

贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究

吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 刘丽贞, 刘波, 祝忠有, 李学斌

(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,

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)

摘要: 以贺兰山不同海拔植被下 0—20, 20—40 cm 土层土壤为研究对象, 分析不同粒径团聚体含量及团聚体稳定性随海拔升高的变化特征, 探讨其与土壤理化性质之间的相关关系。结果表明: 0—20 cm 土层, 0.25~0.053 mm 团聚体为主要团聚体类型, 随海拔增加, 水稳性大团聚体(>0.25 mm) 含量增加, <0.053 mm 团聚体含量减少, 表明土壤团聚体随海拔增加呈现由小粒径向大团聚体转变的趋势。20—40 cm 土层, 水稳性大团聚体含量在中海拔(2 139 m) 达到最高, 占比为 65.73%。平均重量直径(MWD) 和几何平均直径(GMD) 在 0—20, 20—40 cm 土层均呈现随海拔升高先增加后减小的趋势, 并在 2 139 m 处达到峰值。不同海拔梯度土壤团聚体 MWD 和 GMD 与土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP) 粉粒以及砂粒含量呈正相关, 与黏粒含量、pH 呈负相关。贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体稳定性总体表现为中海拔>高海拔>低海拔, 较高含量的大团聚体和土壤养分是团聚体稳定的关键要素。

关键词: 贺兰山; 海拔梯度; 土壤团聚体; 稳定性; 影响因子

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)02-0210-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.028

Study on Distribution and Stability of Soil Aggregate Under Vegetation at Different Elevations in Helan Mountains

WU Mengyao, CHEN Lin, PANG Danbo, LIU Lizhen, LIU Bo, ZHU Zhongyou, LI Xuebin

(Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological

Restoration in Northwest China, Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of

Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: The soil of 0—20 and 20—40 cm layers under different vegetations along an elevation gradient of Helan Mountains were investigated. We analyzed the variation characteristics of aggregate content of different particle sizes and aggregate stability with the increasing elevation, and explored the correlation between soil physicochemical properties and aggregate stability. The results showed that 0.25~0.053 mm aggregates were the main aggregates in 0—20 cm soil layer. With the increases in elevation, the contents of water—stable macroaggregates (>0.25 mm) increased, and the contents of <0.053 mm aggregates decreased, indicating that the soil aggregates changed from small particle size to large aggregates with the increasing elevation. In the 20—40 cm soil layer, the contents of water—stable macroaggregates reached the highest at mid—elevation (2 139 m), which was 65.73%. The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) at both 0—20 and 20—40 cm soil layers increased first and then decreased with the increasing elevation, with the peak value at 2 139 m. The MWD and GMD of soil aggregates in different elevation gradients were positively correlated with soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), silt and sand content, and negatively correlated with clay content and pH. These results suggested that the overall stability of soil aggregates along the elevations of Helan Mountains were ranked as medium elevations>high altitude>low altitude. Higher content of macroaggregates and soil nutrients contributed to the stability of aggregates.

Keywords: Helan Mountains; elevation gradient; soil aggregates; stability; effecting factors

收稿日期: 2020-09-10

资助项目: 宁夏重点研发计划项目(2018BFG02015); 国家自然科学基金项目(31960359); 第三批宁夏青年科技人才托举工程项目(TJGC2018068); 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03102)

第一作者: 吴梦瑶(1994—), 女, 硕士, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: wmy201809@163.com

通信作者: 李学斌(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn

土壤团聚体(soil aggregates)是土壤结构的基本单位,其组成和稳定性在维持土壤结构、提高土壤质量中具有重要作用^[1-2]。作为土壤的主要组成部分,团聚体不仅能维持土壤孔隙、减少侵蚀和防止水土流失,还可以限制土壤中氧气的扩散,影响微生物群落结构,保护有机质和储存土壤养分,是衡量土壤质量的重要指标^[3-4]。不同粒级团聚体的数量和比例在维持团聚体稳定机制以及改善土壤结构中的作用不同^[5-6],其中>0.25 mm 水稳性大团聚体含量是影响土壤团聚体稳定性的主要因素^[7-10]。分析团聚体的空间分布和稳定性对稳定土壤结构、提高土壤质量和土壤可持续发展具有重要意义。

在山地生态系统中,土壤团聚体组分在很大程度上受植被类型、海拔和坡度等因素的影响^[11]。海拔梯度作为一种自然地理变化,对植被群落带谱分布以及土壤理化性质和微生物群落结构等变化都有影响^[11]。目前,关于海拔梯度土壤团聚体分布及其稳定性研究的结果不尽相同。例如,Murugan 等^[12]研究发现,阿尔卑斯山高海拔具有较高含量的大团聚体,而中海拔呈现较高的团聚体稳定性,在武夷山的研究^[13]中也发现,土壤团聚速率随海拔的升高而增大。相反,魏震等^[14]在祁连山的研究表明,水稳性团聚体含量随海拔升高呈现先增大后减少的趋势。北半球中高纬度亚高山和干旱半干旱地区森林生态系统对气候变化响应敏感,其植被分布、土壤理化性质和气候因子的空间变化可能引起土壤结构和团聚体稳定性发生相应的变化^[15]。因此,研究该区域不同海拔土壤团聚体分布及其稳定性对研究土壤有机质的稳定以及有机碳的储存具有重要意义。

