

渐次解冻土壤粒级沉降分选及碳氮盐分布特征

袁心皓¹, 王馨瑶¹, 李凡¹, 王瑞琪¹, 胡亚鲜², 栗现文¹

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 将解冻逐层剥离过程与粒级沉降模拟相结合, 探究融雪径流情景下坡面土壤逐层解冻过程中泥沙粒级分选规律及伴随的碳氮盐分布特性, 为深入揭示东北坡面土层冻融侵蚀机理及伴生的微环境效应提供依据。[方法] 以东北坡面黑土为例, 开展了土柱冻融试验, 主要包括非冻融、全冻全融与冻结后渐次解冻(土柱置于浸水环境, 由外至内分融化出 T₁—T₃ 3层)处理, 借助沉降管对各处理的土壤进行粒级沉降分选试验, 对各分选粒级电导率(EC)、pH值、有机碳(SOC)、氮(TN)等进行了测定分析。[结果] ①土壤经全冻全融后, 沉降分选所得 >500 μm 和 ≤125 μm 的颗粒含量减少, 125~500 μm 的颗粒增加; 土壤 EC 在大粒级中较高; SOC 和 TN 在大粒级中(>500 μm)含量降低, 在较小粒级(≤125 μm)含量增加。②渐次分层解冻土壤经沉降后, 外层(T₁)≤63 μm 颗粒偏少, 内层(T₃)125~500 μm 颗粒偏多; 盐分和有机碳氮在外层大粒级中含量较高。③全冻全融土壤沉降后, 盐分流失率达 64.8%, SOC 和 TN 流失率相对较低, 为 4.08% 和 2.72%; 渐次解冻沉降处理内层(T₃)土壤盐分和有机质流失程度大于外层(T₁)。[结论] 冻融沉降后, 外层土壤破碎程度大, 坡面土壤颗粒趋向均质化; 有机质含量在粒级间差异明显, 其在小粒级土壤中分布更加稳定; 盐分和有机质在冻融沉降过程中会从土壤内层向外层迁移而造成流失。

关键词: 土壤冻融; 粒级; 沉降; 渐次解冻; 盐分; 碳氮

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0035-10

中图分类号: S153.6

文献参数: 袁心皓, 王馨瑶, 李凡, 等. 渐次解冻土壤粒级沉降分选及碳氮盐分布特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 35-44. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.005; Yuan Xinhao, Wang Xinyao, Li Fan, et al. Soil particle settlement sorting and distribution characteristics of carbon, nitrogen and salt during gradual thawing [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 35-44.

Soil Particle Settlement Sorting and Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen and Salt During Gradual Thawing

Yuan Xinhao¹, Wang Xinyao¹, Li Fan¹, Wang Ruiqi¹, Hu Yaxian², Li Xianwen¹

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F

University, Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, State Key

Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The classification of sediment particles and the accompanying distribution characteristics of carbon, nitrogen and salt in the process of soil thawing layer by layer under snowmelt runoff scenario were analyzed in order to identify the mechanism of soil freeze-thaw erosion and the induced micro-environmental effects on eroding slopes. [Methods] Soil samples were obtained from an eroding slope in the mollisol region of Northeastern China. Air-dried soil was used to fill columns that were subjected to three treatments: non-freeze-thaw, full freeze-full thaw, and gradual progressive thawing after freezing. The soil columns were completely immersed in a water bath so that thawing occurred from outside to inside. All soil samples were then fractionated by settling velocity, and the electrical conductivity (EC), pH value, soil organic carbon

收稿日期: 2023-02-01

修回日期: 2023-03-04

资助项目: 中国博士后科学基金项目“东北黑土区长缓坡融雪过程水量转化的微尺度定量表征”(2020M673518); 国家自然科学基金面上项目“冻融盐渍化土壤多组分溶质迁移对微生物呼吸的影响机理”(52279049)

第一作者: 袁心皓(1997—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 主要从事土壤冻融侵蚀研究。Email: yuaxh1215@163.com。

通信作者: 栗现文(1985—), 男(汉族), 河北邯郸人, 博士, 副教授, 主要从事饱和和非饱和水流及溶质运移、干旱区土壤水盐与农业地学。Email: lixianwen@nwfau.edu.cn。

