

八宝河流域季节性冻土区典型坡面 土壤团聚体稳定性

黄丽源^{1,2}, 曹广超^{1,2,3}, 赵美亮^{1,2}, 张燚^{1,2}, 鲁濠^{1,2}

(1. 青海师范大学 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008;

2. 青海师范大学 地理科学学院青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008;

3. 青海省人民政府-北京师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008)

摘要: [目的] 探究高寒山地区域坡面地形条件对土壤团聚体分布特征及稳定性的影响, 为维持土壤健康和生态系统稳定提供科学依据。[方法] 选取祁连山八宝河流域季节性冻土区的典型坡面为研究对象, 利用TDR水盐热传感器对坡面土壤水分和温度进行连续监测, 以揭示其冻结特征。在测定土壤理化性质的基础上, 采用干筛法和湿筛法测定土壤团聚体粒径分布, 选取大团聚体重量的百分含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体破坏率(PAD)等土壤团聚体稳定性指标, 分析了不同坡向和坡位条件下土壤团聚体的稳定性差异。[结果] (1) 不同坡向和坡位的土壤理化性质差异不显著, 而同一区域不同土层深度下的土壤理化性质差异显著。土壤有机质(SOM)、全碳(TC)、全氮(TN)含量主要集中在0—20 cm土层, 阴坡中下部含量较高。(2) 不同坡面土壤团聚体粒径以 ≥ 0.25 mm为主, 机械稳定性团聚体中, 大团聚体的占比为91.28%~99.10%; 水稳性团聚体中, 大团聚体的占比为42.50%~95.74%。水稳性团聚体中 < 0.25 mm粒径比例高于机械稳定性团聚体。(3) 研究区土壤团聚体稳定性指标MWD和GMD表现出: 阴坡 $>$ 阳坡、坡底 $>$ 坡中 $>$ 坡顶、0—20 cm $>$ 20—40 cm的特点。0—20 cm土层中, 阴坡土壤的团聚体破坏率(PAD)平均为3.70%, 阳坡土壤为7.87%, 均表明表层土壤团聚体具有较强的抗侵蚀能力。(4) 机械稳定性团聚体MWD与GMD和 > 5 mm粒径呈显著正相关, 水稳性团聚体指标MWD和GMD与土壤有机质(SOM)、全碳(TC)、全氮(TN)及孔隙度呈显著正相关。[结论] 八宝河流域季节性冻土区典型坡面表层土壤团聚体结构稳定性较好, 土壤抗侵蚀能力较强。阴坡、坡底及0—20 cm土层的大团聚体比例和稳定性更高, 表明其团聚体结构更稳定。水稳性团聚体稳定性与土壤有机质、全碳、全氮及孔隙度呈显著正相关, 说明土壤养分含量和结构特征是影响团聚体稳定性的关键因素。坡向、坡位及土层深度共同作用于该区域土壤团聚体的分布与稳定性。

关键词: 土壤团聚体; 稳定性; 坡向; 坡位; 八宝河流域

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0038-10

Soil aggregate stability on typical slopes in seasonally frozen soil zone of Babao River Basin

Huang Liyuan^{1,2}, Cao Guangchao^{1,2,3}, Zhao Meiliang^{1,2}, Zhang Yi^{1,2}, Lu Hao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Processes and Ecological Conservation of Qinghai-Xizang Plateau

(Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory

of Physical Geography and Environmental Processes, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3. Academy of

Plateau Science and Sustainability People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of slope geomorphological conditions on the distribution characteristics and stability of soil aggregates in alpine mountainous regions, thereby providing a

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-07-11

接受日期: 2025-07-26

资助项目: 青海省自然科学基金项目“祁连山南麓典型流域关键带水文过程及碳收支变化特征研究”(2023-ZJ-907M)

第一作者: 黄丽源(2001—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文过程研究。E-mail: 893228021@qq.com

通信作者: 曹广超(1971—), 男, 山东兰陵人, 博士, 教授, 主要从事地表环境过程和遥感与地理信息系统应用。E-mail: caoguangchao@qhnu.edu.cn

<https://stbcj.publish.founderss.cn>

scientific basis for maintaining soil health and ecosystem stability. [Methods] Typical slopes in the seasonally frozen soil zone of the Babao River Basin in the Qilian Mountains were selected as study sites. Time domain reflectometry (TDR) sensors were deployed for continuous monitoring of soil moisture and temperature on the slopes in order to reveal their freezing characteristics. Based on the determination of soil physicochemical properties, both dry sieving and wet sieving methods were employed to determine the particle size distribution of soil aggregates. Soil aggregate stability indicators-including the weight percentage of large aggregates ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and aggregate destruction rate (PAD)-were selected to analyze the differences in soil aggregate stability across different slope aspects and slope positions. [Results] (1) The differences in soil physicochemical properties across different slope aspects and slope positions were not significant, while the differences at different soil depths within the same area were significant. The contents of soil organic matter (SOM), total carbon (TC), and total nitrogen (TN) were mainly concentrated in the 0—20 cm soil layer, with higher contents in the middle and lower parts of shady slopes. (2) Soil aggregates on different slope aspects were predominantly composed of macroaggregates (≥ 0.25 mm). Among the mechanically stable aggregates, the proportion of macroaggregates ranged from 91.28% to 99.10%, whereas in water-stable aggregates, the proportion varied from 42.50% to 95.74%. The proportion of microaggregates (< 0.25 mm) was higher in water-stable aggregates than in mechanically stable ones. (3) The stability indicators of soil aggregates-mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD)-exhibited the following trends: shady slope $>$ sunny slope, lower slope $>$ middle slope $>$ upper slope, and 0—20 cm $>$ 20—40 cm. In the 0—20 cm surface layer, the average aggregate disruption rate (PAD) was 3.70% on shady slopes and 7.87% on sunny slopes, indicating that surface soil aggregates had relatively strong erosion resistance. (4) MWD and GMD of mechanically stable aggregates were significantly positively correlated with aggregates larger than 5 mm, while MWD and GMD of water-stable aggregates were significantly positively correlated with soil organic matter (SOM), total carbon (TC), total nitrogen (TN), and porosity. [Conclusion] The surface soil aggregates on typical slopes in the seasonally frozen soil zone of the Babao River Basin exhibit good structural stability, and the soil shows strong erosion resistance. The proportion and stability of large aggregates are higher on shady slopes, at lower slope positions, and in the 0—20 cm soil layer. The stability of water-stable aggregates is significantly positively correlated with soil organic matter, total carbon, total nitrogen, and porosity, indicating that soil nutrient content and structural properties are key factors influencing aggregate stability. These findings demonstrate that slope aspect, slope position, and soil depth collectively shape the distribution and stability of soil aggregates in this region.

