氧化活性有机碳 Inert carbon; F3:低氧化活性有机碳 Oxidizable resistant carbon; F4:难氧化有机碳 Nonlabile carbon; SI:氧化稳定性系数 Stability index

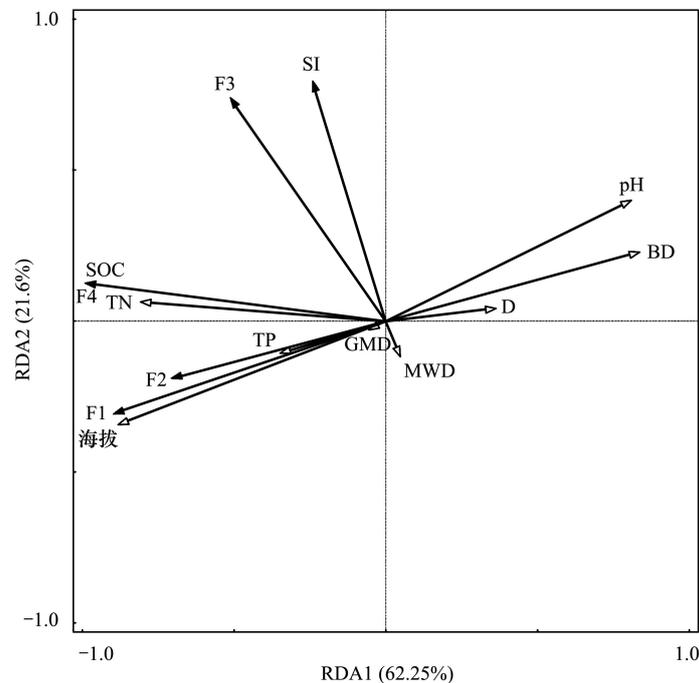


图 6 土壤团聚体稳定性和理化性质与土壤有机碳组分及其稳定性的冗余分析

Fig.6 Stability and physicochemical properties of soil aggregates and redundancy analysis of soil organic carbon components and their stability

表 3 土壤团聚体稳定性和理化性质与土壤有机碳组分及其稳定性的冗余分析结果

Table 3 Stability and physicochemical properties of soil aggregates and redundancy analysis of soil organic carbon components and their stability

参数 Parameters	第 I 轴 Axis 1	第 II 轴 Axis 2	第 III 轴 Axis 3	第 IV 轴 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.62	0.22	0.02	0.00
解释差异 Explained variation (cumulative)	62.25	83.85	86.18	86.18
相关系数 Pseudo-canonical correlation	0.99	0.85	0.56	0.80
解释拟合变化 Explained fitted variation (cumulative)	72.23	97.29	100.00	100.00

3 讨论

3.1 不同海拔对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体的质量分布被用来表征土壤结构的好坏和稳定性^[15-16],粒径>0.25 mm 的团聚体是土壤中最 好的结构体,具有较强的抗腐蚀性能力和更好的土壤结构^[17-18]。本研究发现,随着海拔梯度的升高,土壤中 大团聚体的含量逐渐增多,且在中海拔(2249 m)处含量达到最大值,说明这两个粒级团聚体对山地森林土壤 结构及稳定性起的作用最大。随着海拔上升,贺兰山的植被类型呈现荒漠草原-灌木-乔木-草甸的转变,在中 海拔样地主要的植被类型为山杨×油松混交林,混交林植物根系复杂,土壤表层植被覆盖度相对丰富,具有 大量的腐殖质和枯落物,而枯落物中又含有大量难以被微生物所分解的木质素等化学物质^[19];同时丰富的植被 类型导致光合作用的能力加强,增加了土壤中有机质含量的输入,促进土壤中小团聚体向大团聚体的转变。 其中植物根系和菌丝直接影响>0.25 mm 团聚体的形成,它们之间相互缠绕,释放根系分泌物使土壤颗粒粘 结在一起,促进土壤大团聚体的形成,增强土壤团聚体和土壤结构的稳定性^[20]。