(SOC), and total nitrogen (TN) of each particle size were determined and analyzed. [Results] ① The freeze-thaw process reduced the proportion of the soil particles $>500 \mu\text{m}$ and $\leq 125 \mu\text{m}$, but increased the proportion of soil particles between $125 \mu\text{m}$ and $500 \mu\text{m}$. Larger particles had higher EC, but lower SOC and TN. ② Across gradual progressively thawed layers, the outer layer (thawed earlier) had fewer particles $\leq 63 \mu\text{m}$, and the inner layer (thawed later) had more particles between $125 \mu\text{m}$ and $500 \mu\text{m}$. More specifically, EC, SOC, and TN were higher in the larger fractions from the outer layer. ③ Compared with the original soil, 64.8% of the dissolved solids were lost from the soil that experienced gradual progressive thawing, but the loss rate of SOC and TN was only 4.08% and 2.72%, respectively. The loss of dissolved solids and organic matter was greater from the inner layer than from the outer layer. [Conclusion] After freezing and thawing, the degree of fragmentation of the outer layer of soil was large, and the soil particles on the slope tended to become homogenized. Organic matter content varied significantly between particle size classes, and its distribution was more stable in small-grained soils. Salts and organic matter migrated from the inner layer of the soil to the outer layer during the freeze-thaw process, resulting in loss.

Keywords: freeze-thaw; particle size; settling velocity; progressive thawing; salinity; carbon and nitrogen

冻融作用通过影响土壤的水冰相变,破坏土壤颗粒之间的黏结力与稳定性,重组土壤结构,是高海拔和高纬度地区土壤侵蚀的主要外营力之一^[1]。在冻融土壤对流与扩散作用驱动下,土壤水、盐和可溶养分物质均可在土体内部发生空间再分布。然而,由于冰晶纯化效应和可溶物质冰点差异,水、盐、养分的运移往往不同步。当冻融土壤经历侵蚀时,先后解冻的土壤在粒径结构、水盐含量等方面往往存在较大差异,直接影响冻融侵蚀泥沙颗粒的迁移规律和空间分布特征。而不同解冻顺序下各粒级的水盐养分含量不同,又可进一步影响侵蚀泥沙在不同空间位置的生物地球化学循环过程。然而,目前大多数研究都依赖于全冻全融过程,并未有效区分先后解冻的土层,在颗粒分布和水盐养分布方面的差异,制约了冻融作用对坡面侵蚀泥沙运移和生物地球化学效应的准确评估。

研究表明,冻融过程中土壤孔隙中的水冰相变是改变土壤结构和粒径组成的主要原因,可使疏松的土壤变得相对紧实,而紧实的土壤变得相对疏松^[2-3]。随着冻结土体温度大幅降低,土壤孔隙水由液相转为固相,冰晶冻结膨胀发生不可恢复位移,分裂颗粒。同时,颗粒表面附着的残余未冻水,受双电子层的影响,可增强土壤矿物间的结合能力^[4],促进细颗粒聚集,或发生重排、絮凝和胶结等效应,最终呈现出土壤颗粒的双向变化^[4-5]。同时,冻融过程中冰晶的纯化作用以及对流与扩散效应^[6-7]会使可溶盐或可溶有机物从相变区分离出来,逐步扩散到未冻区,最终形成水分和可溶物质的分异。崔莉红等^[8]通过野外试验监测了冻融期土壤水盐迁移动态,表明冻结层积盐和脱盐取决于土壤盐分梯度和不同盐分的共饱和点,积

盐发生于冻结前土壤溶液盐分含量梯度为正时,而脱盐则发生于土壤溶液盐分含量梯度为负时。Wang Mengqin 等^[7]的研究则表明,内蒙古盐渍化土壤在经历反复冻融作用后,田间水分和盐分在表层和深层也常表现出相反的迁移聚集特征。因此,当不同土层先后解冻时,其粒级结构和水盐含量均会在先后融出的土层中具有差异,但目前对该过程的研究还较为欠缺。