Keywords: soil aggregates; stability; slope aspect; slope position; Babao River Basin

土壤团聚体是构成土壤的基本结构单元,其数量和质量直接影响土壤的物理、化学和生物特性,是决定土壤肥力与稳定性的关键因素^[1]。作为地表物质与能量交换的主要场所,不同粒径土壤团聚体的土壤孔隙度、容重、渗透性等物理性质具有显著差异,其稳定性在维持土壤质量、促进水分入渗、提高抗侵蚀能力和支持植物根系发育方面发挥着关键作用^[2]。土壤团聚体的稳定性主要指机械稳定性和水稳性,其中平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)、几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD)、大团聚体含量($R_{0.25}$)等稳定性指标的增加,以及团聚体破坏率(Percentage of Aggregate Destruction, PAD)的降低,均表明土壤结构更为稳定^[3]。

随着土壤生态学的不断深入,学者们已在团聚体形成机制、结构特征及稳定性评价方法方面取得了广泛进展^[4-5]。在研究方法上,土壤团聚体研究已构成多尺度分析体系:微观层面通过扫描电镜^[6]、CT扫描^[7]、X射线衍射等^[8]技术解析胶结物质组成与团聚机制;宏观层面,则通过原位连续监测和模型模拟,分析冻融、降水等因素对土壤团聚体各指标的影响^[9]。干筛法、湿筛法及激光粒度仪是量化团聚体分布特征的最常用方法。

然而,目前在高海拔高纬度地区对于土壤团聚体的关注尚显不足,尤其是在冻融作用对团聚体形成与稳定性方面研究相对薄弱。受全球气候变暖影响,青藏高原多年冻土正在发生显著退化^[10]。季节性冻土区

的冻融作用日趋频繁和剧烈。冻融循环过程中,冰水相变引起的体积膨胀与收缩直接改变了土壤结构及其连通性^[11]。冻结阶段形成的冰晶对破坏土壤团聚体间的黏结力,导致团聚体崩解,颗粒分散,水稳性团聚体显著减少^[12]。这种扰动导致大孔隙数量减少,微孔隙数量增加,进而土壤容重减小。孔隙结构的改变会直接影响土壤水分、氧气的传输效率,破坏植物生长的基本环境条件。同时,孔隙中水分条件的变化也会改变黏土矿物与有机质间的结合状态,从而干扰其化学稳定性。最终,团聚体结构的退化将降低土壤抵御侵蚀的能力和持水保肥能力,增加坡面水土流失风险,可能对高寒生态系统的稳定性造成不利影响。

因此,在气候变化背景下,亟需对高寒地区季节性冻土区典型坡面土壤团聚体稳定性进行深入研究,以厘清其响应机制和结构演变规律。本研究以祁连山八宝河流域为典型区域,聚焦季节性冻土区坡面土壤团聚体稳定性特征,旨在揭示不同坡面土壤在冻融背景下的团聚体稳定性,评估气候变化对土壤结构及生态系统稳定性的潜在影响,为区域生态保护和水源涵养功能提升提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

八宝河流域位于祁连山南坡的青海省祁连县境内,流域整体呈西北东南走向。本研究所选样地位于八宝河流域内阿咪东索小流域关键带坡面综合径流观测场,如图 1 所示。该地区气候为典型的高原大陆性气候,多年平均气温约为 $-10.91\sim 1.06\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水主要集中在 6 月至 9 月,多年平均降水量为 $428.9\sim 587.5\text{ mm}$ 。灌丛和草地是该区域最典型的植被生态系统,二者共同承担着水源涵养和水土保持的生态功能。灌丛生态系统中,山生柳、箭叶锦鸡儿、金露梅为优势种,草地生态系统中小蒿草、线叶蒿草、针茅、芨芨草和禾草等为优势种。土壤类型呈现出垂直分异特征,低海拔区域主要分布有山地森林土和灰褐土;中海拔区域以栗钙土和黑钙土为主;高海拔地区则以高山草原土、草甸土和寒漠土为主。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

样地	地理位置	坡向	优势种	覆盖度/%	坡度/($^{\circ}$)
1—3	100 $^{\circ}$ 17'24"E 38 $^{\circ}$ 04'28"N	阳坡	狼毒(<i>Stellera chamaejasme</i>)、草地老鹳草(<i>Geranium pratense</i>)、钉柱委陵菜(<i>Potentilla saundersiana</i>)、珠芽蓼(<i>Bistorta vivipara</i>)、细叶早熟禾(<i>Poa pratensis angustifolia</i>)	70~80	23~35
4—6		阴坡	高山柳(<i>Salix takasagoalpina</i>)、鬼箭锦鸡儿(<i>Caragana jubata</i>)、金露梅(<i>Dasiphora fruticosa</i>)	40~50	17~30

1.2.2 室内试验 土壤理化性质指标主要包括土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)、土壤酸碱度(pH)、

1.2 研究方法

1.2.1 野外采样 2019年7月,依托青海师范大学青海省自然地理与地表过程重点实验室,在祁连山阿咪东索小流域设立关键带坡面径流观测场。当前观测场内植被以该观测站配备有全自动气象站、TDR315型土壤水盐热传感器、T-200 BW 称重式雨量筒等野外水分观测设备。其中,TDR315型土壤水盐热传感器准确度为 $\pm 2\% \text{ FS}$,最小采集频率为 1 min 。T-200 BW 称重式雨量筒精度为 $0.1\% \text{ FS}$,灵敏度为 0.05 mm ,可有效记录降水信息。为确保所采集数据的可靠性与准确性,在数据采集完成后,会对数据进行质量控制与校验,为后续研究提供数据支撑。

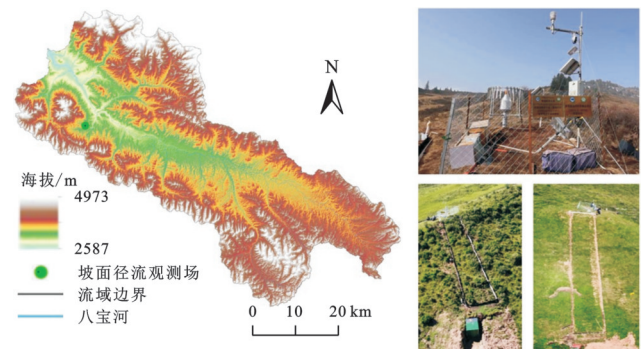


图 1 八宝河流域及坡面综合径流观测场

Fig. 1 Babao River Basin and integrated slope runoff observation site

本文在坡面径流观测场沿阳坡和阴坡分别设置坡顶、坡中、坡底 3 个典型采样点,以揭示不同地形条件下土壤团聚体特征的差异。在每个采样点开挖 50 cm 剖面,分别在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层深度处,采用三点混合取样法采集每层的土壤样品,并在相同位置利用土钻采集土壤用于土壤理化性质试验。为尽可能保持土壤原有结构,采集后的土样装入带盖塑料盒中,带回实验室进行后续处理。室内处理中,选取未受扰动的土样,将其掰成约 10 mm 的小块,置于通风阴凉处自然风干,其间剔除样品中的粗根、小石块等杂质。处理后的风干样品用于后续的室内试验与分析工作。所选样地基本信息见表 1。