研究表明,较大的 MWD 和 GMD 值可以提高土壤结构的稳定性,而土壤结构通常又可以抵抗水和机械干

扰的破坏来维持团聚体的稳定性^[21-22]; *D* 能客观反映团粒结构特征和土壤紧实程度, *D* 越小土壤的稳定性越高^[23]。本研究发现, 贺兰山不同海拔土壤团聚体稳定性随着海拔上升具有相同的变化趋势, 均呈现先增后减的趋势, 在中海拔 2249 m 处稳定性最高。这可能是因为中海拔样地温度适宜, 养分和降水充足, 良好的水热条件, 促进团聚体的形成, 加强团聚体之间的稳定性。庞丹波、赵娅茹等^[24-25]在贺兰山研究发现, 沿海拔梯度上升, 土壤微生物总量、真菌、细菌、放线菌以及丛枝菌根真菌磷脂脂肪酸 (PLFAs) 含量均表现为先增后减的变化趋势, 在中海拔区域 (2110—2360m) 微生物 PLFAs 含量更高, 良好的细菌、真菌条件使得土壤团聚体的稳定性更强, 低海拔地区土壤表层的枯落物和养分含量相对较低, 导致团聚体的稳定性降低, 而高海拔地区团聚体稳定性低于中海拔地区可能是因为随着海拔的升高温度逐渐降低, 尽管土壤水分含量充足, 但由于低温容易形成冻土, 对植被生长和生物量的积累产生负面效应, 抑制了养分的积累和微生物活性^[26]。

3.2 不同海拔对土壤有机碳含量的影响

土壤有机碳的海拔分布格局是水分和土壤理化性质等环境因子变化共同作用的结果^[27]。本研究显示沿着海拔梯度上升, 不同粒径团聚体内土壤有机碳含量随着海拔的升高而增大, 其中大团聚体内有机碳含量高于微团聚体内有机碳, 这是因为随着海拔上升, 土壤中植物根系和微生物量等的增加, 促进了小颗粒和微团聚体的结合形成大团聚体。由图 2 可知, 随着海拔的上升, 不同海拔各粒径团聚体有机碳的含量呈现增加趋势。这与吴梦瑶等^[19]和 Feyissa 等^[28]在西南高寒森林草原生态系统和贺兰山的研究结果一致。何文强等^[29]通过对贺兰山 7 种不同植被类型的凋落物蓄积量研究发现, 中高海拔的乔木针叶林要显著高于低海拔的荒漠草原和蒙古扁桃灌丛, 这可能是因为高海拔具有较高的植被郁闭度和凋落物蓄积量, 导致高海拔的水源涵养能力要高于其他植被类型, 增加了土壤有机质的输入, 而土壤中有机质又因为其形态和结构复杂, 不容易被微生物等分解利用, 形成一种自身保护作用^[30]; 低海拔地区的植被凋落物蓄积量相对较少, 导致土壤碳的输入量较低, SOC 含量减少。本研究发现不同海拔团聚体有机碳含量在大团聚体中的含量显著高于微团聚体和黏粉粒, 这与 Zhang 等^[31]在黄土高原研究耕地转换对土壤团聚体碳、氮、磷化学计量影响的结果一致。Six 等^[32]研究认为微团聚体通过根系、真菌菌丝和多糖等胶结物质的作用形成大团聚体, 使有机质含量随团聚体粒级增加而增加, 从而土壤有机碳通过闭蓄在团聚体中形成空间上的物理隔绝, 减少微生物对其矿化分解, 减少土壤有机碳含量的损失^[33]。从团聚体有机碳贡献率而言, 大粒径团聚体有机碳的贡献率始终高于小粒径团聚体。