冻融对土壤结构的改变也会加剧解冻后土壤侵蚀的程度,融雪或冰川融化后的径流对解冻或经历过冻融循环土壤表面的侵蚀是寒冷地区的主要侵蚀类型。大量研究^[3,9]表明,在中国东北黑土区,冻融水力复合侵蚀加剧了土壤侵蚀。由于黑土区地形多具有坡缓坡长的地貌特征,春季解冻期产生大量融雪径流,且冻融过程中水冰相变破坏土壤团聚体结构,进一步削弱了抗侵蚀能力。同时由于黑土区土壤上疏下密,融雪径流在长缓坡地形和冻—融界面不透水层作用下形成“上层滞水”现象,壤中流的产生极大地降低了土壤颗粒间的黏结力,其融化的部分会随着坡面和径流逐渐从土体中剥离,进而促进坡面细沟发育,加剧了融雪侵蚀强度^[10],导致黑土区农田土壤更容易受到冻融—水蚀的复合侵蚀作用^[11]。而解冻土壤由于颗粒大小的沉降速度差异,可影响泥沙颗粒在坡面迁移沉降的空间分布特征^[12]。Liu Tiejun 等^[9]研究发现黏土含量较高的黑土更容易受到冻融过程的影响,解冻过程对土壤具有显著剥离分选能力,增加东北黑土区沟壑侵蚀的脆弱性。此外,土壤颗粒的选择性迁移也伴随着土壤中其他物质的迁移^[13],这也意味着坡面土壤更容易在春季解冻期遭受土壤和养分的流失^[14]。因此,先后解冻土层粒级组成不同,将直接影响不同粒径团聚颗粒的迁移性,进而加剧坡面

的泥沙颗粒、盐分以及有机物的空间异质性和生物地球化学循环过程的复杂性。目前,虽然有不少实验室模拟或现场观测原位坡面土壤的冻融过程及侵蚀研究,但坡面解冻后分层侵蚀过程的团聚粒级分选及伴随的养分分布特性目前还未有效揭示,限制了坡面土壤冻融侵蚀和粒级分选与土壤物质迁移的过程行为和交互作用研究。

本文旨在通过分层渐次剥离解冻土体和沉降管分选粒级的方法,探讨坡面土壤解冻过程水流对颗粒的分选机制,分析土壤各沉降分选粒级理化性质与养分迁移的变化规律,以回答以下科学假设:①土壤冻融过程会改变沉降分选粒级在空间的重分布特征,并且加剧各粒级土壤的溶质分布异质性;②坡面不同解冻次序土壤在迁移沉降分选过程中的土壤粒级及伴随的溶质组分将会表现出差异。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究以东北长缓坡侵蚀黑土为例,试验土样于2020年9月采集自黑龙江省农垦总局九三分局鹤山农场(48°59′—29°03′N,125°16′—125°21′E),取表层20 cm以内的土壤。鹤山农场多为长缓坡耕地,坡度多为1°~5°,坡长则可达1 000 m至3 000 m,试验所用黑土采集于研究区典型黑土耕地,所选耕地以大豆、玉米为主轮作种植,土质较细,有机质较为丰富。其土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、沙粒(0.05~2 mm)含量分别为37%,57%和6%,容重为1.2 g/cm³,田间持水量为34%。土壤由研究区采集后,风干过5 mm筛备用。

根据九三水土保持试验站统计的气象资料,近15 a的年均降水量为518 mm,主要集中在6—9月,占年降水量的70%,冬季积雪量约30 mm。历年最低温在1月,平均温度为-20.94℃,最高温在7月,平均温度为23.46℃。在每年4—5月的春季融雪期,气温从零下回升到10℃以上,积雪大量融化。因此,研究区坡面具有典型季节性冻融特征,并在解冻期经历融雪侵蚀。

1.2 冻融模拟与沉降速度分选

为探究坡面表层土壤在春季融雪侵蚀过程中的颗粒结构变化和物质再分布特征,本试验主要分为两部分:①冻融及逐层解冻试验;②冻融后土壤颗粒沉降速度分选试验。试验设非冻融、全冻全融和渐次剥离3种处理:全冻全融处理为待冻结土柱全部解冻后,进行土壤颗粒沉降速度分选;而渐次解冻处理则按照冻结土柱的解冻顺序,分为解冻外层(T₁)、中层

