

DOI: 10.20103/j.stxb.202311192521

秦崧悦, 吴新亮, 褚保森, 张智勇, 郑成浩, 刘峰, 张帅发, 周金星. 贺兰山不同坡向和海拔梯度土壤团聚体组成和稳定性变化特征及其影响因素. 生态学报, 2024, 44(17): 7770-7785.

Qin S Y, Wu X L, Chu B S, Zhang Z Y, Zheng C H, Liu F, Zhang S F, Zhou J X. Characteristics and influencing factors of soil aggregate composition and stability under different slope orientation and elevation gradients in Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7770-7785.

# 贺兰山不同坡向和海拔梯度土壤团聚体组成和稳定性变化特征及其影响因素

秦崧悦<sup>1,2</sup>, 吴新亮<sup>1,2,3</sup>, 褚保森<sup>1,2</sup>, 张智勇<sup>1,2</sup>, 郑成浩<sup>1,2</sup>, 刘峰<sup>1,2</sup>, 张帅发<sup>1,2</sup>, 周金星<sup>1,2,\*</sup>

1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

2 北京林业大学云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083

3 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 广州 510650

**摘要:** 认识山地土壤团聚体稳定性的空间分异规律, 对山地生态系统功能评估与土壤侵蚀防治具有重要意义。为探究干旱区山地土壤团聚体稳定性空间变化特征及其影响因素, 选取贺兰山不同坡向(西北、东南、东北和西南)和海拔梯度(1300—2800 m)的表层(0—10 cm)和表下层(10—20 cm)土壤为研究对象, 测定了土壤水稳性大团聚体和微团聚体组成, 分析了土壤团聚体稳定性的空间分异特征, 揭示了土壤团聚体稳定性与地形、植被和土壤性质之间的关系。结果表明: 研究区土壤以 >2 mm 和 0.25—0.05 mm 粒级团聚体为主。综合土壤粘粒分散系数(CDC)和粘粒分散率(CDR)分析, 东北坡和西南坡土壤微团聚体稳定性较优于西北坡和东南坡。对于土壤水稳性大团聚体稳定性指数, 东北坡团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)最低, 分别为 1.56 mm 和 0.44 mm, 土壤水稳性团聚体稳定性最差。随海拔升高, 土壤 CDC 和 CDR 减小, 团聚度(DOA)增大, 表层土壤 GMD 呈上升的趋势, 而表下层土壤 MWD 和 GMD 值减小。冗余分析表明土壤理化性质是影响不同海拔和坡向下土壤团聚体稳定性的主要因素, 其中土壤容重、毛管孔隙度、粘粒含量和交换性  $Mg^{2+}$  是主要影响因子。

**关键词:** 坡向; 海拔; 土壤团聚体; 团聚体稳定性; 山地生态系统

## Characteristics and influencing factors of soil aggregate composition and stability under different slope orientation and elevation gradients in Helan Mountain

QIN Songyue<sup>1,2</sup>, WU Xinliang<sup>1,2,3</sup>, CHU Baosen<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhiyong<sup>1,2</sup>, ZHENG Chenghao<sup>1,2</sup>, LIU Feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuaifa<sup>1,2</sup>, ZHOU Jinxing<sup>1,2,\*</sup>

1 Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 National Location Observation Research Station of Jianshui Desert Ecosystem in Yunnan, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

**Abstract:** Understanding the spatial differentiation of soil aggregate stability in mountainous areas is of great significance for assessing the function of mountain ecosystems and preventing soil erosion. In order to explore the spatial variation characteristics and influencing factors of soil aggregate stability in arid mountainous areas, surface (0—10 cm) and subsurface (10—20 cm) soils with different slope orientation (northwest, southeast, northeast and southwest) and elevation gradients (1300—2800 m) in Helan Mountain were selected as research objects. The composition of macroaggregate and microaggregate of soil water stability was determined, and the spatial differentiation of soil aggregate

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2021BEG02005)

收稿日期: 2023-11-19; 网络出版日期: 2024-06-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zjx9277@126.com

stability was analyzed. The relationships between soil aggregate stability and topography, vegetation and soil properties were revealed. The results showed that the soils in the study area were mainly composed of aggregates with grain size  $>2$  mm and  $0.25\text{--}0.05$  mm. According to the analysis of Clay Dispersion Coefficient (CDC) and Clay Dispersion Rate (CDR), the stability of soil microaggregates on the northeast slope and southwest slope was better than that on the northwest slope and southeast slope. For the stability index of large aggregates of soil water stability, the Mean Weight Diameter (MWD) and Geometric Mean Diameter (GMD) of aggregates on the northeast slope were the lowest, which were 1.56 mm and 0.44 mm, respectively. The stability of soil water-stable aggregates was the worst. The CDC and CDR decreased, DOA (Degree of Aggregation) increased, and GMD of surface soil increased, while MWD and GMD of subsurface soil decreased with elevation. Redundancy analysis showed that soil physical and chemical properties were the main factors affecting the stability of soil aggregates at different elevations and downslope, in which soil bulk density, capillary porosity, clay content and exchangeability  $\text{Mg}^{2+}$  were the main factors.

**Key Words:** aspect; elevation; soil aggregates; aggregate stability; mountain ecosystems

土壤团聚体稳定性影响水分运动、生物活动、植物生长等土壤过程与功能等。较好的土壤团聚体稳定性可以减少风蚀或水蚀的风险,保持土壤生产力和抑制土壤侵蚀与退化<sup>[1-2]</sup>。此外,了解土壤团聚体稳定性是衡量土壤可持续利用的重要指标<sup>[3]</sup>。土壤团聚体按照颗粒大小可分为大团聚体( $>0.25$  mm)和微团聚体( $<0.25$  mm),不同粒径团聚体在土壤中的作用存在明显差异<sup>[4-5]</sup>。大团聚体稳定性通常被认为是土壤退化研究中的关键指标<sup>[6]</sup>,微团聚体稳定性也常用来估算或预测土壤侵蚀和地表径流<sup>[7]</sup>。

在山地生态系统中,土壤团聚体稳定性不仅直接受土壤本身内在因素影响,而且很大程度受植被类型、海拔和坡向等外部环境的影响<sup>[2, 8]</sup>。海拔和坡向作为最重要的环境因素,通过调节小气候(光热条件和水分状况)和土壤性质,影响土壤团聚体稳定性<sup>[9]</sup>。马寰菲等<sup>[10]</sup>在太白山研究发现,高海拔土壤团聚体稳定性高于低海拔;而 Murugan 等<sup>[11]</sup>在阿尔卑斯山研究发现,中海拔具有较高的土壤团聚体稳定性;李禹江等<sup>[8]</sup>对夹金山不同坡向土壤团聚体稳定性的研究表明,坡向、坡位及其交互作用对土壤团聚体产生显著影响,坡向是影响团聚体稳定性的关键要素;曾江敏等<sup>[12]</sup>发现喀斯特槽谷区土壤微团聚体稳定性在不同坡面走向变化各异,这种影响是坡面通过对土壤性质的影响决定的。因此,前人有关土壤团聚体稳定性随海拔和坡向的变化研究结果不一致。另外,关于土壤团聚体稳定性空间变化的调控因子尚未达成共识<sup>[10]</sup>。土壤性质中,有机质,金属阳离子、颗粒组成通过粘聚力,离子键桥和土体强度等方式影响团聚体稳定性<sup>[13]</sup>。国内外学者就土壤有机质对团聚体稳定性的影响已做了大量的研究工作,Boix 等<sup>[14]</sup>研究表明土壤团聚体稳定性与有机质水平的高低密切相关,而多项研究表明金属阳离子在土壤团聚体的形成和稳定中起重要作用<sup>[15]</sup>。Oades 等<sup>[16]</sup>认为微团聚体主要通过短程范德华力和静电吸附来稳定,其中包括土壤中阳离子的参与。Barberis 等<sup>[17]</sup>认为除有机质和金属离子外,大团聚体主要通过粉粒、砂粒与微团聚体、菌丝和根等黏合形成<sup>[18]</sup>。因此,仍需加强对不同海拔和坡向下土壤团聚体稳定性分布格局及其影响因素的研究。

贺兰山作为我国重要的生态屏障,是我国干旱与半干旱地区的分界线,其高大的山体造就了完整的垂直带谱,且生物多样性丰富,成为开展山地生态系统土壤团聚体稳定性空间分异研究的天然理想试验平台<sup>[19]</sup>。目前围绕贺兰山土壤团聚体的研究主要集中在东坡不同海拔土壤水稳性大团聚体<sup>[20]</sup>方面,未能很好回答土壤团聚体稳定性在不同海拔和坡向下的空间分异规律及金属阳离子所发挥的作用机制。鉴于此,本文选择贺兰山不同坡向(西北、东南、东北和西南)和海拔梯度(1300—2800 m)的表层(0—10 cm)和表下层(10—20 cm)土壤为研究对象,旨在探究(1)贺兰山土壤大团聚体和微团聚体稳定性的空间分异特征;(2)影响贺兰山团聚体稳定性的驱动因子,为山地生态系统土壤结构稳定性提供数据支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贺兰山位于阿拉善高原与银川平原之间( $38^{\circ}27'\text{--}39^{\circ}30'\text{N}$ ,  $105^{\circ}41'\text{--}106^{\circ}41'\text{E}$ )。地处典型大陆性气候

区域范围内,年均气温 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量 $481.1\text{ mm}$ (60%—80%的降水量发生在6—8月)<sup>[21]</sup>。植被具有明显垂直分布规律,从下到上依次为荒漠草原(Desert grassland)、蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica*)、垫状锦鸡儿灌丛(*Caragana tibetica*)、灰榆(*Ulmus glaucescens*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、混交林(Mixed forests)、杜松(*Juniperus rigida*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、亚高山草甸(Subalpine meadows)。