贺兰山位于我国温带草原区与荒漠区的分界处,

是我国风沙区干旱山地森林生态系统的典型代表,其植被类型复杂多样且生态系统具有较高的脆弱性。贺兰山植被具有明显沿海拔梯度的垂直分布规律,随海拔的升高,植被类型分别为荒漠草原、山地疏林草原、山地针叶林和亚高山灌丛草甸或高山草甸^[16]。鉴于此,本文选择贺兰山不同海拔梯度 5 种典型植被下的土壤为研究对象,探究土壤团聚体及其稳定性沿海拔梯度的变化规律,以期为深入研究贺兰山及脆弱山地生态系统养分循环及调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贺兰山位于宁夏和内蒙的交界处(38°13′—39°30′N, 105°41′—106°41′E),南北走向,山体孤立,总面积 4 100 km²,主峰 3 556.15 m。贺兰山具有典型的温带大陆性气候特征,山体日照充足,无霜期为 60~70 天。随山体垂直高度的变化,气候具有明显的差异,年均气温由山前 7.3 ℃至主峰 0.9 ℃,降水由山麓至顶峰为 200~500 mm,且主要集中在 7—9 月。贺兰山土壤具有明显的垂直分布规律,沿海拔自下而上分别为灰漠土、棕钙土、灰褐土、亚高山草甸土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地的选择与设计 在贺兰山自然保护区内,沿海拔梯度(1 380~2 438 m)由下至上分别选择面积为 100 m×100 m 的 5 种典型植被:荒漠草原(1 380 m)、蒙古扁桃灌丛(1 650 m)、油松林(2 139 m)、松杨混交林(2 249 m)和青海云杉林(2 438 m)地作为试验样地,每个样地内随机布设 3 个样方。荒漠草原样方面积为 1 m×1 m;灌木样方为 5 m×5 m;乔木林样方为 20 m×20 m,不同样方之间至少间隔 20 m。用每木检尺法对森林样地进行植被调查,样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

海拔/ m	地理 坐标	坡向	坡度/ (°)	植被 类型	郁闭度	胸径/ cm	平均 树龄/a	土壤 类型	植被状况
1380	38°41′16″N 105°58′39″E	N5	12	荒漠草原	—	—	—	灰钙土	草本:猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit.)+猪毛菜(<i>Salsola laricifolia</i> Pall.)+针茅(<i>Stipa capillata</i> Linn.)群丛
1650	38°44′42″N 105°56′09″E	NW30	10	蒙古扁桃灌丛	0.20	—	—	粗骨土	灌木:蒙古扁桃(<i>Amygdalus mongolica</i> (Maxim.) Ricker.)+狭叶锦鸡儿(<i>Caragana stenophylla</i> Pojark.)+薄皮野丁香(<i>Leptodermis oblonga</i> Bunge.)群丛;草本:针茅+白莲蒿(<i>Artemisia stechmanniana</i> Ledeb.)群丛
2139	38°45′11″N 105°54′42″E	N30	34	油松林	0.60	12.59	75	淋溶灰褐土	乔木:油松(<i>Pinus tabulaeformis</i> Carrière.)+杜松(<i>Juniperus rigida</i> Sieb. et Zucc.)群丛;灌木:栒子(<i>Cotoneaster hissaricus</i> Wall. ex Lindl.)+忍冬(<i>Lonicera japonica</i> Thunb.)+小檗(<i>Berberis thunbergii</i> DC.)群丛;草本:早熟禾(<i>Poa annua</i> Steud.)+唐松草(<i>Thalictrum aquilegifolium</i> var. <i>sibiricum</i> Linnaeus.)+苔草(<i>Carex muliensis</i> Nees.)群丛
2249	38°44′18″N 105°54′43″E	N30	15	松杨混交林	0.55	10.36	80	淋溶灰褐土	乔木:油松+杜松+山杨(<i>Populus davidiana</i> Dode.)+青海云杉(<i>Picea crassifolia</i> Kom.)群丛;灌木:栒子+小檗+忍冬群丛;草本:早熟禾+唐松草+小红菊(<i>Chrysanthemum chanetii</i> (Levl.) Shih.)群丛
2438	38°46′25″N 105°54′03″E	NW30	23	青海云杉林	0.60	11.51	80	淋溶灰褐土	乔木:青海云杉+杜松群丛;灌木:小檗+虎榛子(<i>Ostryopsis davidiana</i> Decne.)+银露梅(<i>Potentilla glabra</i> Lodd.)群丛;草本:苔草+禾本科+唐草草群丛