(T₂)、内核(T₃)3个部分,分别进行土壤颗粒沉降速度分选;而非冻融处理只进行土壤颗粒沉降速度分选。

试验于2021年10月10日开始至2021年11月20日完成。首先将黑土自然风干后过5 mm筛,分5层装填至高15 cm,内径9.5 cm的圆柱硅胶容器:装填控制容重为1.2 g/cm³,每层称取200 g干土,用细针管多次喷水、慢速润湿至田间持水量(34%),最大程度减少气爆对土壤团聚体产生的分散和崩解作用^[15],最终形成总湿重为1 340 g的土柱(干土1 000 g,水340 g)。整个土柱填装完成后,用保鲜膜包裹防止水分蒸发,并静置6 h保证土壤水分混合均匀。将需冻结土柱放置-20℃低温冰箱(FCD-215 SEA,海尔)冻结12 h,以保证土样完全冻结。取出模拟解冻土壤经历的径流浸泡过程,全冻全融处理下的土柱在完全冻结后,全部放入10℃恒温恒湿培养箱(HWS-150,Prandt,中国宁波)的去离子水中自然解冻12 h;渐次解冻处理则是将冻结土柱置入10℃的去离子水中自然解冻60 min,待最外层土体部分(T₁)在水中先解冻脱落后,取出并放入第二组10℃去离子水中继续解冻30 min,再次剥离外层解冻土体后(T₂),剩余内核部分作为第三层内核(T₃),置于第三组10℃去离子水中至完全解冻。3个土层的剥离时间间隔由其解冻速度和重量分布决定,即保证3个土层重量基本一致。在去离子水中浸泡解冻时,土柱整体是从冻结状态逐渐解冻剥离的,气爆的影响可能相对较弱,故未加以考虑。以上各试验处理均重复3次。

将非冻融处理、全冻全融后的土壤,以及T₁、T₂和T₃渐次解冻剥离的土壤,分别投入完全充水的沉降管设备中,进行土壤团聚体颗粒沉降速度分选。本研究采用1 m高的沉降管,依据沉降速度分级法和斯托克斯定律(Stokes' law)^[2]计算出的沉降时间,将土壤颗粒分为以下6个等效石英粒径:>500,250~500,125~250,63~125,32~63,<32 μm。其具体计算公式见公式(1),沉降速度和时间分布见表1,沉降管具体工作原理和操作步骤参见文献[16]。

斯托克斯定律(Stokes' law)表达式如下:

$$v = \frac{h}{t} = \frac{d^2 g (D_g - D_f)}{18\eta} \quad (1)$$

式中: v 为土壤颗粒沉降速度(m/s); h 为沉降距离(m); t 为沉降时间(s); d 为土壤粒径(mm); g 为重力加速度,约为9.81 N/kg; η 为20℃时的水体黏度,约为 1.0×10^{-3} N/(s·m²); D_g 为土壤颗粒平均密度,约为 2.65×10^3 kg/m³; D_f 为水体密度,约为 1.0×10^3 kg/m³。

表 1 基于等效石英粒级土壤各尺寸粒径的沉降速度和时间间隔

Table 1 Settling velocities and times of soil particles based on equivalent quartz size classes

等效石英粒级/ μm	沉降速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	沉降时间/s
≥ 500	≥ 0.23	4.7
250~500	$0.23 \sim 5.6 \times 10^{-2}$	4.7~18.7
125~250	$1.5 \times 10^{-2} \sim 5.6 \times 10^{-2}$	18.7~74.7
63~125	$3.0 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-2}$	74.7~293.9
32~63	$1.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$	293.9~1 139.3
≤ 32	$\leq 1.0 \times 10^{-3}$	$\geq 1 139.3$

1.3 理化指标测定方法

基于经过冻融和沉降后,因 $\geq 500 \mu\text{m}$ 的土壤颗粒含量极少,因此主要测定 $< 500 \mu\text{m}$ 粒级的土壤理化性质。各土样酸碱度用 pH 计(PHS-3 E, 上海雷磁)测定;土壤有机碳(SOC)含量用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定;全氮(TN)采用微量凯氏定氮法测定;可溶性无机氮采用连续流动分析仪测定;可溶性有机氮(DON),由 TN 减去溶解性无机氮(DIN)获得;可溶性有机碳(DOC)采用总有机碳分析仪测定;电导率(EC)通过电导率仪(DDS-307 A, 上海雷磁)测定。