## 1.2 样地设置与样品采集

选择贺兰山西北、东南、东北和西南四个坡向,沿海拔梯度(1300—2800 m)分别选取典型地带性植被土壤为研究对象,各类水平样地设置3个重复,乔木样地大小为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ ,灌丛为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ ,草地为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ ,记录样地信息(表1),去除地表枯落物,按五点取样法采集表层0—10 cm和表下层10—20 cm的土壤样品,采用环刀取样时,各剖面设置3个重复,同时采集各土层散土装入塑封袋带回实验室,风干后过筛以进行后续土壤理化性质测定。同时采集各样方内0—10 cm和10—20 cm的原状土,装入铝盒带回实验室,按照土壤自然纹理轻柔掰开,剔除石块、根系和动植物残体等,以进行后续团聚体筛分。

表1 样地基本信息表

Table 1 Basic information table of sample plots

样地 Sample site	坡向 Aspect	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/( $^{\circ}$ )	土壤类型 Soil types	林下主要植被 Main vegetations under forest
HM	西北坡	1349	6	粗骨土	刺旋花( <i>Convolvulus tragacanthoides</i> )
	东南坡	1349	6		针茅( <i>Stipa capillata</i> )
	东北坡	1848	4		荒漠锦鸡儿( <i>Caragana roborovskyi</i> )
	西南坡	1856	15		
MG	西北坡	1722	15	粗骨土	松叶猪毛菜( <i>Salsola laricifolia</i> )
	东南坡	1670—1716	22—39		金露梅( <i>Potentilla fruticose</i> )
	东北坡	2110	23		蒙古扁桃( <i>Amygdalus mongolica</i> )
DJ	西南坡	2107—2134	4—5	粗骨土	垫状锦鸡儿( <i>Caragana tibetica</i> ) 金露梅( <i>Potentilla fruticose</i> ) 针茅( <i>Stipa capillata</i> )
HY	西北坡	1953—1971	20—8	灰褐土	灰榆( <i>Ulmus glaucescens</i> )
	东南坡	2012—2043	26—32		置疑小檗( <i>Berberis dubia</i> Schneid)
	东北坡	1905	10		绣线菊( <i>Spiraea salicifolia</i> L.)
	西南坡	1910	13		
YS	西北坡	2030—2036	32—40	灰褐土	油松( <i>Pinus tabuliformis</i> )
	东南坡	2277—2305	19—24		绣线菊( <i>Spiraea salicifolia</i> L.)
	东北坡	2150	31		置疑小檗( <i>Berberis dubia</i> Schneid)
	西南坡	2123—2173	26—28		
HJ	西北坡	2227—2243	19—39	灰褐土	青海云杉( <i>Picea crassifolia</i> )
	东南坡	2336—2344	20—26		山杨( <i>Populus davidiana</i> )
	东北坡	2160	27		置疑小檗( <i>Berberis dubia</i> Schneid)
	西南坡	2160	16		
DS	东北坡	2350	32	灰褐土	杜松( <i>Juniperus rigida</i> )
	西南坡	2360	35		青海云杉( <i>Picea crassifolia</i> )
QY	西北坡	2395—2401	21—27	灰褐土	青海云杉( <i>Picea crassifolia</i> )
	东南坡	2461—2520	16—23		置疑小檗( <i>Berberis dubia</i> Schneid)
	东北坡	2664	28		苔草( <i>Carex</i> spp)
	西南坡	2707—2717	26—28		
GC	西北坡	2590	10	高山草甸土	蒿草( <i>Artemisiacapillaries</i> )
	东南坡	2580			金露梅( <i>Potentilla fruticose</i> )
	东北坡	2635			
	西南坡	2635			

HM: 荒漠草原 Desert grassland; MG: 蒙古扁桃灌丛 *Amygdalus mongolica* bushes; DJ: 垫状锦鸡儿 *Caragana tibetica*; HY: 灰榆林 *Ulmus glaucescens* forest; YS: 油松林 *Pinus tabuliformis* forest; HJ: 混交林 Mixed forests; DS: 杜松林 *Juniperus rigida* forest; QY: 青海云杉林 *Picea crassifolia* forest; GC: 亚高山草甸 Subalpine meadows

## 1.3 土壤团聚体稳定性测定

将风干原状土干筛过5、2、1、0.5、0.25 mm筛组,得到各级团聚体的百分含量,把干筛分取的风干样品按

比例配成 50 g, 供湿筛用。将 5、2、1、0.5、0.25 mm 筛组, 固定在振荡架上, 放入水桶, 桶内加水至筛组上缘部分。将土样 (<0.25 mm 微团聚体不倒入湿筛样品中, 以免其堵塞筛孔) 轻轻放入套筛内, 开动马达, 使筛子上缘任何时候都浸没水中。团粒分析仪振荡 30 min, 振荡频率是 30 r/min。待振荡停止后, 慢慢将套筛提出水面, 淋干, 将各级筛子上团聚体轻轻冲洗至已知重量的铝盒中, 烘干称重, 每个样品重复 4 次。

采用如下指标衡量大团聚体稳定性: 平均质量直径 (Mean weight diameter, MWD)、几何平均直径 (Geometry mean diameter, GMD)、团聚体分散度 (Percentage of aggregate disruption, PAD)<sup>[22,23]</sup>:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n w_i \bar{x}_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i \quad (2)$$

式中,  $w_i$  为该团聚体占该土壤样品所有粒级团聚体的质量分数 (%),  $\bar{x}_i$  为第  $i$  级团聚体的平均直径 (mm)。

$$\text{PAD} = \frac{m_d - m_w}{m_d} \times 100 \quad (3)$$

式中,  $m_d$  表示干筛法测定 >0.25 mm 团聚体的质量;  $m_w$  表示湿筛法测定 >0.25 mm 团聚体的质量。

土壤微团聚体的测定采用筛分-吸管法分级, 分别测定 2—0.25、0.25—0.05、0.05—0.002、<0.002 mm 共 4 个粒级微团聚体的质量百分比含量<sup>[24]</sup>。

以微团聚体抵抗水的分散能力来反映土壤的抗蚀特性, 采用粘粒分散系数 (Clay dispersion coefficient, CDC)、粘粒分散率 (Clay dispersion rate, CDR) 和团聚度 (Degree of aggregation, DOA) 作为指标评价微团聚体水稳性<sup>[25,26]</sup>:

$$\text{CDC} = \frac{w'_{<0.002}}{w_{<0.002}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{CDR} = \frac{w'_{<0.05}}{w_{<0.05}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{DOA} = (w'_{>0.05} - w_{>0.05}) / w_{>0.05} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $w'$ 、 $w$  为相应粒级微团聚体和机械组成分析值。

MWD 为团聚体粒级分布特征的综合评价, 其值越大, 说明团聚体水稳性越好; GMD 是对团聚体主要粒级分布的描述, 其值越大, 表明团聚体在大粒级范围的分布越多; PAD 是对湿筛过程团聚体破碎程度的描述, 其值越大, 表明团聚体破碎越多, 稳定性越差。CDC、CDR 和 DOA 是评价 <0.25 mm 团聚体分散程度的参数, DOA 越大, CDC 和 CDR 越小, 说明土壤微团聚体水稳性越好<sup>[27]</sup>。

#### 1.4 土壤理化性质测定

土壤机械组成 (砂粒、粉粒、粘粒) 采用吸管法测定, 质地划分参考美国制; 土壤容重、孔隙度 (非毛管孔隙、毛管孔隙和总孔隙) 用环刀浸水法 (100 cm<sup>3</sup>) 测定; pH 采用 pH 计测定 (水土比 2.5:1); 交换性盐基离子采用 ICP-OES 电感耦合等离子光谱发生仪测定; 土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法—外加热法测定; 土壤全氮和全磷分别经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消解后, 利用化学分析仪 SMART CHEM 200 测定<sup>[28]</sup>。

#### 1.5 数据分析

采用多因素方差分析评价海拔、坡向、土层厚度对土壤理化性质和团聚体稳定性的影响, 采用冗余分析评价土壤团聚体稳定性与土壤理化性质和植被综合盖度关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质空间变化

土壤容重均值范围为 1.03—1.2 g/cm<sup>3</sup> (图 1), 其中东南和西南坡容重显著大于东北和西北坡 ( $P < 0.05$ ); 土壤孔隙以毛管孔隙为主, 均值在 0.48—0.53 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 之间, 非毛管孔隙含量相对较低, 在 0.01—0.03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 之间, 毛管孔隙度和总孔隙度均表现为东北坡 > 西北坡 > 西南坡 > 东南坡; 土壤砂粒含量表现为东南坡显著最高

(47.8%,  $P < 0.05$ ), 为东南坡 > 西北坡 > 东北坡 > 西南坡; 土壤粉粒和粘粒含量与砂粒呈现相反的变化趋势, 粉粒含量为东南坡 (19.7%) 显著最低 ( $P < 0.05$ ), 西北值略高 (21.86%), 东北坡和西南坡值相近 (23.28%、24.22%); 粘粒含量在东南坡显著最低 (32.23%,  $P < 0.05$ ), 在西北、东北和西南坡向间存在差异, 但均不显著 ( $P > 0.05$ )。