1.2.2 样品的采集与分析 土壤样品于 2019 年 9 月采集。考虑到山地土层厚度不均,不同样地取样深度统一为 0—40 cm。在每个样方内,选择能够反映该样地基本特征、具有代表性的地段除去表面枯落物,采用“五点法”分 2 层(0—20,20—40 cm)采集土壤样品,将同一层的土样混合后带回实验室。同时,在对应剖面上用环刀取原状土用于容重测定并取原状土小心装入铝盒带回,用于团聚体分析。

铝盒中的土样带回实验室后除去石块和粗根后沿土壤自然结构面轻扳为直径 10 mm 的土块,自然风干后过 10 mm 筛。过筛后的样品用湿筛法^[6]进行团聚体分离,分别筛出粒径>2,2~0.25,0.25~0.053,<0.053 mm 粒级的土壤团聚体。混合土样自然风干后进行理化性质的测定。土壤机械组成采用激光粒度分析仪(Mastersizer 3000E)进行分析,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。其中,全磷待测液制备具体方法为:称取 0.5 g 风干土样于消化管中浸润,滴加 8 mL 浓硫酸和 10 滴 70%~72% HClO₄ 消煮 1~2 h,冷却后量取 5 mL 滤液稀释至 30 mL,随后滴加 2~3 滴二硝基酚指示剂和 NaOH 溶液至溶液变黄后加入 5 mL 钼锑抗显色剂,定容至 50 mL,静置 30 min 待测^[17]。

土壤平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)以及土壤分形维数(*D*)通常用来反映团聚体的粒级分布及稳定性,计算公式为:

$$MWD=\sum_{i=1}^n(W_i/M_T)\overline{X}_i \tag{1}$$

$$GMD=\exp(\sum_{i=1}^n W_i \ln \overline{X}_i) \tag{2}$$

式中:*W_i* 表示第 *i* 级团聚体的重量(g);*M_T* 为团聚体总重量(g); $\overline{X}_i$ 表示第 *i* 级团聚体的平均直径(mm)。在该研究中,各粒级团聚体的平均直径分别为 6,1.125,0.151 5,0.026 5 mm。

土壤团聚体的分形维数采用杨培岭等^[18]推导的计算公式:

$$\frac{M(r<\overline{X}_i)}{M_T}=(\frac{\overline{X}_i}{X_{max}})^{3-D} \tag{3}$$

两边同时取对数可得:

$$\log_{10}[\frac{M(r<\overline{X}_i)}{M_T}]= (3-D)\log_{10}(\frac{\overline{X}_i}{X_{max}}) \tag{4}$$

以 $\log_{10}[\frac{M(r<\overline{X}_i)}{M_T}]$ 和 $\log_{10}(\frac{\overline{X}_i}{X_{max}})$ 为坐标轴,

通过数据拟合,可求得 *D*。

式中: $\overline{X}_i$ 表示第 *i* 级团聚体的平均直径(mm);*M*(*r*< $\overline{X}_i$) 为粒径小于 $\overline{X}_i$ 的团聚体的重量;*M_T* 为团聚体的总重量(g);*X_{max}* 为团聚体的最大直径(mm)。

1.3 数据处理

利用 SPSS 22.0 软件进行数据处理,采用单因素方差分析(One-way-ANOVA)检验不同海拔土壤理化性质、团聚体粒径分布及稳定性的差异显著性,采用双因素方差分析(Two-way-ANOVA)检验海拔、土层深度及其交互作用对团聚体稳定性的影响,显著水平为 0.05。采用 Canoco 4.5 分析团聚体粒径分布及其稳定性的影响因素。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度土壤理化特性

从表 2 可以看出,不同海拔梯度下土壤理化性质差异显著。粉粒和砂粒为贺兰山主要的土壤颗粒组成,除 1 650 m 外,粉粒含量随海拔升高降低,砂粒含量随海拔升高增加,黏粒含量在 1 380 m 处显著高于其他各海拔含量(*P*<0.05)。0—20 cm 土层,SOC、TN 含量随着海拔的升高而增加,土壤 pH 随着海拔的升高而减小,TP 含量与海拔的变化不相关。SOC、TN、和 TP 在 2 438 m 的含量均显著高于其他海拔,分别为 52.63,4.60,0.75 g/kg。20—40 cm 土层,SOC 和 TN 含量的变化与 0—20 cm 土层一致,均随海拔升高增加,pH 随海拔变化呈现波动,其变化范围为 7.74~8.46,在 1 650 m 达到最高,为 8.46。整体来看,0—20 cm 土层中 SOC、TN、TP 的含量高于 20—40 cm 土层,黏粒含量低于 20—40 cm 土层。