3.3 不同海拔对团聚体有机碳组分及其稳定性的影响

土壤中植物碳输入会影响微生物的群落和结构, 从而影响不同土地覆盖下土壤 C 的分布和稳定。土壤易氧化有机碳组分含量受植被类型的影响, 本研究发现土壤有机碳易氧化组分 F1、F2、F3 和 F4 含量整体表现为乔木高于草地、灌木和荒漠草原, 而土壤有机碳稳定性表现为荒漠草原、灌木高于乔木和草地。F1 和 F2 组分主要由相对不稳定的碳化合物组成, 这些碳化合物主要来自凋落物、根系生物量等^[34], 不稳定的有机化合物容易被土壤微生物氧化分解利用, 释放出矿质养分和能量^[35], 这些分解产物通过有机结合剂和土壤颗粒结合, 促进大团聚体的形成^[36-37]。研究表明^[28]草甸和乔木相比于灌木和荒漠草原表层有更多的枯落物和腐殖质, 枯落物的增加会导致乔木中有机碳的来源增加, 从而使得有机碳活性增强, 有机碳活性的增强会加速有机碳的氧化与分解, 再加上土壤中微生物的作用, 团聚体不同组分中有机碳含量逐渐增加, 从而使得土壤有机碳的稳定性降低。F3 和 F4 组分中土壤有机质和腐殖质的分解具有更大的化学稳定性和更高的分子量, 难以被微生物氧化利用^[11, 38]。本研究发现, 不同海拔土壤有机碳氧化组分的大小为 F1>F2>F4>F3, 有机碳氧化稳定性组分大团聚体内 (>0.25 mm) 含量高于微团聚体和黏粉粒, 说明贺兰山不同海拔活性有机碳含量高于惰性有机碳, 且大多储藏在大团聚体内, 这说明有机碳的贡献率可能取决于不同粒径团聚体的数量及其相关碳含量。部分研究指出随土壤团聚体粒径的增加, 团聚体有机碳含量增加^[28], 表明大团聚体是森林生态系统土壤有机碳保存的主要机制。

土壤有机碳由不同稳定性的碳组分组成, 不稳定的碳组分主要由非纤维素多糖组成, 占 SOC 的最少部分^[39-40]。氧化稳定性作为土壤有机碳氧化难易程度的一个重要指标, 可以表征土壤有机质的质量状况, 土壤

有机碳氧化稳定性越强说明土壤有机碳越容易分解和转化^[41-42]。有研究指出^[9, 43],肥力较高的土壤有机碳氧化稳定性较低,有机质的活性也相对越差,肥力较低的土壤氧化稳定性较高,难氧化的有机碳有利于土壤结构的稳定。本研究得出低海拔土壤有机碳氧化稳定性大于中高海拔地区,且大团聚体的氧化稳定性低于微团聚体和粉黏粒,这可能是由于位于中高海拔的水热条件充足,土壤微生物活性高,同时植被郁闭度高,有机物分解和根系分泌物逐渐升高,导致土壤氧化稳定性小于低海拔地区^[44]。徐华君等^[9]在阿尔卑斯山的研究表明氧化稳定性系数大,说明土壤有机碳的活性在降低。

3.4 土壤有机碳氧化稳定性关键驱动因素

山地森林生态系统土壤有机碳氧化稳定性受海拔、植被类型以及外界干扰等多种因素影响^[45]。本研究结果表明,F1、F2、F3 与 F4 组分之间存在极显著正相关性,这与瞿红云^[46]在三峡库区消落带的研究结果一致,这说明有机碳氧化各组分之间存在动态平衡,各组分之间相互制约,总有机碳含量的高低,在一定程度上决定了有机碳组分含量的高低,不同海拔各植被产生的根系分泌物不同,土壤有机碳输入量不同,导致各组分易氧化有机碳组分含量不同^[47]。SOC、海拔和 TN 与 F1、F2、F4 组分之间存在极显著正相关性,说明土壤有机碳对有机碳氧化稳定性组分的影响最大,这与前人^[48]在黄土高原的研究结果一致。海拔与土壤有机碳各组分之间存在极显著正相关性,这与王世君^[49]在武夷山自然保护区的研究发现海拔是影响土壤有机碳含量的主导因子结果一致,随着海拔上升,植被类型发生变化,导致土壤中有有机碳含量发生变化。

冗余结果表明(图 6、表 3),SOC、海拔、TN、TP 是贺兰山土壤有机碳氧化稳定性的主要环境因子,土壤有机碳、土壤养分对易氧化有机碳组分产生影响,而团聚体稳定性也与易氧化有机碳组分和稳定性系数之间存在关联,这说明影响有机碳氧化组分的因素主要为土壤有机碳和土壤养分,有机质的分解速率慢,有利于土壤养分的积累,从而使土壤表现出较高的养分含量,而团聚体的稳定性通过改变有机碳氧化组分的分配比例从而影响稳定性。团聚体的稳定性也与土壤有机碳的含量相互关联,不稳定的有机化合物容易被分解释放出养分和能量,与菌丝及其化学物质的作用下,促进大团聚体的形成。