1.4 数据处理

本研究通过计算土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)对土壤团聚体的稳定性进行评价,MWD 与 GMD 值越大,团聚体越稳定,其计算公式见式(2)和式(3)。

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} L_{i-1} + L_i}{2} \times W_i \quad (2)$$

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

式中: L_i 是第 i 个粒级($L_0 = L_1, L_n = L_{n+1}$)(μm); \bar{L}_i 是相邻两个粒级团聚体的平均粒级(μm); W_i 是各粒级的质量比例(%)。

律定的黑土电导率与总盐量之间线性相关关系见公式(4)。

$$y = 9.292 3x + 333.84 \quad (R^2 = 0.6) \quad (4)$$

式中: y 为试验黑土的总盐量(mg/kg); x 为电导率($\mu\text{S}/\text{cm}$)。

此外,本研究通过定义流失率 R ,评价非冻融、全冻全融以及各解冻层沉降分选后易溶盐分和有机组分(SOC, TN, DOC 与 DON)的流失情况。各指标在非冻融和全冻全融条件下流失率 R_f 的计算方法见公式(5),各指标在各解冻层的流失率 R_j 的计算方

法见公式(6)。

$$R_f = [(C_0 - \sum_{i=1}^5 C_i W_i) / C_0] \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_f 为各指标流失百分比(%); C_0 为各指标在原土中的含量(mg/kg); W_i 为各粒级的质量比例(%); C_i 为各指标在不同粒级的含量(mg/kg)。

$$R_j = [(C_0 M_j - \sum_{i=1}^5 C_{j,i} M_j) / C_0 M_j] \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_j 为各指标在第 j 解冻层流失率(%); C_0 为各指标在原土中的含量(mg/kg); $C_{j,i}$ 为各指标在第 j 解冻层第 i 粒级的含量(粒级分布从 250~500 μm 起由大到小分为第 1, 2...5 粒级, mg/kg); M_j 为第 j 解冻层质量(kg)。

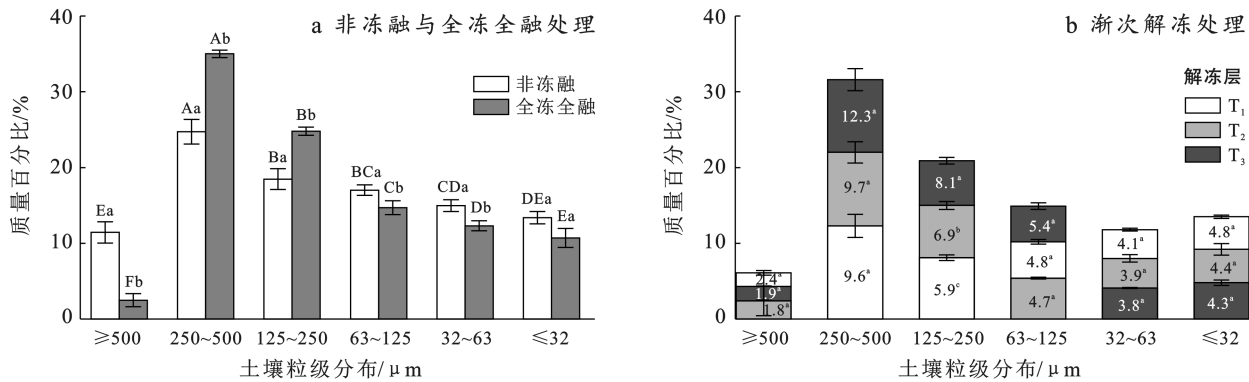
采用 SPSS 23.0 中独立样本 T 检验、单因素方差分析(one-way ANOVA)和事后多重检验(LSD),对冻融与非冻融、3 个时段解冻土体的团聚体颗粒粒级分布和各项理化性质指标进行显著性水平检验($p < 0.05$),采用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 黑土冻融后团聚体粒级沉降分选特征