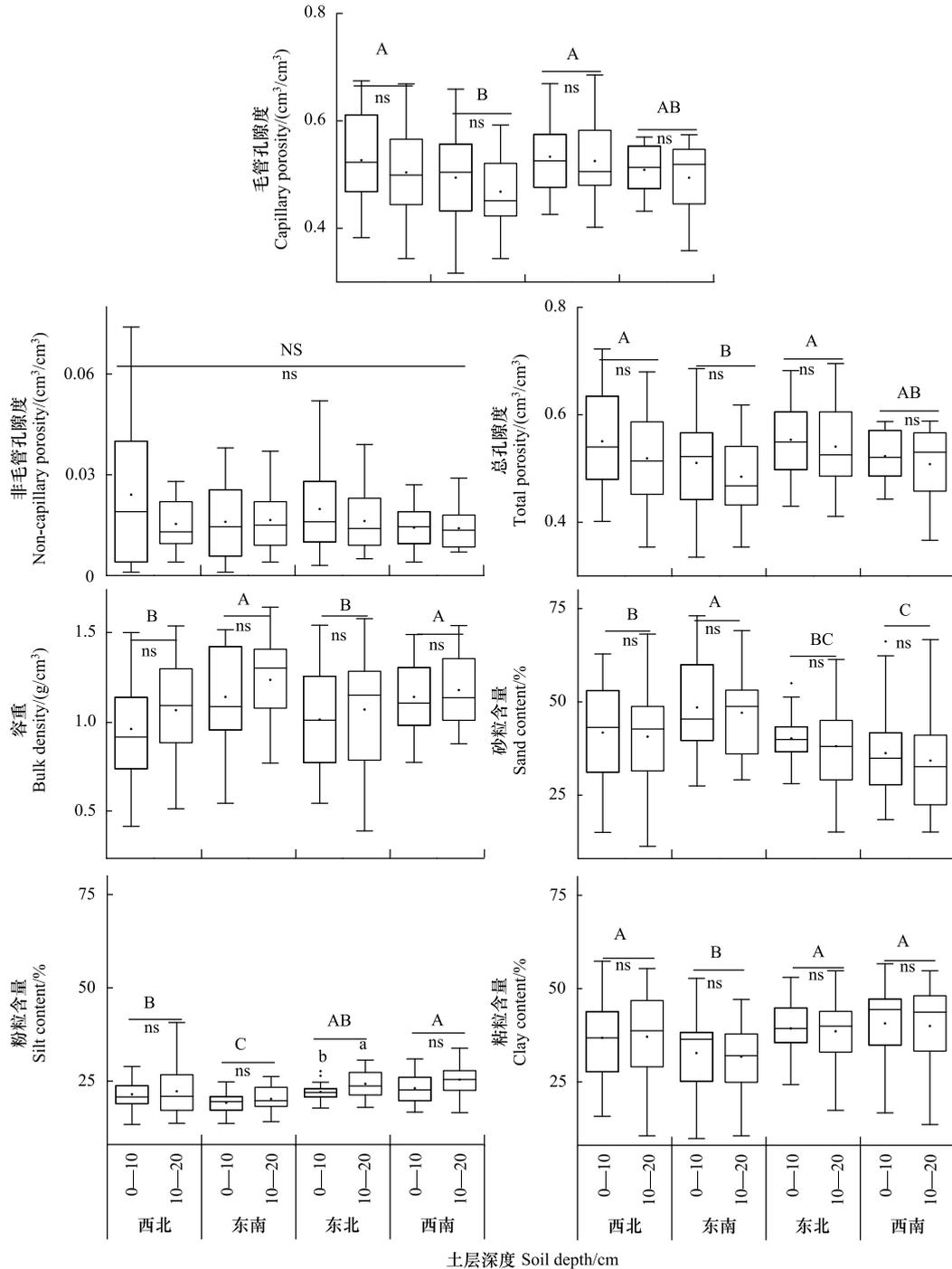


图 1 土壤物理性质的坡向分异

Fig. 1 Slope differentiation of soil physical properties

图中方框代表上下四分位数; 方框中线表示中位数; “-”代表最大和最小值; “•”表示平均值; 不同大写字母表示各指标在不同坡向间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示各指标在相同坡向下不同土层间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

由图 2 可知, 土壤全氮含量东南坡显著最低 (0.7 g/kg,  $P < 0.05$ ), 在西北、西南和东北坡向间存在差异, 但均不显著 ( $P > 0.05$ ); 土壤有机碳含量和碳氮比均为西南坡显著最低 ( $P < 0.05$ ), 均值范围分别为 10.81—

17.69 g/kg 和 11.07—17.69, 表现为东北>西北>东南>西南; 土壤交换性镁含量为东北坡显著最高(4.46 cmol/kg,  $P<0.05$ ), 东南、西北和西南坡值相近(3.34 cmol/kg、3.41 cmol/kg、3.62 cmol/kg); 土壤交换性钠含量表现为东北坡>西北坡>东南坡>西南坡, 在东南坡和西南坡之间差异不显著( $P>0.05$ ); 土壤交换性钾含量表现为西北坡和东南坡显著大于东北坡和西南坡, 在西北坡和东南坡或东北坡和西南坡之间差异不显著( $P>0.05$ )。

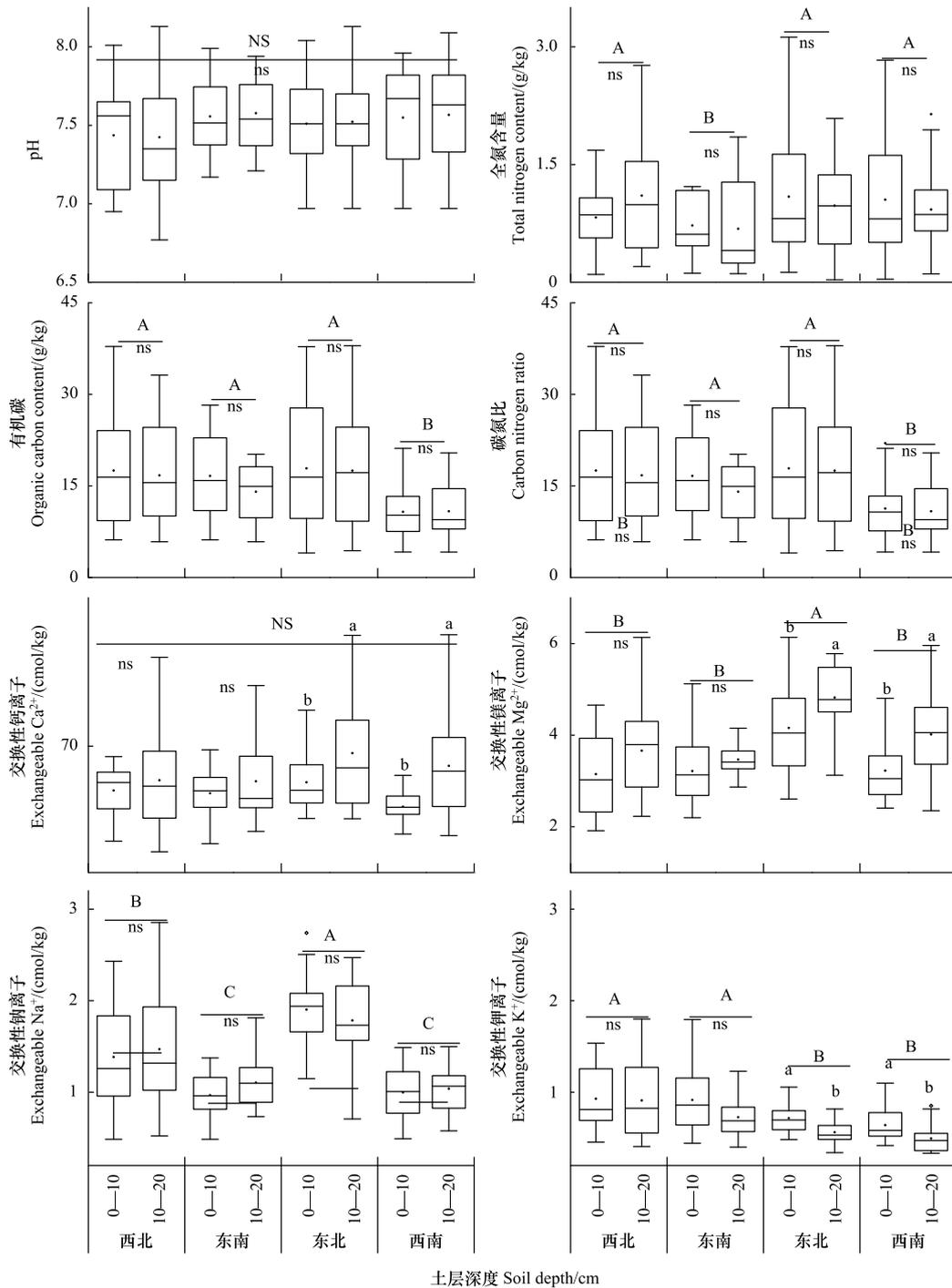


图 2 土壤化学性质的坡向分异

Fig.2 Slope differentiation of soil chemical properties

土壤非毛管孔隙、毛管孔隙、总孔隙、粘粒、全氮、有机碳、碳氮比和交换性镁含量在海拔梯度上的变化特征一致(图 3), 均随着海拔升高而显著增加( $P<0.01$ ), 相反, 土壤容重、pH、砂粒、交换性钙和钾含量随着海拔