4 结论

分析贺兰山 1300—2700 m 范围内不同海拔土壤团聚体稳定性及有机碳组分变化特征,结果表明:(1)在海拔 2249 m 处的 HJ 植被带土壤团聚体稳定性和全土有机碳的含量最大,总体表现为中海拔区域高于低高海拔地区;(2)不同海拔团聚体各粒级土壤有机碳含量和有机碳易氧化组分随海拔升高而增大,且主要储藏在大团聚体内。通过相关分析发现,SOC 和 TN 是影响有机碳氧化组分的主要调控因子,表明在贺兰山东坡不同海拔土壤理化性质和稳定性对有机碳氧化组分的贡献占主导地位。本研究探究了土壤团聚体稳定性和土壤理化性质对土壤有机碳组分的影响因子,但没有考虑到各粒径团聚体的贡献和作用,在未来的研究中应该增加不同粒级团聚体对有机碳含量的影响,来探究土壤有机碳的稳定性。

参考文献(References):

- [1] Li L G, Vogel J, He Z L, Zou X M, Ruan H H, Huang W, Wang J S, Bianchi T S. Association of soil aggregation with the distribution and quality of organic carbon in soil along an elevation gradient on Wuyi Mountain in China. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0150898.
- [2] Duru M, Therond O, Martin G, Martin-Clouaire R, Magne M A, Justes E, Journet E P, Aubertot J N, Savary S, Bergez J E, Sarthou J P. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(4): 1259-1281.
- [3] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [4] 王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅. 缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征. *环境科学*, 2019, 40(3): 1504-1511.
- [5] 张慧敏. 玉龙雪山沿海拔梯度土壤有机碳储量及其稳定机制[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- [6] 王冰, 张鹏杰, 张秋良. 不同林型兴安落叶松林土壤团聚体及其有机碳特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(3): 15-24.
- [7] 吴梦瑶. 贺兰山不同海拔土壤团聚体及有机碳稳定性研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [8] 王彩霞, 刘帅, 王勇, 王旭东. 不同保护性耕作方式对微团聚体有机碳氧化稳定性的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010,

- 38(5): 149-155.
- [9] 徐华君, 殷志刚. 阿尔泰山区土壤有机碳组成及分布规律研究. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 33-36.
- [10] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys. *Soil Science*, 2001, 166(1): 61-67.
- [11] Guareschi R F, Pereira M G, Perin A. Oxidizable carbon fractions in Red Latosol under different management systems. *Revista Ciência Agronômica*, 2013, 44(2): 242-250.
- [12] 孙彩丽, 刘国彬, 马海龙, 薛蕙, 张超. 不同沙生植被土壤易氧化有机碳组分及其含量的差异. 草地学报, 2012, 20(5): 863-869.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [15] Ciric V, Manojlovic M, Nesic L, Belic M. Soil dry aggregate size distribution: effects of soil type and land use. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12(4): 689-703.
- [16] Ma L, Wang Q, Shen S. Response of soil aggregate stability and distribution of organic carbon to alpine grassland degradation in Northwest Sichuan. *Geoderma Regional*, 2020, 22(3): e00309.
- [17] 王心怡, 周聪, 冯文瀚, 陈金林, 蒋翔鹤. 不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征. 水土保持学报, 2019, 33(5): 126-131.
- [18] Kong J Q, He Z B, Chen L F, Yang R, Du J, Lin P F, Zhu X, Tian Q Y. Elevational gradients and distributions of aggregate associated organic carbon and nitrogen and stability in alpine forest ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84(6): 1971-1982.
- [19] 吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 刘丽贞, 刘波, 祝忠有, 李学斌. 贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究. 水土保持学报, 2021, 35(2): 210-216.
- [20] 刘晶, 张跃伟, 张巧明, 徐少君. 土地利用方式对豫西黄土丘陵区土壤团聚体微生物生物量及群落组成的影响. 草业科学, 2018, 35(4): 771-780.
- [21] Gupta Choudhury S, Srivastava S, Singh R, Chaudhari S K, Sharma D K, Singh S K, Sarkar D. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136: 76-83.
- [22] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, Lang B von Lützow M, Marin-Spiotta E, van Wesemael B, Rabot E, Lie ß M, Garcia-Franco N, Wollschläger U, Vogel H J, Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 2019, 333: 149-162.
- [23] 王磊, 刘晴廪, 史经攀, 李俊杰, 韩梦豪, 陈斌, 陈杭, 关庆伟. 平原沙土区河岸带不同植被类型对土壤团聚体稳定性的影响. 水土保持研究, 2024, 31(1): 96-104.
- [24] 赵娅茹, 吴梦瑶, 袁丽丽, 王晓勤, 杨娟, 陈林, 李学斌, 周金星, 万龙, 庞丹波. 贺兰山西坡不同海拔梯度土壤氨基糖积累特征. 生态学报, 2024, 44(7): 2907-2918.
- [25] 庞丹波, 吴梦瑶, 赵娅茹, 杨娟, 董立国, 吴旭东, 陈林, 李学斌, 倪细炉, 李静尧, 梁咏亮. 贺兰山东坡不同海拔土壤微生物群落特征及其影响因素. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1957-1967.
- [26] Liu S, Xu G X, Chen H H, Zhang M M, Cao X W, Chen M, Chen J, Feng Q H, Shi Z M. Contrasting responses of soil microbial biomass and extracellular enzyme activity along an elevation gradient on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 974316.
- [27] 刘玉祯, 刘文亨, 冯斌, 时光, 孙彩彩, 李彩弟, 张小芳, 董全民. 坡向和海拔对高寒山地草甸植被分布格局特征的影响. 草地学报, 2021, 29(6): 1166-1173.
- [28] Feyissa A, Raza S T, Cheng X L. Soil carbon stabilization and potential stabilizing mechanisms along elevational gradients in alpine forest and grassland ecosystems of Southwest China. *Catena*, 2023, 229: 107210.
- [29] 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凋落物层水文效应. 生态学杂志, 2024, 43(4): 1047-1056.
- [30] 季波. 宁夏贺兰山主要森林群落生物量及碳储量研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [31] Zhang Y, Li P, Liu X J, Xiao L, Shi P, Zhao B H. Effects of farmland conversion on the stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil aggregates on the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2019, 351: 188-196.
- [32] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [33] 吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 刘波, 刘丽贞, 邱开阳, 李学斌. 贺兰山不同海拔土壤团聚体碳氮磷含量及其化学计量特征变化. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1241-1249.
- [34] Benbi D K, Brar K, Toor A S, Singh P, Singh H. Soil carbon pools under poplar-based agroforestry, rice-wheat, and maize-wheat cropping systems in semi-arid India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92(1): 107-118.