全碳(Total Carbon, TC)、全氮(Total Nitrogen, TN)、土壤容重(Bulk Density, BD)和土壤孔隙度(Soil

Porosity)。容重和孔隙度采用环刀法测量,pH通过pH计测定,使用已校准的玻璃复合电极,并采用1:2.5的土壤与水质比进行配置,有机质采用重铬酸钾外加热法测定,全碳全氮采用 vario ISOTOPE cube元素分析仪测定。

根据《中华人民共和国农业行业标准》土壤检测第19部分NY/T1121.19-2008:土壤水稳性大团聚体组成的测定^[13],采用干筛法测定土壤机械稳定性团聚体的组成,湿筛法测定水稳性团聚体的组成。四分法选取200 g风干土样,依次通过孔径为5,2,1,0.25 mm的套筛,对筛分后的团聚体逐级称重,计算各粒级团聚体的含量百分比。按照各粒级所占比例配制成50 g土样,置于水中浸泡3 min,通过湿筛振荡仪(TTF-100)以30 r/min的恒定频率振荡10 min。振荡后,将筛子上不同粒径的水稳性团聚体分别洗出,自然风干后称重,记录并计算各粒级团聚体百分比。

1.2.3 数据分析 使用Excel 2007对所有数据进行整理和预处理,利用SPSS 26.0分析数据,利用Origin 2021绘制图表以便可视化呈现。

1.2.4 团聚体各指标计算 大团聚体含量($R_{0.25}$,%)、平均重量直径(MWD, mm)、几何平均直径(GMD, mm)、团聚体破坏率(PAD,%)计算公式如下:

$$R_{0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n W_i \bar{X}_i \quad (2)$$

$$\text{GMD} = \exp \sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i \quad (3)$$

$$\text{PAD} = \frac{m_{\text{dry}} - m_{\text{wet}}}{m_{\text{dry}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $M_{>0.25}$ 为粒径大于0.25 mm的团聚体重量(g); M_T 为团聚体总重量(g);上限设为7.5 mm,下限设为0.137 mm; W_i 为*i*粒级团聚体质量百分比(%); \bar{X}_i 为两筛分粒级粒径的平均直径; m_{dry} 为干筛(>0.25 mm)团聚体质量(g); m_{wet} 为湿筛(>0.25 mm)团聚体质量(g)。

2 结果与分析

2.1 典型坡面季节性冻融情况

在2023—2024年冬春季,利用TDR315型土壤水盐热传感器测试并记录坡面季节性冻土冻结和消融时间,不同坡向坡位季节性冻土冻结和消融时间有所差异,由表2所示。阴坡季节性冻土开始冻结时间和完全冻结时间往往早于阳坡,完全冻结时间也长于阳坡。从不同坡位来看,由坡顶到坡底,土壤完全冻结时间呈现增加的趋势。阳坡季节性冻土开始消融时间和完全消融时间均早于阴坡。从消融历

时来看,阳坡季节性冻土的完全消融需要更多的时间。土层深度影响季节性冻土的冻结和消融时间,表层土壤受气温影响大,冻融现象更显著。

2.2 典型坡面土壤理化性质特征

不同坡向、坡位和土层深度下土壤理化性质如图2所示。20—40 cm土壤pH值高于0—20 cm土壤,阳坡pH值整体高于阴坡,其中阳坡中20—40 cm处pH值最高为7.61,阴坡底0—20 cm处pH值最低为6.29;土壤有机质、全碳、全氮含量则主要集中在0—20 cm土壤,在阴坡中下部含量最为丰富。土壤容重在阴坡普遍高于阳坡,且随着土层深度增加而升高,其中阴坡底0—20 cm处土壤容重最低为0.53 g/cm³;不同坡向坡位下土壤理化性质差异均不显著($p>0.05$)。土壤理化性质在不同土层深度差异性显著($p<0.05$)。

2.3 典型坡面土壤团聚体粒径分布情况

表3展示了不同坡向、坡位和土层深度下干筛和湿筛的土壤团聚体在不同粒径区间的分布百分比,其中干筛数据还作为MWD, GMD和PAD的计算数据来源。在不同坡向上土壤大团聚体粒径分布无明显差异($p>0.05$)。在0—20 cm土层深度中,阳坡上的5~2 mm粒径团聚体比例较高,而随着坡位降低,阳坡下的2~1 mm粒径比例增加。在20—40 cm土层深度中,阳坡上和阳坡中>5 mm较大粒径比例较高,而阴坡底1~0.5 mm和>0.25 mm粒径比例较高。不同土层深度下阴坡中上部>5 mm粒径的团聚体含量均高于阳坡。从机械性稳定团聚体粒径来看,土壤机械稳定团聚体粒径>5 mm比例最高,介于49.9%~82.8%。比例最低的粒径为0.5~0.25 mm,介于0.5%~8.2%。机械稳定性团聚体中,大团聚体的占比为91.28%~99.10%;水稳性团聚体中,大团聚体的占比为42.50%~95.74%。水稳性团聚体中<0.25 mm粒径比例高于机械稳定性团聚体。在不同土层中,机械稳定性大团聚体(>0.25 mm)含量均高于(<0.25 mm)的微团聚体含量。从水稳性团聚体粒径来看,大团聚体比例依旧占据优势地位,介于42.50%~98.74%,水稳性大团聚体含量最高的为阴坡底0—20 cm深度,含量最低的为阳坡中20—40 cm深度。

2.4 典型坡面土壤团聚体稳定性分析和破坏率

目前,常用的土壤团聚体稳定性分析指标为平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),其值越大表示土壤团聚体的稳定性越强。从表4看出,机械稳定性团聚体在不同坡向坡位条件下MWD平均值表现为阴坡中(6.33)>阴坡上(6.24)>阴坡底(5.17),阳坡底(5.72)>阳坡上(5.10)>阳坡中(5.01)。水稳性团聚体在不同坡位坡向条件下MWD平均值表现为阳坡