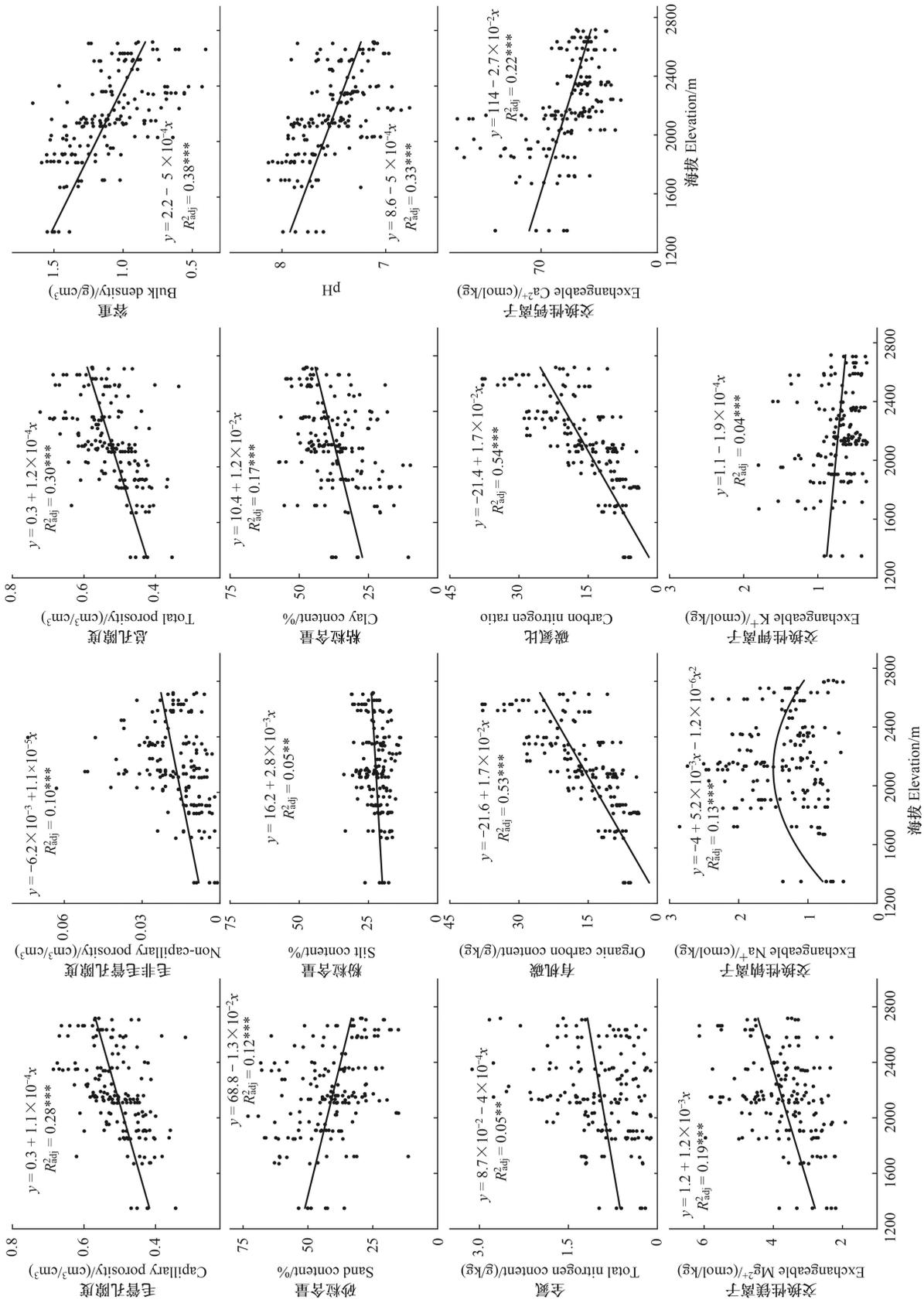


图3 不同海拔梯度土壤理化性质

$R_{adj}^2$ : 代表调整R方

升高而显著降低( $P<0.01$ ),而交换性钠含量随着海拔升高呈现先升高后降低的变化趋势。所有盐基离子中交换性钾变异程度最大( $CV=40.7\%$ ),变化范围为 0.33—1.8 cmol/kg,其次为交换性钾( $CV=38.9\%$ ),交换性镁变异程度最小( $CV=25.4\%$ ),变化范围为 1.91—6.14 cmol/kg。

## 2.2 土壤团聚体组成

由图 4 可知,研究区微团聚体粒级主要分布于 0.05—0.25 mm 和 0.002—0.05 mm 范围内。0.05—0.25 mm 粒级含量表现为东北>西南>东南>西北坡,而>0.25 mm 粒级含量则表现出相反的变化趋势,东南坡 0.002—0.05 mm 粒级含量显著小于其他坡向( $P<0.05$ )。土壤水稳性大团聚体粒级分布以>2 mm 粒级范围为主。>5 mm 粒级表现为东南>西北>西南>东北坡,2—5 mm 和 1—2 mm 粒级均表现为西北>东南>西南>东北坡。各坡向表层<0.002 mm 和<0.25 mm 粒级含量均高于表下层,而表层>5 mm 粒级含量低于表下层。

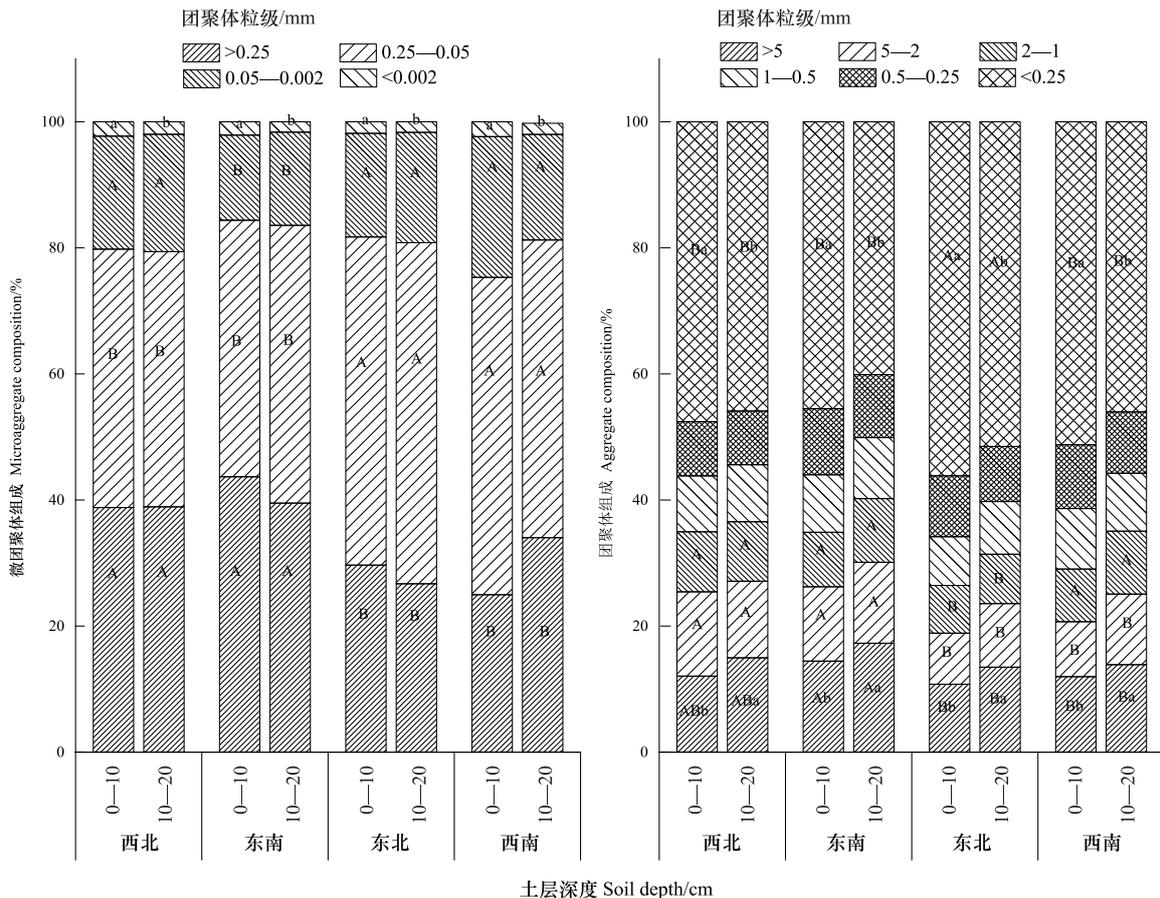


图 4 土壤团聚体组成的坡向分异

Fig.4 Slope differentiation of soil aggregate composition

由图 5 可知,>5 mm、2—5 mm 和 0.002—0.05 mm 范围内团聚体数量在海拔梯度上的变化趋势基本一致,均呈现逐渐下降的变化趋势。

## 2.3 土壤团聚体稳定性空间变化

多因素方差分析结果(表 2)表明,坡向对土壤分散率(CDR)、团聚度(DOA)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和团聚体分散度(PAD)均存在显著影响( $F=4.15-7.81, P<0.01$ );海拔对土壤团聚体 CDC、CDR、DOA 和 MWD 产生了显著影响( $F=1.22-12.59, P<0.05$ );土层对土壤团聚体 MWD 和 GMD 产生了显著影响( $F=9.1$  和  $6.95, P<0.05$ );各因子之间的交互作用中,坡向与海拔的交互作用对团聚体 CDC、CDR、DOA 和 GMD 产生了显著影响( $F=2.04-6.24, P<0.01$ ),海拔与土层的交互作用对团聚体 MWD 和 GMD 产生了显著影响( $F=2.52$  和  $2.19, P<0.05$ )。