2.2 不同海拔梯度土壤团聚体分布特征

各粒级土壤团聚体百分含量在贺兰山不同海拔有显著差异。由图 1 可知,在 0—20 cm 土层,除 2 438 m 外,各海拔土壤团聚体均呈现出 0.25~0.053 mm 粒级团聚体含量最高,变化范围为 32.46%~44.81%。在 1 380 m 和 1 650 m 的低海拔样地,水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量显著低于高海拔的多样地,而<0.053 mm 的团聚体含量显著高于其他高海拔样地,且该粒级团聚体的含量随海拔上升而减少(*P*<0.05)。不同海拔样地中,各粒级团聚体含量均表现为先增加再减少。在 20—40 cm 土层,水稳性大团聚体在中海拔(2 139 m)达到最高,为 65.73%。0.25~0.053 mm 和<0.053 mm 粒级的团聚体在各海拔的分布为:2 438 m>1 650 m>1 380 m>2 249 m>2 139 m 和 1 650 m>1 380 m>2 249 m>2 438 m>2 139 m。

2.3 不同海拔梯度土壤团聚体稳定性

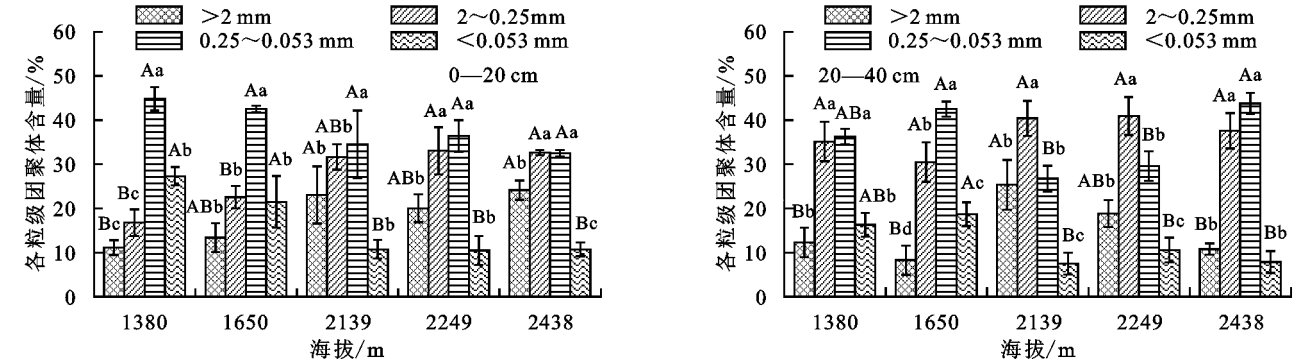
土壤团聚体 MWD 和 GMD 在贺兰山随海拔变化的趋势一致,均呈现先增加后减小的趋势,并在 2 139 m 处达到最高(图 2)。*D* 的变化趋势与 MWD 和 GMD 相反,随海拔升高先减小,到 2 139 m 降到最低,随后开始增加。在 0—20 cm 土层,中高海拔(2 139~2 438 m)

团聚体的 MWD 和 GMD 显著高于低海拔(1 380~1 650 m)样地, D 显著低于低海拔样地。在 20—40 cm 土层,MWD 和 GMD 在 2 139 m 处达到最高,分别为 2.02,0.77 mm,显著高于其他海拔($P<0.05$)。双因素方差分析(表 3)结果显示,海拔对土壤团聚体稳定性有显著影响($P<0.01$)。