底(4.70) > 阳坡上(2.69) > 阳坡中(2.54), 阴坡底(3.55) > 阴坡中(3.43) > 阴坡上(2.45)。GMD 变化规律与 MWD 基本一致。阴坡和阳坡土壤团聚体稳定性指标均呈现坡位由高到低逐渐增大的规律。但

坡向、坡位及其交互作用对机械和水稳性团聚体 GMD 和 MWD 的影响均不显著($p > 0.05$)。水稳性团聚体 MWD 和 GMD 在 0—20 cm 与 20—40 cm 土层之间差异极显著($p < 0.01$)。

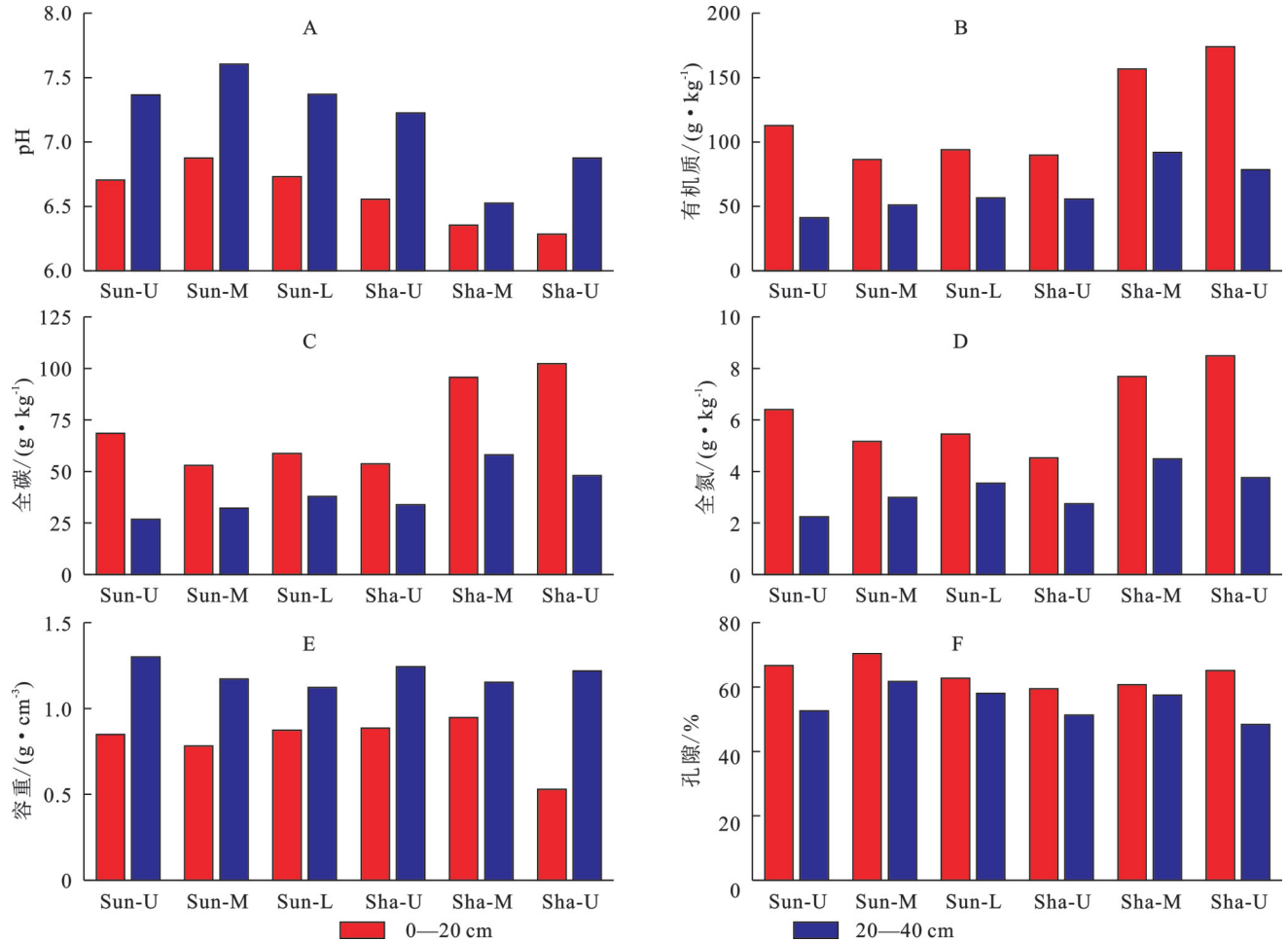


图 2 典型坡面不同土层土壤理化性质

Fig. 2 Physicochemical properties of soil in different soil layers of typical slopes

团聚体破坏率(PAD)是反映土体结构稳定性的一个重要参数,其值较低时,土体的结构稳定性较好。由表 4 可知,土壤团聚体破坏率的范围在 0.39%~55.02%。破坏率最低的团聚体出现在阴坡底 0~20 cm,为 0.39%,破坏率最高的团聚体为阳坡中 20—40 cm。此外,不同土层深度对土壤团聚体破坏率影响较大,PAD 在不同土层深度差异极显著($p < 0.01$),0—20 cm 土壤团聚体破坏率较低,在 0.39%~12.57%,而 20—40 cm 土壤团聚体破坏率较高,在 8.18%~55.02%。

2.5 土壤团聚体组成与各因子间相关性分析

由图 3 的 Pearson 相关性分析表明,机械稳定性团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 与 >5 mm 粒径呈显著正相关,与 <5 mm 粒径呈显著负相关。BD 与 SOM, TC, TN 呈显著负相关,与 pH 呈显著正相关。

水稳性团聚体指标 MWD 和 GMD 与 SOM, TC, TN、孔隙度呈显著正相关,与 BD 呈显著负相关。

3 讨论

3.1 冻融作用对土壤团聚体稳定性的影响

季节性冻土区典型坡面冻融循环过程显著影响坡面团聚体稳定性。冻融过程中,土壤中水分的固液相变破坏孔隙结构,由水变成冰体积的增大会对周围的颗粒产生挤压,冰晶的膨胀会打破颗粒与颗粒之间的联结,使得土壤大粒径团聚体破碎形成土壤小粒径团聚体,降低土壤稳定性。大量研究表明,冻结时的温度、冻融循环的次数与冻结速率等因素对土壤团聚体破坏率(PAD)具有显著影响^[14]。冬季季节性冻融对土壤大团聚体有破碎作用,显著降低水稳性团聚体含量,增加可蚀性。相关学者的研究发现,冻融作用