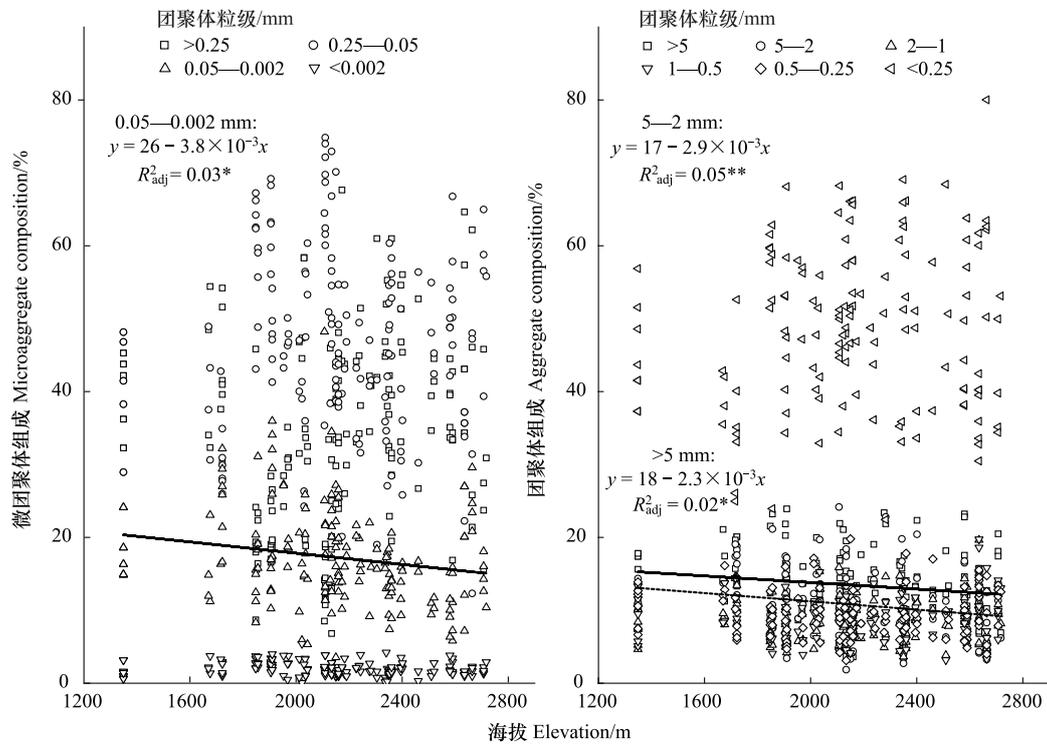


图 5 不同海拔梯度土壤团聚体组成

Fig.5 Soil aggregate composition at different altitude gradients

表 2 坡向、海拔与土层的多因素方差分析

Table 2 Multivariate ANOVA analysis of aspect, elevation and soil layers

因子 Factors	粘粒分散系数 Clay dispersion coefficient	粘粒分散率 Clay dispersion rate	团聚度 Degree of aggregation	平均质量直径 Mean weight diameter/mm	几何平均直径 Geometry mean diameter/mm	团聚体分散度 Percentage of aggregate disruption
	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>
坡向 Slope aspect	1.928	7.713 ***	6.488 ***	5.693 **	7.806 ***	4.149 **
海拔 Elevation	3.278 **	12.593 ***	10.539 ***	1.218 *	1.474	1.35
土层 Soil layer	2.338	0.494	3.918	9.1 **	6.949 *	2.99
坡向×海拔 Slope aspect×elevation	2.036 *	6.235 ***	4.898 ***	1.777	2.712 **	1.322
坡向×土层 Slope aspect×soil layer	0.755	0.289	0.31	0.842	0.508	0.21
海拔×土层 Elevation×soil layer	1.552	1.471	0.425	2.518 *	2.189 *	1.193
坡向×海拔×土层 Slope aspect×elevation×soil layer	1.047	0.774	0.683	1.318	1.33	0.554

表格中 \* 代表在  $P < 0.05$  处差异显著, \*\* 代表在  $P < 0.01$  处差异显著, \*\*\* 代表在  $P < 0.001$  处差异极显著

研究区土壤团聚体稳定性对坡向的响应不同(图 6)。土壤团聚体 CDC 表现为西北坡>东南坡>西南坡>东北坡,在东南坡和西南坡间差异不显著( $P > 0.05$ );土壤 DOA 为西南坡(136.48%)最高,东北和西北坡 DOA 值相近(112.04%、94.39%),东南坡最低(82.42%)。土壤团聚体 MWD 表现为东南(2.01 mm)和西北(1.98 mm)坡显著高于西南(1.7 mm)和东北(1.56 mm)坡( $P < 0.05$ );土壤 GMD 表现为东南坡>西北坡>西南坡>东北坡,土壤 PAD 与 GMD 呈相反的变化趋势。表下层土壤团聚体 DOA、MWD 和 GMD 均高于表层,而土壤团聚体 CDC 和 PAD 则表现为表层高于表下层,其中,在东南坡,MWD 和 GMD 两土层间存在显著差异( $P < 0.05$ )。

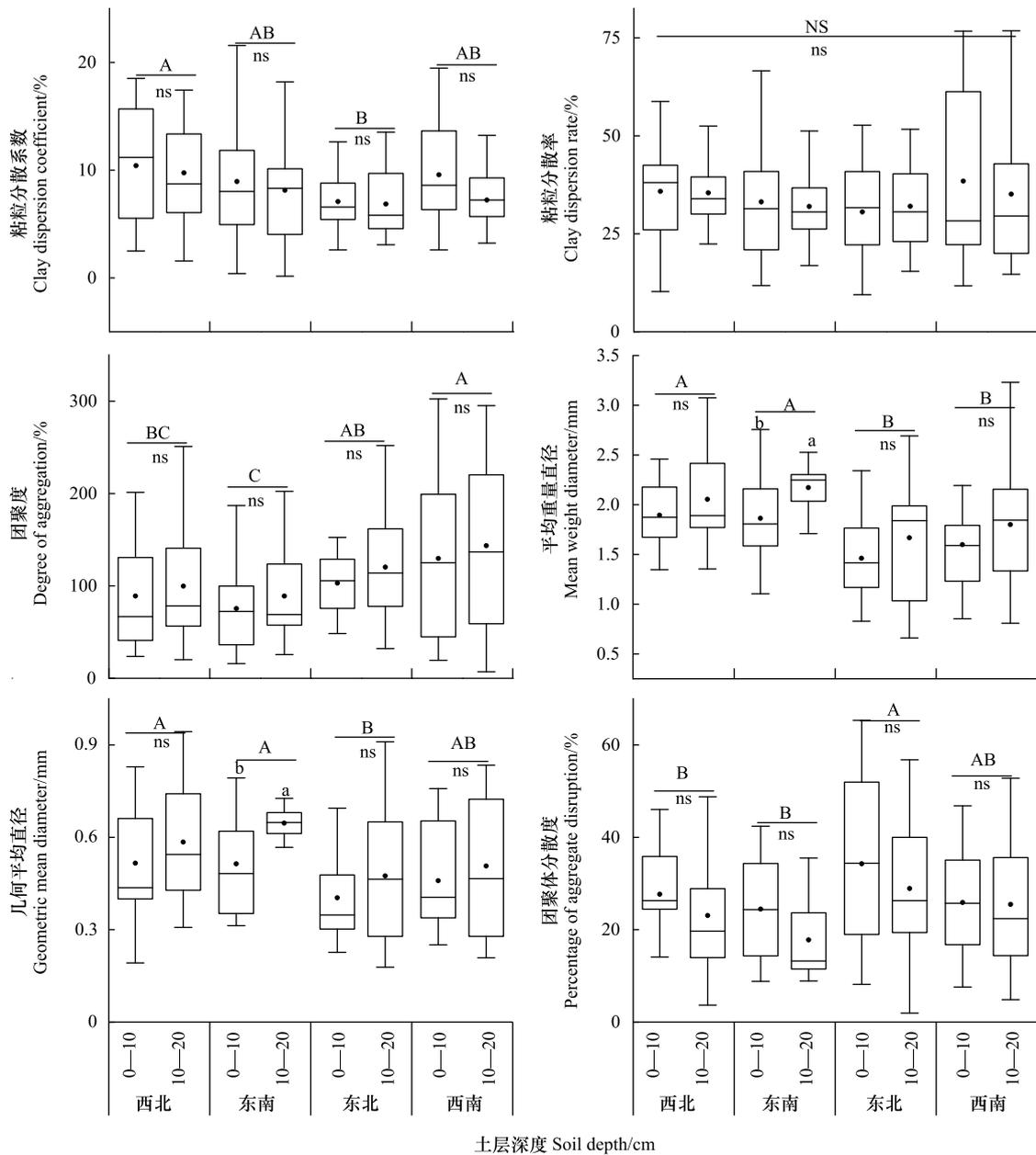


图 6 土壤团聚体稳定性的坡向分异  
 Fig.6 Slope differentiation of soil aggregate stability

如图 7 所示,土壤 CDC 和 CDR 随着海拔升高整体均呈现逐渐下降的变化趋势,而土壤 DOA 则随着海拔升高呈现逐渐上升的变化趋势,土壤 CDR 变异系数为 42%,在三种土壤<0.25mm 团聚体稳定性指标中最小。

随着海拔梯度的上升,表层和表下层土壤团聚体 MWD 均呈逐渐下降的趋势(图 8),变异系数为 28.8%;土壤 GMD 变化范围为 0.18—0.94 mm,变异系数为 36.9%,表层土壤 GMD 呈现出逐渐升高的趋势,而表下层 GMD 则呈现出逐渐下降的趋势;表层土壤 PAD 呈现先升高后降低的变化趋势,而表下层土壤 PAD 则呈现出逐渐升高的变化趋势。

2.4 土壤团聚体稳定性的影响因素

线性拟合结果(图 9)表明:土壤团聚体 CDC 与土壤砂粒和交换性 Ca<sup>2+</sup> 呈显著正相关关系(R<sup>2</sup> = 0.36 和 0.14, P<0.05),与土壤毛管孔隙度和粘粒含量呈显著负相关关系(R<sup>2</sup> = 0.15 和 0.35, P<0.05);团聚体 CDR 与