冻融后土壤团聚体颗粒沉降分选粒级产生明显变化(图 1)。主要表现为大粒级和较小粒级减少,而中粒级则增多。其中, $\geq 500 \mu\text{m}$ 的土壤团聚体颗粒含量在冻融后明显降低,其比例从 11.44% 下降至 2.49%;而 $< 125 \mu\text{m}$ 的土壤团聚体颗粒也有一定程度较低,其含量占比的减少范围为 2.32%~2.69% (图 1a)。同时,250~500 μm , 125~250 μm 土壤团聚体颗粒含量增加幅度明显,其占比分别升高了 10.28% 和 6.34%。各解冻层的土壤团聚体颗粒绝大部分分布在 $< 500 \mu\text{m}$ 范围,并且随粒径的减小而减少,(图 1b),同一粒级 3 层之间在数量上具有显著差异。当粒级 $> 63 \mu\text{m}$ 时,质量比例: $T_3 > T_2 > T_1$ 且在 125~250 μm 范围内 3 层呈显著差异($p < 0.05$),而当粒级 $\leq 63 \mu\text{m}$ 时,则 $T_3 < T_2 < T_1$ 。

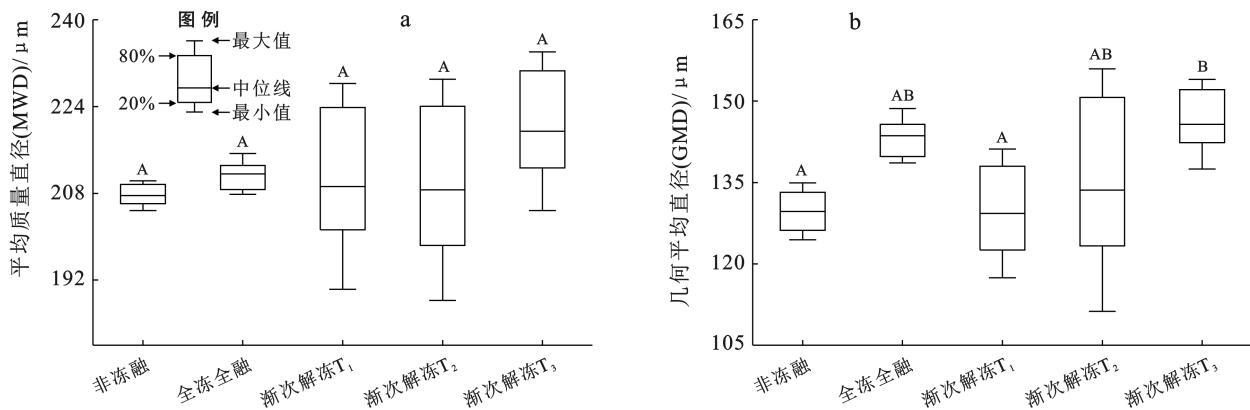
图 2 为不同处理沉降分选后土团聚粒级的 MWD 和 GMD 分布范围。冻融前后,以及渐次解冻土层的团聚体稳定性存在差异。整体上看冻融后土壤的 MWD 和 GMD 增加,但最先融化的 T_1 层却没有增加趋势,几乎与非冻融土一致。冻融后土壤的 MWD 和 GMD 分别增加了 4 μm 和 14 μm ,即土壤团聚体稳定性增加,但差异不显著;而由外向内的 3 个解冻层之间,则表现为外层 T_1 的 MWD 和 GMD 较小,而内层 T_3 的 MWD 和 GMD 更大,且对于 GMD 具有显著性差异。



注:①不同大写字母表示不同粒级间的显著性差异,不同小写字母表示非冻融组与冻融组间的显著性差异($p=0.05, n=3$); ②T₁, T₂ 和 T₃ 表示由外向内的 3 个解冻层,不同小写字母表示 3 层之间的显著差异($p=0.05, n=3$)。下同。

图 1 不同处理粒级沉降分选特征

Fig.1 Settling and fractionating characteristics of different treated particle size



注:不同大写字母表示不同处理的显著性差异($p=0.05, n=3$)。

图 2 非冻融、全冻全融与分层渐次解冻处理的土样团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

Fig.2 Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of non-freezing, complete freezing-thawing and progressive freezing-thawing soil