使 0.25~0.5 mm 粒径团聚体显著增加,而 >0.5 mm 的大团聚体减少,导致土壤结构变弱,稳定性降低,抗侵蚀能力下降^[15]。在本研究中的 PAD 差异可部分归因于不同坡向和坡位下冻融历时的差异。研究结果表明,阴坡具有完全冻结历时长、完全消融历时短的特征,而阳坡则呈现出完全冻结历时短、完全消融历时的特点。对应地,阴坡团聚体 PAD 值显著低于阳坡,最低值出现在阴坡底 0—20 cm 土层,仅为 0.39%,而阳坡中 20—40 cm 土层的 PAD 值最高,达 55.02%。这种差异表明,冻结历时长有助于土壤结构的稳定,减少因水分迁移和结构胀缩造成的扰动;而较长的消融期可能诱发反复融化和再冻结过程,加剧土壤孔隙

结构的破坏,导致团聚体破碎率升高。另外,土层深度对 PAD 的影响同样显著,表层(0—20 cm)土壤的 PAD 范围为 0.39%~2.57%,整体较低,而深层(20—40 cm)土壤的 PAD 范围显著增高至 8.18%~55.02%。这一现象可能与表层土壤中水分变化更迅速、冻结融化过程更短暂有关,而深层土壤则更容易受上层水分迁移影响,在长期冻融交替作用下发生累积性结构破坏。同时表层土壤有机质含量更多,有机质和含水量一起动态调节土壤团聚体稳定性。因此,可以推断,冻结期较短、消融期较长的热力条件组合是导致团聚体稳定性下降、PAD 值升高的重要因素,尤其在 20—40 cm 深层土壤中表现更加显著。

表 2 典型坡面季节性冻融情况

Table 2 Seasonal freezing and thawing on typical slopes

坡向坡位	土层深度/cm	开始冻结	完全冻结	完全冻结历时/d	开始消融	完全消融	完全消融历时/d
Sun-U	10	2023-11-16	2023-11-18	125	2024-03-22	2024-03-30	231
	30	2023-12-03	2023-12-04	118	2024-03-31	2024-04-01	246
	60	2023-12-18	2023-12-19	117	2024-04-14	2024-04-15	247
Sun-M	10	2023-11-16	2023-11-17	125	2024-03-21	2024-03-24	237
	30	2023-12-12	2023-12-13	106	2024-03-28	2024-03-29	258
	60	2023-12-26	2023-12-27	100	2024-04-05	2024-04-06	264
Sun-L	10	2023-11-15	2023-11-16	127	2024-03-22	2024-03-31	229
	30	2023-12-06	2023-12-07	117	2024-04-02	2024-04-04	246
	60	2023-12-23	2023-12-24	112	2024-04-14	2024-04-15	252
Sha-U	10	2023-11-05	2023-11-06	150	2024-04-04	2024-04-08	211
	30	2023-11-12	2023-11-13	157	2024-04-18	2024-04-18	207
	60	2023-11-21	2023-11-22	161	2024-05-01	2024-05-02	203
Sha-M	10	2023-10-29	2023-10-30	170	2024-04-17	2024-04-20	192
	30	2023-11-08	2023-11-09	177	2024-05-04	2024-05-05	186
	60	2023-11-16	2023-11-17	174	2024-05-09	2024-05-10	190
Sha-L	10	2023-10-31	2023-11-01	177	2024-04-26	2024-05-05	179
	30	2023-11-14	2023-11-15	184	2024-05-17	2024-05-18	180
	60	2023-11-24	2023-11-25	180	2024-05-23	2024-05-24	184

注:Sun-U表示阳坡上;Sun-M表示阳坡中;Sun-L表示阳坡底;Sha-U表示阴坡上;Sha-M表示阴坡中;Sha-L表示阴坡底,下同。

3.2 坡面位置变化对土壤团聚体稳定性的影响

研究表明,不同坡向和坡位对土壤团聚体的理化性质具有显著影响。总体而言,阳坡土壤表现出较高的孔隙度和较低的容重,而阴坡环境则更有利于有机质、全碳和全氮的积累,尤其在中下部坡位表现尤为显著。这可能与阴坡较少的蒸发和更高的水分保持能力有关,有利于植物残体的分解和有机质的积累。pH值在不同坡向上呈现出阳坡大于阴坡的趋势,这与刘顺等^[16]在川西地区和朱希望等^[17]在焦作采煤沉陷区的研究结果一致,在半干旱地区,阳坡蒸发强烈,土壤水分少,盐基离子不易被淋融从而导致阳坡 pH 值高于

阴坡。此外,pH值在 0—20 cm 土壤普遍高于 20—40 cm 土壤,可能受到植物根系分泌和有机酸的影响,相关研究表明植物根系分泌会降低 pH 值^[18]。

土壤团聚体的稳定性对土壤结构的功能起着至关重要的作用。坡向和坡位通过影响土壤水分、温度及风力等环境因子,间接调控土壤团聚体的分布特征。不同的水热条件会显著改变植被状况与土壤理化性质,进而引起土壤团聚体稳定性的差异^[19]。根据本研究在八宝河流域的研究结果,阴坡土壤稳定性大于阳坡,这与鲁少波等^[20]在河北平山县低山丘陵区和王凯等^[21]在阜新露天煤矿排土场的研究结

果一致。而与黄安等在内江市的研究结论相悖^[22], 导致这一差异的原因可能是本研究区位于半干旱地区, 降水量较少且蒸发强烈, 阳坡面向阳光, 接收更多的太阳辐射, 温度较高, 从而加速土壤水分蒸发和加强微生物的活动, 导致土壤受到更多扰动, 不利于土壤大团聚体的形成, 而阴坡则相反。坡位对团聚体的影响则与径流过程密切相关。通常情况下, 由

于水流的搬运作用, 沉积物在坡底积累, 土层较深, 土壤含水率较高, 因此坡底区域植被发育良好, 在一定程度上减少降水和风力对土壤的侵蚀作用, 土壤团聚体较大且较为紧密^[23]。而坡顶和坡中由于植被覆盖较少, 接受更多太阳辐射, 水分蒸发相对较快, 裸露的土壤更容易受到风力和雨水的侵蚀, 导致土壤结构松散。