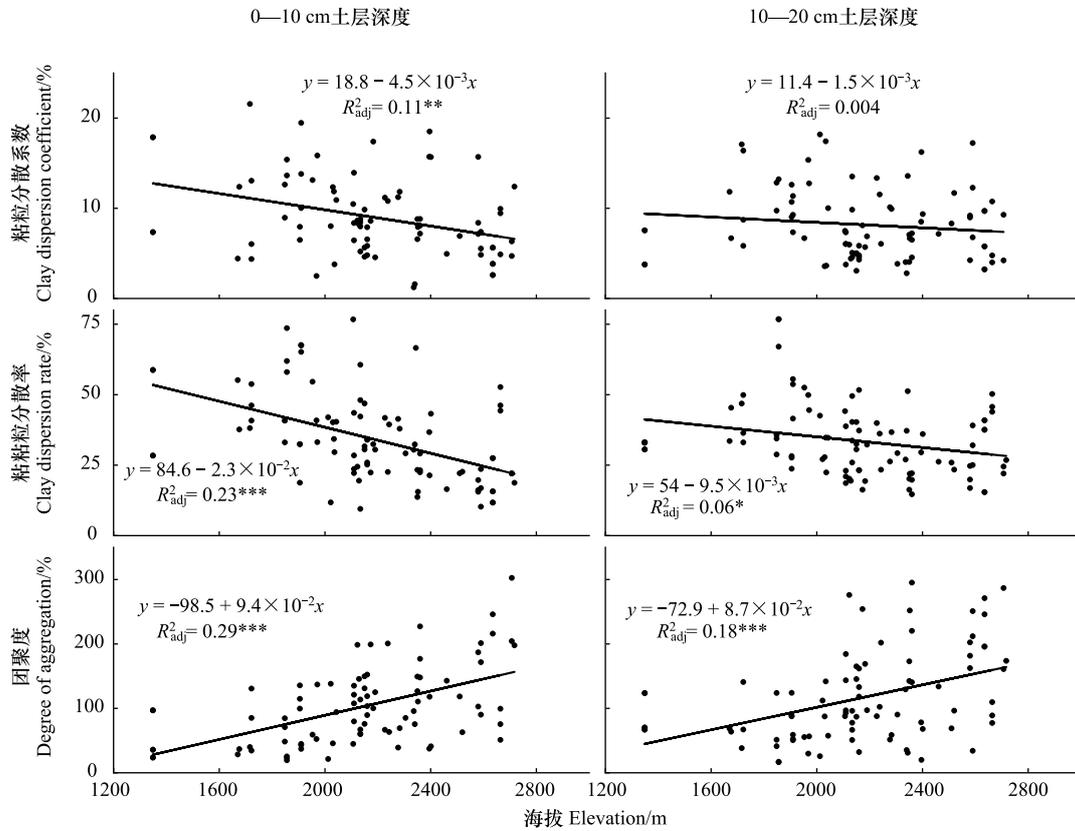


图7 不同海拔梯度土壤&lt;0.25mm 团聚体稳定性

Fig.7 Soil &lt;0.25 mm aggregate stability at different altitude gradients

土壤砂粒和交换性  $\text{Ca}^{2+}$  呈显著正相关关系 ( $R^2 = 0.39$  和  $0.25$ ,  $P < 0.01$ ), 与土壤毛管孔隙度、有机碳和粘粒含量呈显著负相关关系 ( $R^2 = 0.15$ ,  $0.18$  和  $0.45$ ,  $P < 0.05$ ); 团聚体 DOA 与土壤毛管孔隙度、有机碳和粘粒含量呈显著正相关关系 ( $R^2 = 0.22$ ,  $0.2$  和  $0.79$ ,  $P < 0.05$ ), 与土壤砂粒和交换性  $\text{Ca}^{2+}$  呈显著负相关关系 ( $R^2 = 0.81$  和  $0.25$ ,  $P < 0.01$ )。

冗余分析(图 10)表明,地形、植被综合盖度和土壤性质对土壤团聚体稳定性在第 I 轴、第 II 轴的解释量分别为 35.39% 和 31.3%。各调控因素中土壤粘粒、交换性  $\text{Mg}^{2+}$ 、容重和毛管孔隙度显著影响土壤团聚体稳定性,其贡献率分别为 36.2%、15%、9.1% 和 8.1%。其中团聚体 MWD 与土壤毛管孔隙度、粉粒含量和交换性  $\text{Mg}^{2+}$  显著负相关,与交换性  $\text{K}^+$  显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 团聚体 GMD 与交换性  $\text{Mg}^{2+}$  显著负相关,与交换性  $\text{K}^+$  显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 而团聚体 PAD 与土壤容重、毛管孔隙度和交换性  $\text{Mg}^{2+}$  均显著正相关 ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤团聚体稳定性对坡向的响应

贺兰山地区地形复杂多变,坡度坡向的不同影响着气温、降水等气象因素,其所造成的水热波动对植被状态和土壤性质等有重大影响,进而造成土壤微团聚体稳定性差异<sup>[25]</sup>。本研究中,与东北坡和西南坡相比,西北坡和东南坡 0.05—0.25 mm 团聚体含量显著降低,并且土壤粘粒分散系数(CDC)升高,团聚度(DOA)降低。这可能是由于土壤粘粒是土壤微团聚体形成的物质基础,高比例粘粒含量导致土壤较粗粒径微团聚体的数量增加<sup>[29]</sup>,东北坡与西南坡土壤粘粒含量较高,促进 0.05—0.25 mm 微团聚体的形成,使土壤团聚度降低,分散系数增加;另外,西北坡和东南坡土壤交换性钾离子含量较多,交换性  $\text{K}^+$  是很好的分散剂,使粘粒分散,土壤团聚受阻<sup>[30]</sup>,因此研究区西北坡和东南坡 0.05—0.25 mm 团聚体含量低于东北坡和西南坡。

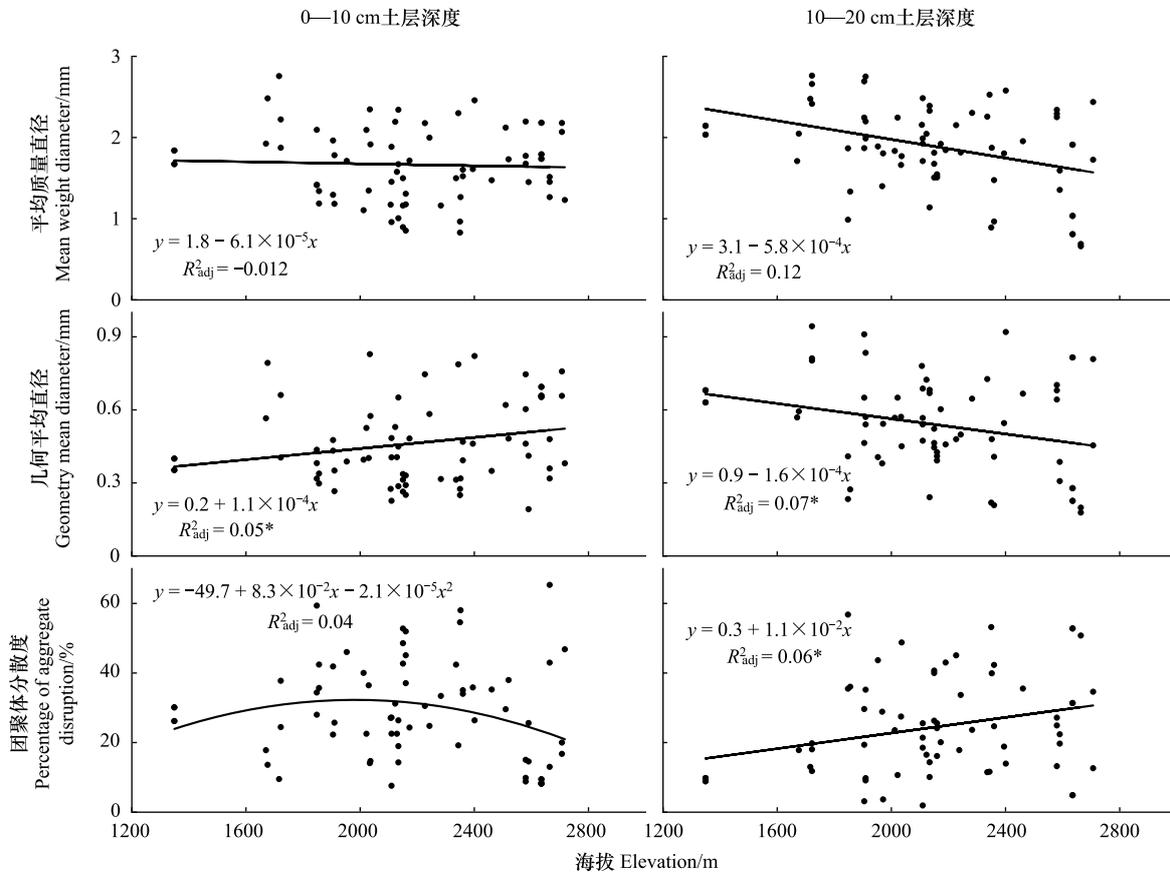


图 8 不同海拔梯度&gt;0.25mm 土壤团聚体稳定性

Fig.8 Different altitude gradients &gt;0.25mm soil aggregate stability

土壤团聚体稳定性表征了土壤结构在外力作用及环境变化下维持原有状态的能力。本研究中,综合土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)以及团聚体分散度(PAD)来看,研究区东北坡土壤结构最次,这与李禹江等<sup>[8]</sup>的研究结果相似。可能是因为研究区西坡区域以微坡和缓坡为主,而东坡区域地势起伏则较大<sup>[31]</sup>,相较于西坡,东坡土壤团聚体在降水作用下易随坡面崩解流失,降低土壤团聚体稳定性。对于东坡而言,由于西南坡水肥气热的组合条件优于东北坡,西南坡更易于形成大团聚体,故其土壤团聚体稳定性更强。郭全恩等<sup>[32]</sup>研究表明,土壤中镁离子主要分布在粒径>5 mm 或 2—5 mm 的土壤大颗粒中。本研究中,东北坡>2mm 粒级团聚体含量最低,由于高价阳离子会在黏土矿物和有机分子之间形成桥键<sup>[2]</sup>,所以  $Mg^{2+}$  含量的减少会影响团聚的强度。冗余分析表明,土壤黏粉粒含量同样是影响团聚体稳定性的重要因素(图 10)。Kemper 等<sup>[33]</sup>认为对于粘粒含量较高的土壤,交换性阳离子的水化作用会减弱土壤颗粒间的联接力,进而降低团聚体稳定性。