2.2 黑土各分选粒级电导率与 pH 值

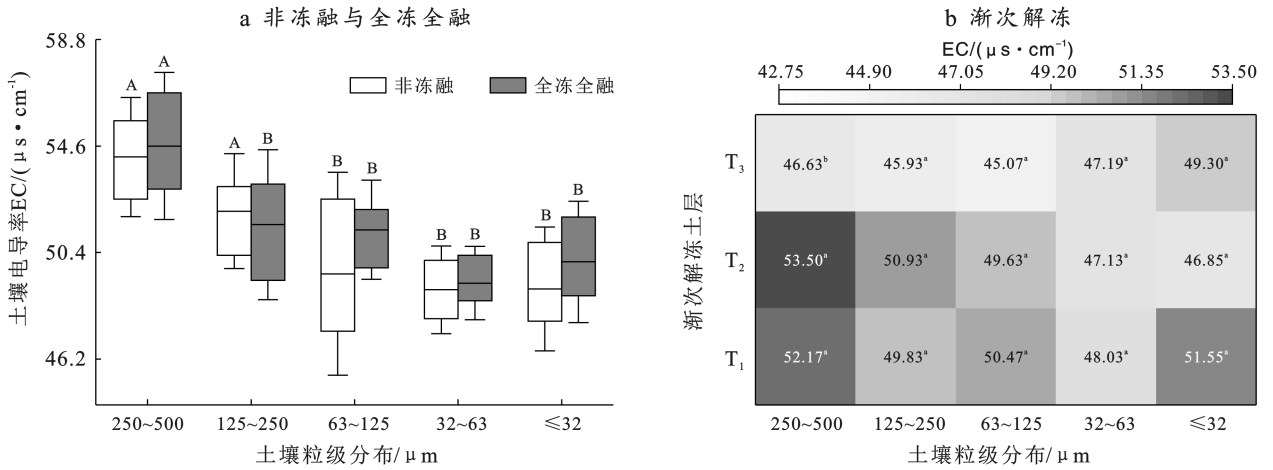
沉降分选后,全冻全融处理的黑土电导率 EC 总体上大于非冻融处理,但粒级间差异明显(图 3a)。具体表现为,EC 最高值出现在 250~500 μm ,并随粒级的减小整体呈减小趋势,在 $\leq 32 \mu\text{m}$ 级略有增加。渐次解冻处理 3 个解冻层的 EC 值随着粒级的减小在 T₁, T₂ 逐渐降低,而在内层 T₃ 逐渐升高(图 3b); 总体上由最大粒级至最小粒级, T₂ 变化幅度最大,降低了 6.65 $\mu\text{S}/\text{cm}$, T₃ 变化幅度最小,升高了 2.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。当粒级 $> 32 \mu\text{m}$, EC 在外层 T₁, T₂ 较大,在最大粒级(250~500 μm)达到显著差异($p < 0.05$),而当粒级 $\leq 32 \mu\text{m}$, EC 在 T₁, T₃ 层较大。

冻融与非冻融处理沉降分选后黑土各粒级的 pH 值随粒级的变化规律如图 4a 所示,经冻融再沉降分选后, pH 值在 $< 125 \mu\text{m}$ 的土壤中明显减小。粒级越小, pH 值越大,且最小粒级($< 32 \mu\text{m}$)的 pH 值显著高于较大粒级(125~500 μm) ($p < 0.05$)。图 4b 比

较了 3 个解冻层的各粒级 pH 值,当粒级较粗时,内层 T₃ 的 pH 值较高,但在最小粒级处,最外层 T₁ 明显高于 T₂, T₃。T₁, T₂ 和 T₃ 最低 pH 值均出现在 125~250 μm , 分别为 6.58, 6.56, 6.61, 最高在 $\leq 32 \mu\text{m}$, 分别为 6.75, 6.69, 6.67, 最内层 T₃ 变化幅度最小。

2.3 黑土沉降分选各粒级的 SOC, TN 分布特征

非冻融与全冻全融处理沉降分选后土壤 SOC 在不同粒级间具有明显差异(图 5a), 在 125~250 μm 和 $\leq 32 \mu\text{m}$ 粒级中含量较高, 分别为 29.29, 29.47 g/kg; 而在 32~63 μm 处最小, 为 22.37, 23.02 g/kg。冻融后, SOC 在最大粒级 250~500 μm 中降低, 减少了 3.23 g/kg; 而在其余粒级中增加了 0.42~1.52 g/kg。由图 5b 可知, 3 个解冻层的 SOC 均在 125~250 μm 处出现最大值(T₁, T₂ 和 T₃ 分别为 29.68, 28.63, 28 g/kg), 在 32~63 μm 处出现最小值(T₁, T₂ 和 T₃ 分别为 21.61, 21.1, 22.58 g/kg)。此外, SOC 在外层大粒级和内层的小粒级中含量较高。