表3 典型坡面土壤团聚体粒径分布

Table 3 Particle size distribution of soil aggregates on typical slopes

坡向坡位	土层深度/cm	方法	土壤团聚体粒径分布%					
			>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
Sun-U	0—20	干筛	57.80	15.40	6.07	8.83	5.52	6.38
		湿筛	43.78	7.32	7.64	11.64	11.46	18.16
Sun-U	20—40	干筛	54.47	25.06	6.90	6.64	3.33	3.60
		湿筛	12.68	7.42	8.92	12.76	20.64	37.58
Sun-M	0—20	干筛	58.98	14.92	4.93	9.03	6.04	6.10
		湿筛	51.26	7.02	8.28	11.56	11.16	10.72
Sun-M	20—40	干筛	53.74	19.25	6.54	9.30	5.68	5.49
		湿筛	4.34	3.06	4.34	12.24	18.52	57.50
Sun-L	0—20	干筛	55.35	20.61	6.44	9.49	4.22	3.89
		湿筛	44.16	10.88	10.82	14.54	9.82	9.78
Sun-L	20—40	干筛	79.24	10.10	3.09	4.07	1.92	1.58
		湿筛	66.48	7.36	2.62	8.84	5.06	9.64
Sha-U	0—20	干筛	69.59	12.08	4.27	5.83	3.51	4.72
		湿筛	50.46	3.54	7.94	16.26	12.56	9.24
Sha-U	20—40	干筛	82.79	12.82	1.83	1.17	0.51	0.88
		湿筛	2.06	4.28	9.50	15.32	17.54	51.30
Sha-M	0—20	干筛	73.57	13.73	3.30	4.04	2.06	3.30
		湿筛	72.32	2.48	4.64	6.56	4.90	9.10
Sha-M	20—40	干筛	82.70	8.67	1.82	1.88	1.70	3.23
		湿筛	9.40	4.82	7.64	10.88	18.90	48.36
Sha-L	0—20	干筛	67.20	15.18	4.71	6.03	2.99	3.89
		湿筛	83.48	1.88	2.76	4.36	3.26	4.26
Sha-L	20—40	干筛	49.85	20.67	5.00	7.53	8.23	8.72
		湿筛	1.26	4.26	6.9	21.50	35.64	30.44

因此坡底土壤的稳定性大于坡中和坡顶。这与冯晓彤等在东北黑土坡耕地的研究结果不同^[24], 原因可能是不同土地利用方式和地形特征导致团聚体组成和稳定性不同。此外, 土层深度对土壤团聚体稳定性的影响也较为明显。根据试验结果, 0—20 cm 土壤团聚体稳定性显著高于 20—40 cm 土壤。这是由于在高寒地区的草地中, 约 80% 的根系生物量分布在表层土壤, 而亚表层土壤中根系生物量显著降低^[25], 土壤团聚体的结构稳定性与植物根系存在显著正相关关系, 根系生物量降低会减弱土壤团粒之间的胶结和吸附作用, 导致团聚体数量随有机质含量的降低而减少^[26]。然而郭正等的研究结果却表明表层土壤团

聚体稳定性不完全高于亚表层, 这是因为有机碳对土壤团聚体稳定性的促进作用在达到一定阈值后趋于稳定^[27]。此外, 随着土层深度的增加, 植被生物量的减少导致微生物可利用基质减少, 进一步抑制土壤微生物的代谢活性, 不利于大粒径土壤团聚体的形成^[28]。研究结论显示阴坡底土壤 PAD 低至 0.39%, 说明该处团聚体在降雨、径流冲刷和冻融循环等扰动下稳定性极高, 这种结构稳定性有助于减少侵蚀、提高水分入渗效率, 并为植被根系生长提供有利条件。已有研究表明, PAD 越小的土壤通常具有良好的团聚体结构, 不易因冻融循环等外界环境变化而破坏^[29]。在高寒季节性冻土区, PAD 低的土壤具备更

强的抗冻融结构破坏能力,这类土壤有助于减少坡面土壤流失,增强水源涵养功能,因此在水土保持和生态恢复中具有重要的参考价值。

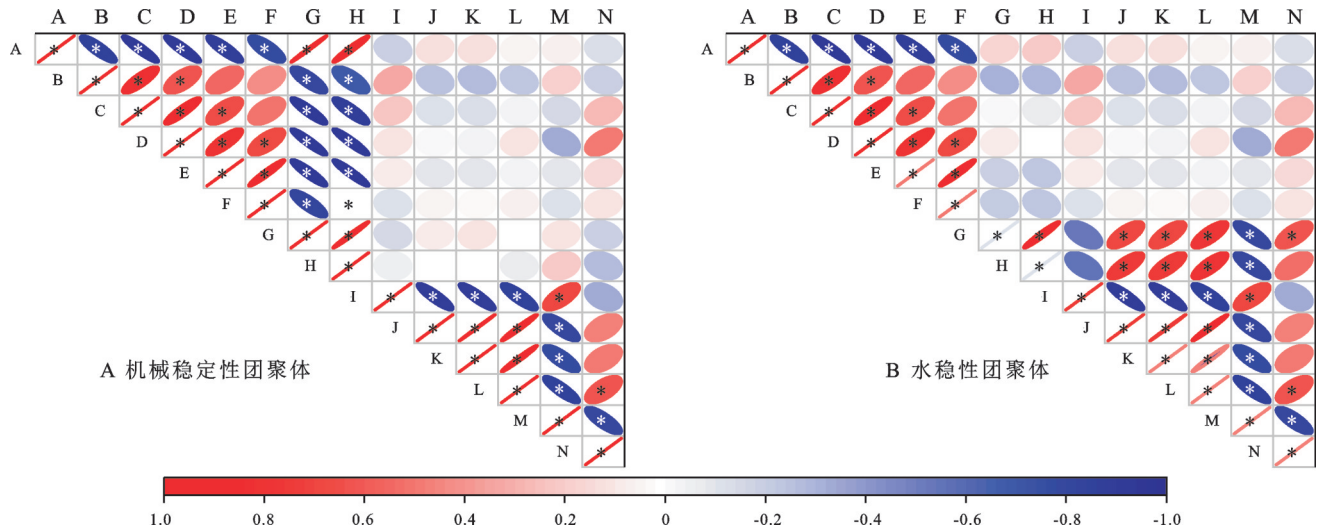
表 4 典型坡面土壤团聚体稳定性指标表
Table 4 Stability indicators of soil aggregates on typical slopes

坡向 坡位	土层 深度/cm	机械稳定性团聚体		水稳性团聚体		PAD/ %
		MWD	GMD	MWD	GMD	
Sun-U	0—20	5.06	3.25	3.81	1.62	12.57
Sun-U	20—40	5.13	3.73	1.56	0.53	35.25
Sun-M	0—20	5.12	3.27	4.36	2.20	4.92
Sun-M	20—40	4.90	3.19	0.73	0.28	55.02
Sun-L	0—20	5.06	3.51	4.01	2.07	6.12
Sun-L	20—40	6.38	5.33	5.38	3.21	8.18
Sha-U	0—20	5.77	4.18	4.21	2.08	4.73
Sha-U	20—40	6.70	6.10	0.69	0.32	50.86
Sha-M	0—20	6.09	4.82	5.66	3.49	5.99
Sha-M	20—40	6.56	5.44	1.20	0.39	46.63
Sha-L	0—20	5.70	4.23	6.42	4.87	0.39
Sha-L	20—40	4.64	2.72	0.68	0.39	23.79