### 3.2 土壤团聚体稳定性对海拔的响应

土壤团聚体稳定性特征是多种因素综合作用的结果,海拔梯度会导致环境因子的差异,其中植被类型和土壤性质可以直接影响土壤团聚体特征。本研究中,高海拔的土壤粘粒含量大于低海拔,因此高海拔的土壤团聚度最大,分散系数和分散率较小,土壤中细小颗粒发生团聚作用,会使土壤中团聚度增大,增强土壤结构稳定性。由于低海拔区域干旱少雨,养分相对贫瘠,制约了植被生物量的积累;而高海拔区域,杜松林和青海云杉林等深根性树种,抗风能力强,将更多的生物量分配到地下部分,可以有效保持土壤结构的稳定性<sup>[21]</sup>。本研究中毛管孔隙度、有机碳和粘粒含量对微团聚体稳定性提升有促进作用,这与兰航宇等<sup>[26]</sup>结论一致。整体看来,研究区的云杉杜松林更有利于增强土壤结构稳定性,其立地土壤具有较高的孔隙度,郁闭度较大,为

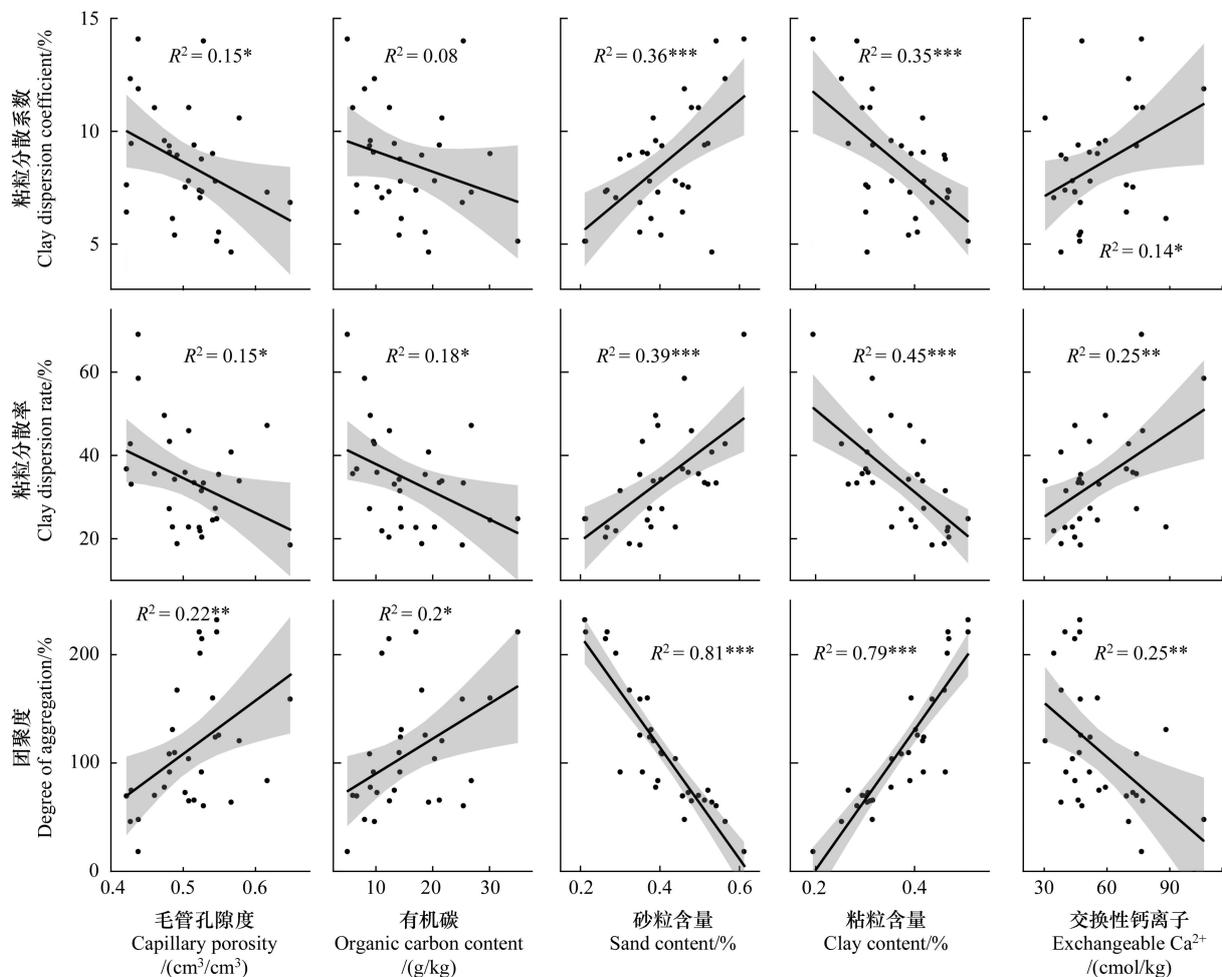


图9 土壤团聚体稳定性和主要因素相关分析

Fig.9 Analysis of soil aggregate stability and correlation of major factors

图中阴影部分代表 95%置信区间

林下土壤尤其是表下层土壤提供了良好的遮阴作用,减少土壤水分蒸发<sup>[21]</sup>,且林下物种相对丰富,凋落物质量较高<sup>[34]</sup>,土壤有机碳和全氮含量也较高,碳氮比接近 25:1,可为土壤提供充足的氮素,促进团聚体的稳定。相关分析结果表明,微团聚体 DOA 与交换性钙离子呈显著负相关关系。这可能是因为在半干旱干旱环境中,土壤碳酸钙含量过高,在溶解沉淀平衡过程中高价阳离子的溶解性减弱,不利于微团聚体的形成和团聚<sup>[35]</sup>。

>0.25mm 水稳性大团聚体可在一定程度上表征土壤结构和质量的好坏,其含量越高,土壤结构稳定性越好<sup>[36]</sup>。本研究发现,随着海拔的升高,土壤中>2mm 粒级团聚体含量逐渐减少,这与喻武等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。这可能与不同海拔梯度形成的不同植被类型有关,高海拔区域的亚高山草甸,地表植被多为茂密的草本植物,根系密集,土壤疏松,不利于大团聚体形成,团聚体受外力作用容易破碎,较大粒径的团聚体比例降低。本研究中,海拔对土壤团聚体稳定性的影响规律有所不同,这是由于土壤的风化发育程度会随海拔升高而降低,而非表层土壤由于表层植被凋落物以及表层土壤的保护作用,土壤颗粒组成保持着稳定性。随着海拔的升高,表层土壤 GMD 呈上升的趋势,该研究结果与 Zhu 等<sup>[38]</sup>在四川雪宝顶山得出的结果一致。这可能是由于随海拔梯度由低到高植被类型呈现荒漠草原,灌木林,乔木林的转变特征,植被覆盖度增加,凋落物数量<sup>[20]</sup>和根系分泌物增加使土壤有机质含量增加,加之植物根系的穿插缠绕作用<sup>[39]</sup>,提高了土壤团聚体稳定性。表下层土壤低海拔土壤团聚体稳定性高于高海拔土壤团聚体稳定性,MWD 和 GMD 值最大的都出现在蒙古扁桃灌木林。这可能是由于蒙古扁桃灌木林土壤含水率较低<sup>[40]</sup>,灌木植物生长条件受限,优势植物根系较为发

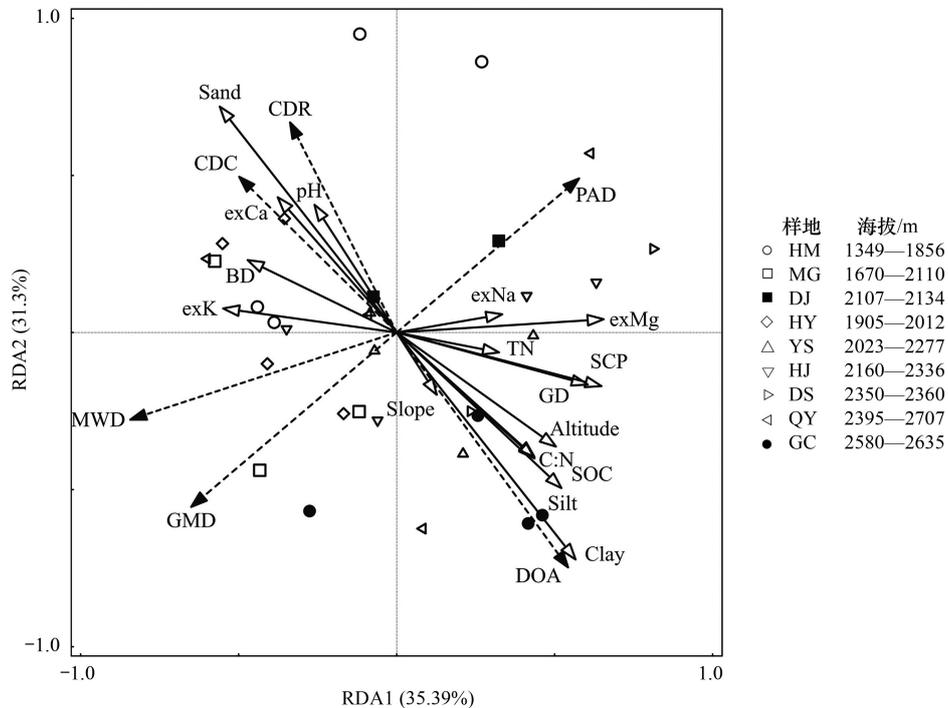


图 10 土壤团聚体稳定性与影响因素的冗余分析(RDA)

Fig.10 Redundancy analysis of soil aggregate stability and influencing factors (RDA)