- [35] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K, Chaudhury J. Soil organic carbon pools and productivity relationships for a 34 year old rice-wheat-jute agroecosystem under different fertilizer treatments. *Plant and Soil*, 2007, 297(1): 53-67.
- [36] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, Deneff K, Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988-995.
- [37] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 412-418.
- [38] Sherrod L A, Peterson G A, Westfall D G, Ahuja L R. Soil organic carbon pools after 12 years in No-till dryland agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(5): 1600-1608.
- [39] Yu P J, Li Y X, Liu S W, Ding Z, Zhang A C, Tang X G. The quantity and stability of soil organic carbon following vegetation degradation in a salt-affected region of Northeastern China. *Catena*, 2022, 211: 105984.
- [40] Yu P J, Liu S W, Ding Z, Zhang A C, Tang X G. Changes in storage and the stratification ratio of soil organic carbon under different vegetation types in northeastern China. *Agronomy*, 2020, 10(2): 290.
- [41] 董雪, 王春燕, 黄丽, 谭文峰, 胡红青. 侵蚀程度对不同粒径团聚体中养分含量和红壤有机质稳定性的影响. *土壤学报*, 2013, 50(3): 525-533.
- [42] 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 I. 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究. *土壤学报*, 1963(3): 286-293.
- [43] 刘梦云, 付东磊, 常庆瑞, 齐雁冰. 黄土台塬不同土地利用方式对土壤有机碳氧化稳定性及酶活性的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31(12): 2415-2424.
- [44] 何文强. 贺兰山东坡不同植被类型凋落物和土壤层水源涵养功能及其影响因素研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [45] 梁冰妍. 祁连山不同草地类型区土壤有机碳组分的性质差异[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [46] 瞿红云. 消落带土壤水稳性团聚体有机碳氧化稳定性特征[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
- [47] 潘嘉琛. 黄泛沙地不同农林复合模式土壤团聚体及有机碳组分研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [48] Sun C L, Xue S, Chai Z Z, Zhang C, Liu G B. Effects of land-use types on the vertical distribution of fractions of oxidizable organic carbon on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(2): 221-231.
- [49] 王世君. 武夷山自然保护区甜槠林不同海拔土壤有机碳的变化特征[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.