表 2 不同海拔土壤因子特性分析

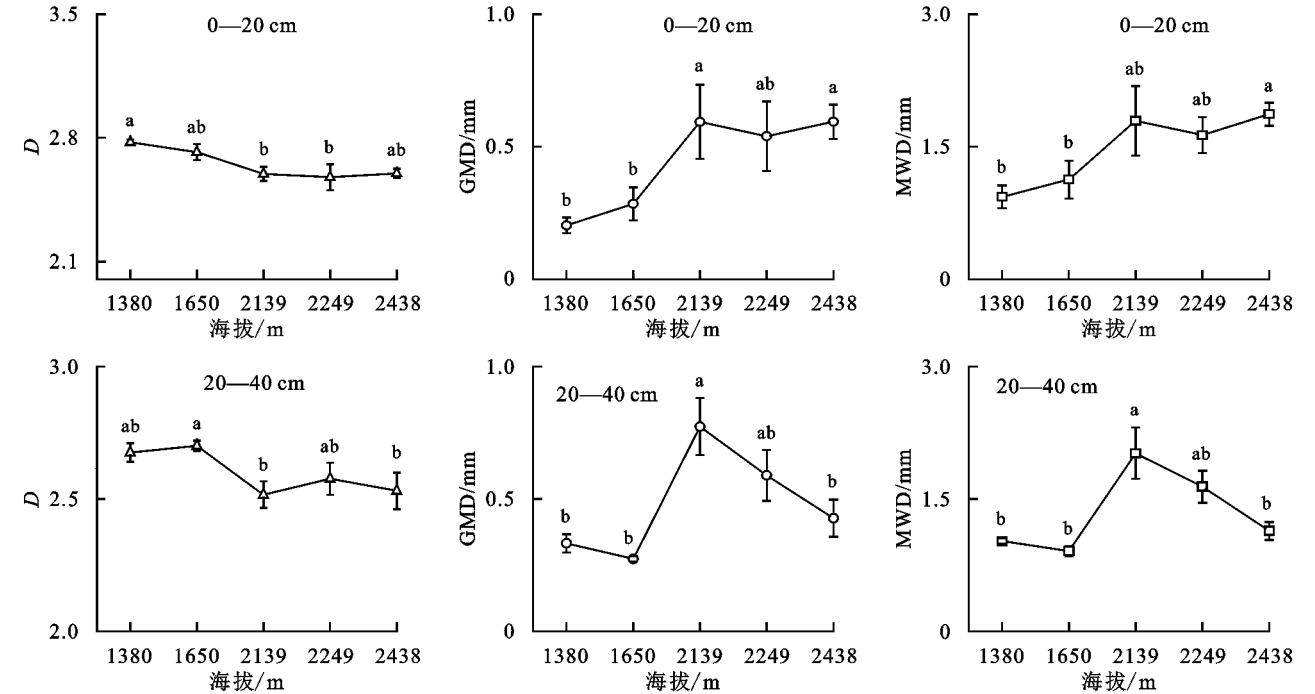
土层深度/cm	海拔/m	土壤机械组成/%			pH	有机碳 SOC/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	全磷 TP/ (g·kg ⁻¹)
		黏粒(<2 μm)	粉粒(2~20 μm)	砂粒(20~2000 μm)				
0—20	1380	4.49±0.14a	55.17±0.30a	40.33±0.36b	8.51±0.04a	11.74±1.30c	1.19±0.12d	0.47±0.04b
	1650	2.27±0.43b	41.76±5.77b	55.47±6.19ab	8.35±0.05a	18.53±2.08c	1.62±0.12d	0.59±0.01b
	2139	2.22±0.27b	49.15±2.85ab	48.64±3.11b	7.89±0.09b	37.70±4.22b	2.73±0.18c	0.52±0.02b
	2249	2.44±0.21b	47.93±1.65ab	49.63±1.85b	7.69±0.01c	42.60±1.45b	3.38±0.24b	0.51±0.02b
	2438	1.36±0.07c	36.00±0.22b	62.64±0.30a	7.60±0.02c	52.63±3.54a	4.60±0.23a	0.75±0.03a
20—40	1380	4.46±0.64a	54.56±1.75ab	40.99±2.11bc	8.44±0.12a	9.69±1.37c	1.04±0.13c	0.43±0.07b
	1650	2.65±0.24b	45.88±2.56c	51.47±2.77a	8.46±0.04a	12.83±0.92c	1.12±0.12c	0.59±0.00a
	2139	3.43±0.28ab	60.56±3.13a	36.01±3.40c	7.75±0.02c	22.30±0.55bc	1.67±0.09bc	0.31±0.06b
	2249	3.01±0.31b	53.40±1.62b	43.59±1.80bc	7.74±0.03c	25.47±5.31b	2.13±0.36bc	0.42±0.04b
	2438	1.94±0.20b	44.76±1.32b	53.30±1.15a	7.56±0.03b	38.23±5.12a	3.04±0.27a	0.66±0.03a

注:表中数据为平均值±标准误;不同小写字母表示同一土层不同海拔土壤存在显著差异($P<0.05$)。



注:不同小写字母表示同一海拔不同粒级间显著差异($P<0.05$);不同大写字母表示相同粒级不同海拔间存在显著差异($P<0.05$)。

图 1 不同海拔土壤团聚体分布



注:不同小写字母表示不同海拔间呈显著差异($P<0.05$)。

图 2 不同海拔土壤团聚体水稳性指标

表 3 海拔和土层及其交互作用对土壤团聚体稳定性指标影响的双因素方差分析

稳定性	海拔		土层		海拔×土层	
	F	P	F	P	F	P
MWD	7.937	0.001	0.961	0.339	1.723	0.185
GMD	9.156	<0.001	0.447	0.512	1.255	0.320
D	6.242	0.002	3.218	0.088	0.387	0.815