GD: 植被综合盖度 Comprehensive vegetation cover; Slope: 坡度 Slope; SCP: 毛管孔隙度 Capillary porosity; BD: 容重 Bulk density; Sand: 砂粒 Sand; Silt: 粉粒 Silt; Clay: 粘粒 Clay; SOC: 有机碳 Organic carbon; C: N: 碳氮比 Carbon nitrogen ratio; TN: 全氮 Total nitrogen; exMg: 交换性镁离子 Exchange magnesium ions; exCa: 交换性钙离子 Exchange calcium ions; exNa: 交换性钠离子 Exchange sodium ions; exK: 交换性钾离子 Exchange potassium ions; HM: 西北坡、东南坡、东北坡、西南坡; MG: 西北坡、东南坡、东北坡; DJ: 西南坡; HY: 西北坡、东南坡、东北坡、西南坡; YS: 西北坡、东南坡、东北坡、西南坡; HJ: 西北坡、东南坡、东北坡、西南坡; DS: 东北坡、西南坡; QY: 西北坡、东南坡、东北坡、西南坡; GC: 西北坡、东南坡、东北坡、西南坡

达,且根系碳含量较高<sup>[41]</sup>,有利于较大的土壤颗粒和微团聚体利用根、菌丝和微生物分泌物等结合形成大团聚体<sup>[42]</sup>,所以蒙古扁桃灌木林在表下层土壤团聚体稳定性较强。本研究中交换性  $K^+$  对团聚体稳定性有促进作用,而毛管孔隙度和交换性镁离子起负向作用,这与吴新亮<sup>[43]</sup>研究结论一致。李丹妮等<sup>[44]</sup>研究发现,造成土壤团聚体在两个土壤层次间分离的主要影响因素为土壤容重、金属阳离子等。本研究中,一方面表下层孔隙度减小,导致有机碳积累受阻,进而影响土壤颗粒的粘合;另一方面由于雨水的淋溶作用,  $Mg^{2+}$  向下淋失,使表层交换性  $Mg^{2+}$  含量低于表下层,且随着海拔升高土壤 pH 逐渐下降,促进了交换性  $Mg^{2+}$  的解吸,从而导致团聚体破坏,减弱团聚体稳定性。

#### 4 结论

贺兰山不同坡向海拔土壤团聚体以  $>2$  mm 粒级大团聚体和 0.05—0.25 mm 粒级微团聚体为主。综合 CDC 和 DOA 分析,东北坡和西南坡土壤结构稳定性较优于西北坡和东南坡。随着海拔的上升,土壤微团聚体稳定性指标 DOA 呈极显著上升趋势 ( $P < 0.001$ )。其在海拔上的变化趋势主要受到土壤孔隙度、SOC、粘粒含量和交换性  $Ca^{2+}$  的调控。贺兰山东北坡 MWD 和 GMD 数值最低,土壤水稳性团聚体稳定性最差。随海拔升高,土壤中  $>2$ mm 粒级团聚体含量逐渐减少;表层土壤团聚体稳定性逐渐增强,而表下层团聚体稳定性团聚体稳定性逐渐减弱,在 1722 m 蒙古扁桃灌木林最高。海拔、坡度、植被综合盖度、土壤物理和土壤化学属性共同解释了土壤团聚体稳定性变化的 66.69%。土壤 BD、SCP、Clay 和交换性  $Mg^{2+}$  显著影响土壤团聚体稳定性。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 张彬, 赵天启, 贺启坤, 郑佳华, 赵萌莉. 放牧对短花针茅荒漠草原土壤团聚体组成及稳定性的影响. 应用生态学报, 2022, 33 (12): 3263-3270.
- [ 2 ] Amézketa E. Soil Aggregate Stability: A Review. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2/3): 83-151.
- [ 3 ] Guan S, An N, Zong N, He Y, Shi P, Zhang J, He N. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 116:224-236.
- [ 4 ] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 茶园土壤团聚体中微生物量碳、氮的分布特征. 中国农业科学, 2011, 44(15): 3162-3168.
- [ 5 ] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系. 环境科学, 2020, 41 (05): 2416-2424.
- [ 6 ] 王子龙, 胡斐南, 赵勇钢, 谭文峰, 赵世伟, 黄菁华, 张耀方, 杜璨, 尚应妮. 土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响. 水土保持学报, 2016, 30(5): 331-336.
- [ 7 ] 陈月明, 裴隆翠, 崔刚, 陈祥伟. 不同水土保持植被对典型黑土微团聚体稳定性的影响. 东北林业大学学报, 2019, 47(6): 26-30.
- [ 8 ] 李禹江, 张荣, 王琴, 张瀚文, 李婧, 王芳, 涂利华, 郝建锋. 坡向和坡位对夹金山灌丛土壤团聚体稳定性的影响. 云南大学学报:自然科学版, 2022, 44(3): 522-532.
- [ 9 ] van Hall R, Cammeraat L, Keesstra S, Zorn M. Impact of secondary vegetation succession on soil quality in a humid Mediterranean landscape. Catena, 2017, 149 836-843.
- [ 10 ] 马寰菲, 胡汗, 李益, 郭垚鑫, 任成杰, 赵发珠. 秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系. 环境科学, 2021, 42 (9): 4510-4519.
- [ 11 ] Murugan R, Djukic I, Keiblinger K, Zehetner F, Bierbaumer M, Zechmeister-Bolternstern S, Joergensen RG. Spatial distribution of microbial biomass and residues across soil aggregate fractions at different elevations in the Central Austrian Alps. Geoderma, 2019, 339: 1-8.
- [ 12 ] 曾江敏, 何丙辉, 苏锋, 李少华, 冯梦蝶, 毕赟斐, 谢荣仙, 黎俊敏. 喀斯特槽谷顺/逆向坡不同植被恢复下土壤微团聚体特征. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 109-115.
- [ 13 ] Abiven S, Menasser S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability-a literature analysis. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(1): 1-12.
- [ 14 ] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, Soriano-Soto M D. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. Catena, 2001, 44 (1): 47-67.
- [ 15 ] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [ 16 ] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils. Soil Research, 1991, 29(6): 815.
- [ 17 ] Barberis E, Marsan F A, Boero V, Arduino E. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons. European Journal of Soil Science, 1991, 42(4): 535-542.
- [ 18 ] Oades J M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. Geoderma, 1993, 56(1/2/3/4): 377-400.
- [ 19 ] 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研究. 生态学报, 2023, 43(19): 7950-7962.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 黄业芸, 邱开阳, 朱亚超, 谢应忠, 刘王锁, 杨壹, 王思瑶, 崔璐瑶, 鲍平安. 贺兰山不同海拔植被生物量与土壤分形特征和土壤水分的相关关系. 草业学报, 2023, 32 (12): 24-35.
- [ 22 ] 马东方, 袁再健, 吴新亮, 廖义善, 黄斌, 郑明国. 华南花岗岩侵蚀区不同植被类型坡面土壤有机碳分布和团聚体稳定性. 水土保持学报, 2020, 34(5): 137-144.
- [ 23 ] 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇. 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响. 环境科学, 2022, 43(7): 3752-3762.
- [ 24 ] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.
- [ 25 ] 张超, 刘国彬, 薛莲, 宋籽霖, 张昌胜. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征. 中国农业科学, 2011, 44(3): 507-515.
- [ 26 ] 兰航宇, 段文标, 陈立新, 曲美学, 王亚飞, 杨习锋, 孟思静, 陈佳. 不同林型树倒林隙内微立地类型的土壤微团聚体组成及其分形特征.

应用生态学报, 2020, 31(4):1097-1105.

- [27] 卢倩倩, 王恩姮, 陈祥伟. 季节性冻融对机械压实黑土微团聚体特征的影响. 北京林业大学学报, 2017, 39(3): 57-64.
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [29] 张治伟, 朱章雄, 文志林. 岩溶山地土壤微团聚体组成及其与土壤性质的关系. 水土保持学报, 2014, 28(1): 123-128, 135.
- [30] 何淑勤, 宫渊波, 郑子成, 孔祥东. 不同植被条件下土壤团聚体交换性  $K^+$ 、 $Na^+$  的分布特征. 水土保持学报, 2014, 28(6): 228-233.
- [31] 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.
- [32] 郭全恩, 曹诗瑜, 展宗冰, 南丽丽, 王卓, 张举军, 朱晓涛. 甘肃两种典型盐成土不同粒径土壤颗粒中盐分离子的分布特征. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 216-221.
- [33] Kemper W D, Rosenau R C, Dexter A R. Cohesion Development in Disrupted Soils as Affected by Clay and Organic Matter Content and Temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(4):860-860.
- [34] 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.
- [35] 陶澹, 马东豪, 张丛志, 陈林, 张佳宝. 石灰性土壤团聚体中钙形态特征及其与有机碳含量的关系. 土壤, 2021, 53(4): 715-722.
- [36] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 2002, 47(2): 133-149.
- [37] 喻武, 任德智, 杨文姬, 宋珺, 乔锋, 李晶. 西藏米拉山土壤团聚体垂直地带性特征. 西南大学学报:自然科学版, 2022, 44(7): 59-69.
- [38] Zhu M K, Yang S Q, Ai S H, Ai X Y, Jiang X, Chen J, Li R R, Ai Y W. Artificial soil nutrient, aggregate stability and soil quality index of restored cut slopes along altitude gradient in southwest China. *Chemosphere*, 2020, 246: 125687.
- [39] Zhang H Q, Liu Z K, Chen H, Tang M. Symbiosis of arbuscular mycorrhizal fungi and *Robinia pseudoacacia* L. improves root tensile strength and soil aggregate stability. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0153378.
- [40] 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.
- [41] 刘星. 贺兰山低山区不同海拔蒙古扁桃繁殖策略[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [42] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望. 土壤学报, 2023, 60(3): 627-643.
- [43] 吴新亮. 几种典型地带性土壤团聚体稳定机制及坡面侵蚀响应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [44] 李丹妮, 王天舒, 王丽, 黄山, 马秀玲, 尧水红. 不同种植模式对稻田土壤剖面构型及团聚体稳定性的影响. 中国土壤与肥料, 2023, (11): 1-8.