3.3 理化因子与土壤团聚体稳定性的关系

本研究通过 Pearson 相关分析发现,土壤团聚体稳定性与多项理化因子之间存在显著相关性。机械稳定性团聚体的 MWD 和 GMD 与 >5 mm 粒径含量呈显著正相关,这说明大粒径团聚体在维持土壤结构稳定中起到关键作用。亦有研究指出粒径大于

0.25 mm 的团聚体表现出更好的稳定性和抗侵蚀能力^[4]。此外,水稳性团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 与 TC, TN 和孔隙度呈显著正相关,这与刘福君等^[30]在丹江口库区的研究结果相反。该差异不仅可归因于两地的气候与土地利用差异,还可能反映出两个区域在土壤胶结机制上的本质不同。阿咪东索地区属于高寒半干旱气候,土壤发育程度低,有机质主要来源于植被根系分泌物和凋落物输入,因此团聚体胶结过程以有机质主导。根系分泌物中的多糖、菌丝网等有助于团聚体的形成与稳定。同时,该区域适宜的孔隙结构为微生物活动提供了良好条件,加之人为干扰少,整体上有利于水稳性团聚体的形成,因此其稳定性与 TC, TN 和孔隙度正相关。而丹江口库区属亚热带季风气候,常年高温多雨,土壤长期经历强烈的化学风化与淋溶作用,硅、钙、镁等可溶性元素被大量淋失,而铁、铝等不易迁移的元素逐渐在土壤中富集,形成大量的铁铝氧化物;同时,风化过程也促使富含高活性矿物为主的黏粒不断积累。因此,该区域土壤中富含铁铝氧化物和黏粒矿物,为无机胶结机制的形成提供物质基础。在此背景下,土壤团聚体稳定性可能更多地依赖于无机胶结机制。同时,高温条件加速有机质的分解,坡耕地开发增强土壤侵蚀,进而弱化有机质对团聚体结构的稳定作用,导致其稳定性与 TC, TN 等理化性质之间呈现相反关系。



注: A 表示 >5 mm; B 表示 2~5 mm; C 表示 1~2 mm; D 表示 0.5~1 mm; E 表示 0.25~0.5 mm; F 表示 <0.25 mm; G 表示 MWD; H 表示 GMD; I 表示 pH; J 表示 SOM; K 表示 TC; L 表示 TN; M 表示 BD; N 表示 Porosity。图中椭圆左倾斜和右倾斜分别表示正相关和负相关,颜色越深表示相关性越强,“*”表示因子间显著相关($p < 0.05$)

图 3 土壤团聚体组成与各因子间相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between soil aggregate composition and different factors

4 结论

(1) 不同坡向坡位下土壤理化性质差异均不显著($p > 0.05$),但在不同土层深度差异性显著($p < 0.05$)。

土壤有机质、全碳、和全氮主要富集在 0—20 cm 土壤,表层土壤养分积累特征较为明显。相比之下,阴坡土壤容重高于阳坡,而土壤孔隙度在不同坡向之间无明显差异。这说明不同坡向、坡位和土层深度

所形成的水热条件差异,对土壤团聚体的理化性质具有显著影响。

(2) 不同坡向、坡位和土层深度下,土壤团聚体的粒径分布以 ≥ 0.25 mm的大粒径团聚体为主。在水稳性团聚体中,粒径 < 0.25 mm的小粒径团聚体所占比例相较于机械稳定性团聚体明显增加。这表明水分作用对团聚体结构有较强的破碎影响,水稳性团聚体更易解体为小粒径颗粒,结构稳定性相对较差。

(3) 研究区土壤团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 呈现出:阴坡 $>$ 阳坡、坡底 $>$ 坡中 $>$ 坡顶、0—20 cm $>$ 20—40 cm 的特点。这表明坡向、坡位和土层深度对土壤团聚体稳定性具有显著影响,其中阴坡、坡底和表层土壤具备更有利于团聚体形成和稳定的环境条件。

(4) Pearson 相关性分析结果表明,机械稳定性团聚体 MWD 与 GMD 和 > 5 mm 粒径团聚体呈显著正相关,这说明大粒径团聚体在维持土壤结构稳定中起关键作用。水稳性团聚体指标 MWD 和 GMD 与土壤有机质、全碳、全氮及孔隙度均表现出显著正相关关系,说明良好的养分条件和适宜的土壤结构有利于水稳性团聚体的形成与维持,从而增强其抗水解性与结构稳定性。

参考文献 (References):

- [1] 文倩,关欣.土壤团聚体形成的研究进展[J].干旱区研究,2004,21(4):434-438.
Wen Q, Guan X. Progress in the study on soil aggregate formation[J]. Arid Zone Research, 2004,21(4):434-438.
- [2] 黄悦,张凤宝,高晶霞,等.基于高能水分特性法的土壤团聚体结构稳定性研究进展[J].水土保持研究,2022,29(6):431-437,443.
Huang Y, Zhang F B, Gao J X, et al. Progress in research on structural stability of soil aggregates based on high energy moisture characteristic method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):431-437,443.
- [3] 朱利霞,陈志鹏,任晓东,等.河南周口市杨树和女贞林地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布[J].湖北民族大学学报:自然科学版,2020,38(3):247-252.
Zhu L X, Chen Z P, Ren X D, et al. Soil aggregate stability and organic carbon distribution in *Populus* and *Ligustrum lucidum* plantations in Zhoukou of Henan Province[J]. Journal of Hubei Minzu University: Natural Science Edition, 2020,38(3):247-252.
- [4] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
Wang Q K, Wang S L. Forming and stability mechanism of soil aggregates and influencing factors [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005,36(3):415-421.
- [5] 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[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(3):627-643.
- [6] Allegretta I, Legrand S, Alfeld M, et al. SEM-EDX hyperspectral data analysis for the study of soil aggregates [J]. Geoderma, 2022,406:115540.
- [7] Wang R Z, Hu X. Freeze-thaw processes correspond to the protection-loss of soil organic carbon through regulating pore structure of aggregates in alpine ecosystems[J]. Soil, 2024,10(2):859-871.
- [8] Yu X, Fu Y, Lu S. Characterization of the pore structure and cementing substances of soil aggregates by a combination of synchrotron radiation X-ray micro-computed tomography and scanning electron microscopy[J]. European Journal of Soil Science, 2017,68(1):66-79.
- [9] 张方园,常娟,刘健,等.青藏高原多年冻土区不同海拔土壤含水量对气候变化的响应:基于ELM模型[J].冰川冻土,2023,45(3):915-929.
Zhang F Y, Chang J, Liu J, et al. Response of soil water content at different altitudes to climate change in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau: an ELM model analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023,45(3):915-929.
- [10] Zhao L, Zou D F, Hu G J, et al. A synthesis dataset of permafrost thermal state for the Qinghai-Tibet (Xizang) Plateau, China[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8):4207-4218.
- [11] Dagesse D F. Freezing-induced bulk soil volume changes[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2010,90(3):389-401.
- [12] 徐欢,王芳芳,李婷,等.冻融交替对土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展[J].生态学报,2020,40(10):3168-3182.
Xu H, Wang F F, Li T, et al. A review of freezing-thawing cycle effects on key processes of soil nitrogen cycling and the underlying mechanisms [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(10):3168-3182.
- [13] 农业农村部.土壤检测第19部分:土壤水稳性大团聚体组成的测定[S].NY/T 1121.19-2008, 2008.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Soil testing: Part 19: determination of the composition of water-stable macroaggregates in soil [S]. NY/T 1121.19-2008, 2008.
- [14] 朱帅,李仕勇,姜泊宇,等.冻融循环作用对东北农田黑土团聚体及有机碳的影响[J].中国农学通报,2024,40(23):53-59.
Zhu S, Li S Y, Jiang B Y, et al. Effect of freeze-thaw cycles on distribution of soil aggregates and their organic carbon content in arable mollisol [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024,40(23):53-59.
- [15] 丁慧慧,陈文盛,李江荣.季节性冻融对色季拉森林土