2.4 土壤团聚体分布及稳定性的影响要素

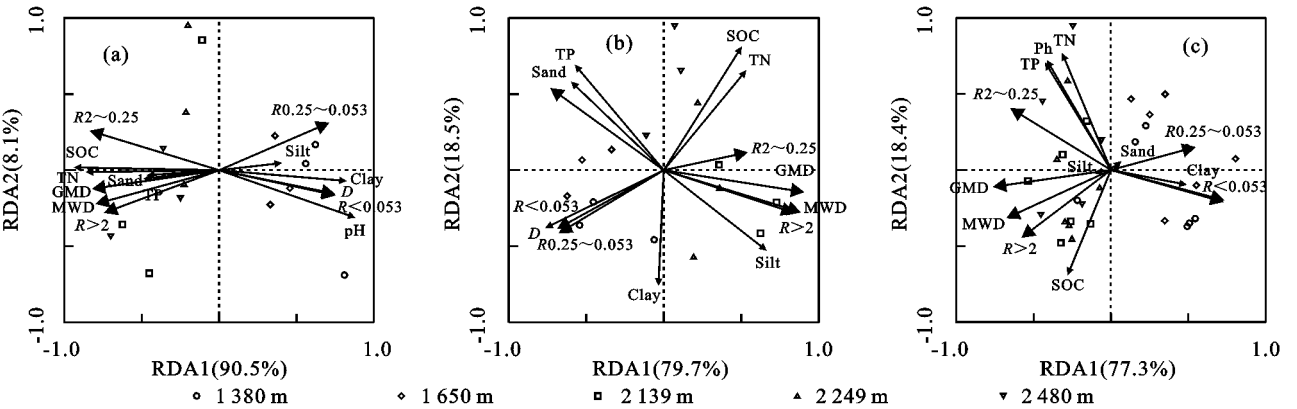
对贺兰山不同海拔梯度土壤团聚体粒径分布及稳定性指标与土壤理化性质进行冗余分析。结果(图 3a)表明,在 0—20 cm 土层,各土壤理化性质对团聚体特征影响的前 2 轴累积解释量为 98.6%,各粒径土壤团聚体随海拔升高呈现由小粒径团聚体向大粒径团聚体转变的趋势。SOC、TN、TP 和砂粒的含量与 >2 mm 以及 2~0.25 mm 粒径的团聚体呈正相关,与 0.25~0.053 mm 以及 <0.053 mm 粒径的团聚体呈负相关;黏粒含量和粉粒含量以及 pH 与 >2 mm 以及 2~0.25 mm 粒径的团聚体呈负相关,与 0.25~0.053 mm 以及 <0.053 mm 粒径的团聚体呈正相关。20—40 cm 土层(图 3b),土壤理化性质前 2 轴的解釋量为 98.2%。TP 和砂粒含量与 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒径的团聚体呈正相关,与 >2 mm 和 2~0.25 mm 粒径团聚体呈负相关;砂粒含量与 >2 mm 和 2~0.25 mm 粒径团聚体呈负相关,其余各粒径团聚体与土壤理化性质的相关性与 0—20 cm 土层一致。综合分析(图 3c)结果表明,TN、TP、pH 和砂粒含量与 2~0.25 mm 粒径团聚体正相关。团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 在不同土层与土壤

理化指标的相关性变化与>2 mm 团聚体一致。通过 Monte Carlo 置换检验排序,研究土壤理化性质对团聚体组分及稳定性影响的重要程度。结果(表 4)表明,在 0—20 cm 土层,SOC 对团聚体的影响达到显著水平($P<0.01$),解释量为 51%,20—40 cm 土层 pH 和粉粒含量的解释量分别为 35%和 24%,达到显著水平。综合分析结果显示,SOC 和粉粒含量对土壤团聚体影响显著,解释量分别为 18%和 11%。

3 讨论

3.1 不同海拔梯度土壤团聚体分布及稳定性

通常将粒径>0.25 mm 的团聚体($R_{0.25}$)称为水稳性大团聚体,该粒径是土壤中最好的结构体,具有较强的抗侵蚀能力^[19]。本研究发现,随着海拔的升高,土壤中大团聚体的含量逐渐增多,且在中海拔(>2 139 m)含量超过团聚体总量 1/2,这主要与不同海拔梯度形成的不同植被类型有关。随海拔梯度升高,贺兰山植被类型呈现荒漠草原—灌丛—乔木林的转变特征,乔木林地植被覆盖度大,有大量的凋落物和较厚的腐殖质层,增加了外源有机质的输入,促进土壤中小粒径的团粒结构胶结形成大团聚体,这与前人^[13,20-21]关于不同植被带土壤团聚体分布的研究结果一致。土壤团聚体是由根系、菌丝缠绕形成的结构,在中高海拔的乔木林地,树木根系以及植物的细根相互缠绕联结,并且释放根系分泌物促进了大团聚体的形成以及增加了土壤结构的稳定性^[22]。除此之外,本研究还发现,2 249 m 处水稳性大团聚体含量低于 2 139 m 和 2 438 m,这可能与该样地较低的郁闭度有关。



注:(a)为 0—20 cm 土层;(b)为 20—40 cm 土层;(c)为综合分析;TN 为全氮含量;TP 为全磷含量;SOC 为有机碳含量;Clay 为粉粒含量;Silt 为黏粒含量;Sand 为砂粒含量; $R>2$ 为粒径>2 mm 团聚体含量; $R_{2\sim0.25}$ 为粒径 2~0.25 mm 团聚体含量; $R_{0.25\sim0.053}$ 为粒径 0.25~0.053 mm 团聚体含量; $R<0.053$ 为粒径<0.053 mm 团聚体含量。

图 3 土壤团聚体的粒径分布及其稳定性指标与土壤因子的冗余分析

MWD 和 GMD 被广泛用来评价团聚体的稳定性,土壤 MWD 和 GMD 越大,说明其团聚体稳定性越好;D 可以表征土壤结构的几何形体,能够反映土壤粒径的大小组成和颗粒质地的粗细程度,D 越小,表明土壤的稳定性越好^[23]。通过该研究发现,贺兰山土壤团聚体的稳

定性随海拔升高呈现先增大后减小的趋势,并在 2 139 m 的中海拔样地达到最高。随海拔增加,降雨增加,土壤温度降低,中海拔较好的水热条件有助于生物的生长。刘秉儒等^[16]研究发现,贺兰山在中海拔位置(1 900~2 100 m)具有最高的生物多样性和较高的

土壤真菌含量。真菌在团聚体的形成和稳定中起重要作用,其菌丝可以盘绕土壤颗粒,同时产生多糖类次级代谢物使土壤颗粒黏结在一起形成大团聚体,增强土壤团聚体的稳定性^[24-25]。中海拔样地团聚体的

稳定性还可能与植物凋落物的化学性质相关。贺兰山 2 139 m 的植被为油松林,松针含有较多树脂和蜡质等疏水性物质,阻碍了水的湿润速度,导致团聚体内部空气缓慢释放从而增强其抗破碎能力^[1,26-27]。

表 4 不同海拔各土壤因子解释量和显著性检验结果

土壤因子	0—20 cm 土层			20—40 cm 土层			综合分析		
	解释量/%	F	P	解释量/%	F	P	解释量/%	F	P
SOC	51	13.78	0.002**	6	1.98	0.154	18	7.10	0.010**
TN	4	1.02	0.352	0	0.20	0.854	10	4.19	0.016
TP	2	0.40	0.352	2	0.54	0.630	3	1.59	0.212
pH	4	0.99	0.398	35	6.99	0.006**	13	4.29	0.028
黏粒	2	0.57	0.572	4	1.28	0.308	2	0.89	0.400
粉粒	1	0.45	0.606	24	6.85	0.002**	11	5.53	0.004**
砂砾	3	0.53	0.590	1	0.05	0.984	2	1.33	0.230

注: ** 表示 $P<0.01$ 。

随着土层加深,中高海拔(2 139~2 438 m)样地中大团聚体的含量以及团聚体的稳定性与 0—20 cm 相比均有所下降,与前人^[28]的研究结果一致,这主要是因为凋落物及根系大多分布于土壤表层,受土壤微生物和土壤动物影响较大,其分解转化形成的有机质增加了土壤团聚体之间的联结;其次,随土层加深,土壤中的砂粒含量降低,黏粉粒含量增加,土壤孔隙度降低,影响团聚体的形成及稳定。但在低海拔样地(1 380~1 650 m),20—40 cm 土层大团聚体含量及稳定性均高于表层土壤。可能的原因有:(1)荒漠草原和蒙古扁桃灌丛位于较低的海拔,受到较多人为活动干扰,且蒙古扁桃灌丛样地为岩羊适宜生境^[29],踩踏等活动干扰使其表层土壤团聚体稳定性下降;(2)下层土壤可能含有较多的黏粒以及铁铝氧化物,为有机质的结合提供了较大的表面积和结合位点^[26]; (3)下层土壤的氧化反应加剧了大团聚体的形成^[30]。

3.2 不同海拔梯度土壤团聚体特征与理化指标的关系

通过研究发现,贺兰山沿海拔梯度土壤团聚体呈现由小粒径向大团聚体转变的趋势。总体来讲,不同海拔土壤团聚体的稳定性与 SOC、TN、TP 及砂粒含量呈正相关,与 pH 及黏粒含量呈负相关,这与马盼盼^[31]关于不同退化高寒草地土壤团聚体和土壤养分关系的研究结果一致。随着海拔增加,植被类型发生改变,有机质的输入增加。土壤氮素的主要来源为有机质的分解,其在团聚体中含量的变化与粒级的关系与 SOC 类似,均可作为大团聚体的胶结物质^[32],因此土壤碳氮的累积可能直接促进了土壤大团聚体的形成及其稳定性^[33]。在植物生长和土壤微生物活动中,磷(P)通过调节分子结构和能量传递来调节植物生长和有机碳氮的循环^[34]。土壤中的 P 主要来源于成土母质,受植被变化的影响小,故在本研究中 TP 没有呈现出随海拔变化的趋势。这说明土壤有机碳、

全氮和全磷影响团聚体的分布以及稳定性,同时团聚体通过物理保护,减少土壤养分的流失。团聚体在海拔梯度受 SOC 和粉粒含量影响显著,粉粒为贺兰山土壤的主要机械组成,通过维持土壤孔隙度促进大团聚体的形成,稳定团聚体结构。以上研究表明,贺兰山中海拔具有较高的团聚体稳定性和较好的土壤结构,较高含量的大团聚体、SOC、TN、TP 及粉粒含量有助于团聚体的稳定。

4 结 论

(1)沿海拔梯度增加贺兰山土壤团聚体呈现由小粒径向大团聚体转变的趋势。0—20cm 土层,0.25~0.053 mm 粒级的微团聚体为主要团聚体,水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量随海拔升高增加,<0.053 mm 粒级的黏粉粒含量随海拔升高而降低。20—40 cm 土层水稳性大团聚体含量在中海拔最高。

(2)团聚体稳定性随海拔增加呈先增大后减小的趋势,在 2 139 m 达到峰值。

(3)贺兰山土壤团聚体稳定性与 SOC、TP、TN 及砂粒和粉粒含量呈正相关关系,与 pH 及黏粒含量呈负相关。SOC 含量是影响团聚体在不同海拔植被下分布及其稳定性的最重要因素。

参考文献:

[1] 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[J].生态学报,2003,10(23):2176-2183.