- 壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2023,30(1):120-127.
- Ding H H, Chen W S, Li J R. Effect of seasonal freeze-thaw on the stability of soil aggregates in the forest of Sergyemla Mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):120-127.
- [16] 刘顺,许格希,陈森,等.坡向对川西亚高山土壤酶活性和微生物养分限制的影响[J].应用生态学报,2023,34(11):2993-3002.
- Liu S, Xu G X, Chen M, et al. Effects of slope aspect on soil enzyme activity and microbial nutrient limitation in subalpine region of western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(11):2993-3002.
- [17] 朱希望,夏自卿.采煤沉陷区坡向对耕地土壤理化性质的影响研究[J].河南科技,2024,51(18):90-95.
- Zhu X W, Xia Z Q. Study on the influence of slope aspect in coal mining subsidence area on the physical and chemical properties of cultivated soil [J]. Henan Science and Technology, 2024,51(18):90-95.
- [18] 杨青,段旭,赵洋毅,等.干热河谷典型林草植被根系分泌物特征及对土壤环境因子的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(7):53-60.
- Yang Q, Duan X, Zhao Y Y, et al. Characteristics of root exudates of typical forest and grass vegetation in dry and hot valley and their response to soil environmental factors [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022,50(7):53-60.
- [19] 牛钰杰,周建伟,杨思维,等.基于地形因素的高寒草甸土壤温湿度和物种多样性与初级生产力关系研究[J].生态学报,2017,37(24):8314-8325.
- Niu Y J, Zhou J W, Yang S W, et al. Relationships between soil moisture and temperature, plant species diversity, and primary productivity in an alpine meadow considering topographic factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(24):8314-8325.
- [20] 鲁少波,杨新兵,郑建旭,等.花岗片麻岩山区土壤水分特征研究[J].灌溉排水学报,2009,28(1):90-93.
- Lu S B, Yang X B, Zheng J X, et al. Physics and water characteristic of soil in gneiss granite mountain area [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009,28(1):90-93.
- [21] 王凯,那恩航,张亮,等.阜新露天煤矿排土场边坡土壤团聚体稳定性及分形特征[J].干旱区研究,2021,38(2):402-410.
- Wang K, Na E H, Zhang L, et al. Soil aggregates stability and fractal features on dump slopes of opencast coal mine in Funxin, China [J]. Arid Zone Research, 2021,38(2):402-410.
- [22] 黄安,谢贤健,周贵尧,等.内江市微地形条件影响下土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持研究,2012,19(6):77-81.
- Huang A, Xie X J, Zhou G Y, et al. The soil aggregates stability and the fractal features as influenced by tiny terrain conditions in Neijiang city [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,19(6):77-81.
- [23] 宁璐,要振宇,高天明,等.不同坡位对荒漠草原植物群落特征的影响[J].东北林业大学学报,2025,53(1):15-22.
- Ning L, Yao Z Y, Gao T M, et al. The influence of different slope positions on the characteristics of desert grassland plant communities [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025,53(1):15-22.
- [24] 冯晓彤,翟车宇,刘昌杰,等.东北典型黑土坡耕地不同坡位土壤团聚体特征分析[J].东北农业大学学报,2024,55(1):43-49,69.
- Feng X T, Zhai C Y, Liu C J, et al. Analysis of characteristics of soil aggregates at different slope positions of typical black soil sloping farmland in Northeast China [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024,55(1):43-49,69.
- [25] 房昊天,翁白莎,常文娟,等.高寒草甸根系分布特征及与土壤温湿度关系的研究[J].草地学报,2022,30(3):612-621.
- Fang H T, Weng B S, Chang W J, et al. Characteristics of root distribution in alpine meadows and the relationship with soil temperature and moisture [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022,30(3):612-621.
- [26] Wang X X, Huang P, Ma M H, et al. Effects of riparian pioneer plants on soil aggregate stability: roles of root traits and rhizosphere microorganisms [J]. Science of The Total Environment, 2024,940:173584.
- [27] 郭正,张风宝,黄悦,等.典型黄绵土团聚体稳定性变化对植被演替的响应[J].土壤,2025,57(1):195-203.
- Guo Z, Zhang F B, Huang Y, et al. Response of soil aggregate stability changes of typical Huangmian soil to vegetation succession [J]. Soils, 2025,57(1):195-203.
- [28] 甘安琪,姜佳昌,李霞,等.放牧强度对高寒草地土壤团聚体稳定性及有机碳含量影响[J].草地学报,2024,32(6):1832-1842.
- Gan A Q, Jiang J C, Li X, et al. Effects of grazing intensity on soil aggregate stability and its associated organic carbon content in alpine grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024,32(6):1832-1842.
- [29] Zhao Y D, Hu X. A pore-scale investigation of soil aggregate structure responding to freeze-thaw cycles using X-ray computed microtomography [J]. Journal of Soils and Sediments, 2023,23(8):3137-3148.
- [30] 刘福君,胡玉洁,郭忠录,等.丹江口库区典型小流域不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(4):113-121.
- Liu F J, Hu Y J, Guo Z L, et al. Effects of patterns of land use on stability of aggregates in soil in typical small watersheds in Danjiangkou Reservoir area [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025,44(4):113-121.