[2] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis[J].Soil Biology and Biochemistry,2009,41(1):1-12.

[3] Carrillo-Saucedo S M, Gavito M E. Resilience of soil aggregation and exocellular enzymatic functions associated with arbuscular mycorrhizal fungal communities along a successional gradient in a tropical dry forest[J].Mycor-

- rhiza, 2019, 30(1): 109-120.
- [4] Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, et al. The effect of 34-year continuous fertilization on the SOC physical fractions and its chemical composition in a Vertisol[J/OL]. Science Report, 2019, 9(1): 2505. DOI: 10.1038/S41598-019-38952-6.
- [5] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [6] Gholoubi A, Emami H, Caldwell T. Deforestation effects on soil aggregate stability quantified by the high energy moisture characteristic method[J]. Geoderma, 2019, 355: 113919.
- [7] 梁爱珍, 张晓平, 申艳, 等. 东北黑土水稳性团聚体及其结合碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1052-1057.
- [8] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 459-465.
- [9] Köchy M, Hiederer R, Freibauer A. Global distribution of soil organic carbon-Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world[J]. Soil, 2015, 1(1): 351-365.
- [10] Liu H F, Wang X K, Liang C T, et al. Glomalin-related soil protein affects soil aggregation and recovery of soil nutrient following natural revegetation on the Loess Plateau[J]. Geoderma, 2020, 357: 113921.
- [11] Bordoloi R, Das B, Yam G, et al. Modeling of water holding capacity using readily available soil characteristics[J]. Agricultural Research, 2018, 8(3): 347-355.
- [12] Murugan R, Djukic I, Keiblinger K, et al. Spatial distribution of microbial biomass and residues across soil aggregate fractions at different elevations in the Central Austrian Alps[J]. Geoderma, 2019, 339: 1-8.
- [13] Li L, Vogel J, He Z, et al. Association of soil aggregation with the distribution and quality of organic carbon in soil along an elevation gradient on Wuyi Mountain in China[J]. PLoS One, 2016, 11(3): e0150898.
- [14] 魏霞, 贺燕, 魏宁, 等. 祁连山区主要植被类型下土壤团聚体变化特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 148-155.
- [15] Alberto F J, Aitken S N, Alia R, et al. Potential for evolutionary responses to climate change-evidence from tree populations[J]. Global Change Biology, 2013, 19(6): 1645-1661.
- [16] 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7211-7220.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [19] 王心怡, 周聪, 冯文瀚, 等. 不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 126-131.
- [20] 徐红伟, 吴阳, 乔磊磊, 等. 不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳定性: 以黄土高原为例[J]. 环境科学, 2018, 38(6): 2223-2232.
- [21] 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 等. 黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2904-2911.
- [22] 李娜, 张一鹤, 韩晓增, 等. 长期不同植被覆盖对黑土团聚体内有机碳组分的影响[J]. 植物生态学报, 2019, 43(7): 624-634.
- [23] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347.
- [24] 宋敏, 邹冬生, 杜虎, 等. 不同土地利用方式下喀斯特峰丛洼地土壤微生物群落特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2471-2478.
- [25] 刘晶, 张跃伟, 张巧明, 等. 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[J]. 草业科学, 2018, 35(4): 771-780.
- [26] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 51(1/4): 33-65.
- [27] Tamura M, Suseela V, Simpson M, et al. Plant litter chemistry alters the content and composition of organic carbon associated with soil mineral and aggregate fractions in invaded ecosystems[J]. Global Change Biology, 2017, 23(10): 4002-4018.
- [28] 刘艳, 查同刚, 王伊琨, 等. 北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 607-613.
- [29] 刘振生, 高惠, 滕丽微, 等. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7243-7249.
- [30] 王富华, 吕盛, 黄容, 等. 缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1504-1511.
- [31] 马盼盼. 退化高寒草地土壤团聚体稳定性及其养分特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [32] 王景燕, 龚伟, 胡庭兴. 川南坡地不同退耕模式对土壤腐殖质及团聚体碳和氮的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 155-160, 164.
- [33] 张芸, 李惠通, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤有机质特征及团聚体稳定性[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2029-2037.
- [34] Yao Y F, Ge N N, Yu S W, et al. Response of aggregate associated organic carbon, nitrogen and phosphorous to re-vegetation in agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Geoderma, 2019, 341: 172-180.