注:不同大写字母表示非冻融组与全冻全融间的显著性差异,不同小写字母表示渐次解冻3层之间的显著差异($p=0.05, n=3$)。下同。

图 3 不同处理各沉降粒级电导率特征

Fig.3 Electrical conductivity of different treated particle size

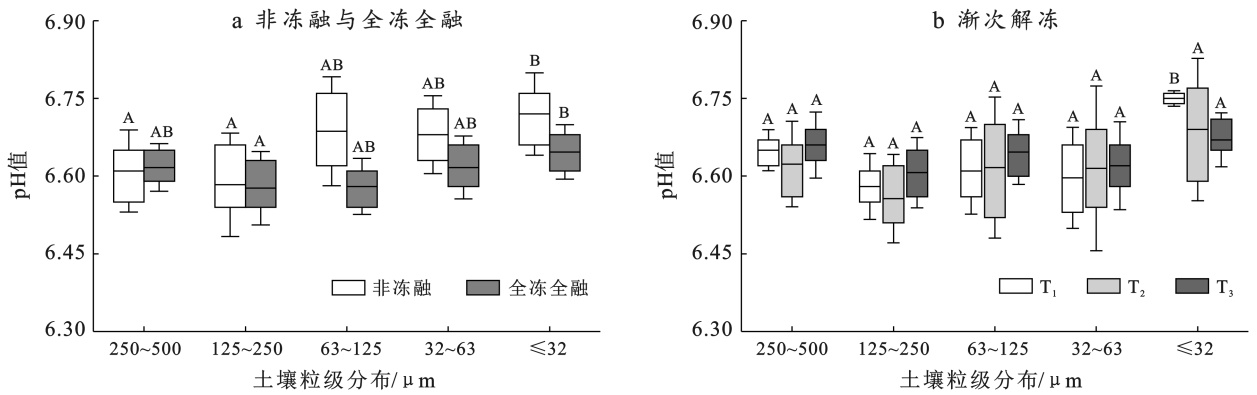


图 4 不同处理各沉降粒级 pH 值特征

Fig.4 pH value of different treated particle size

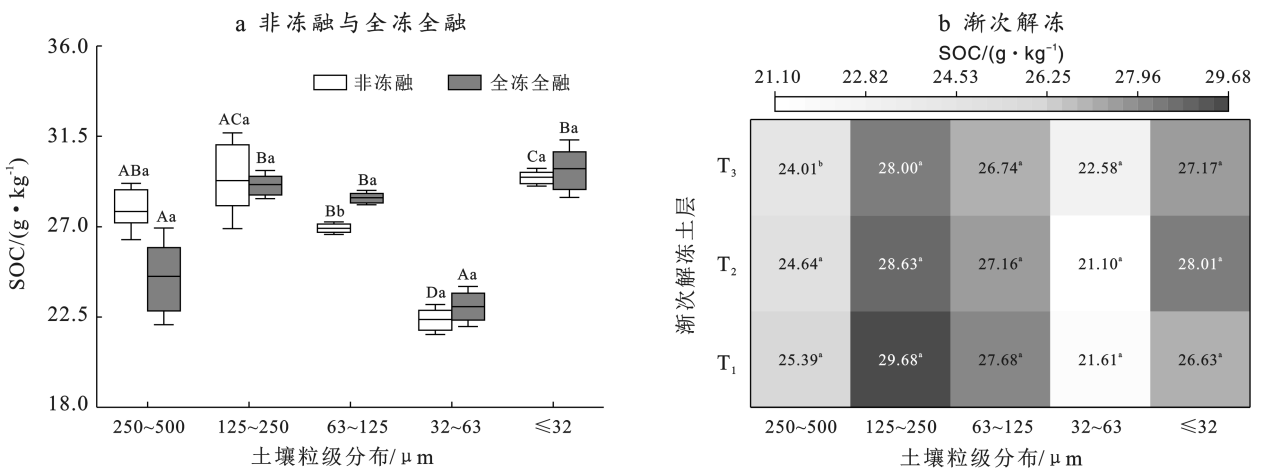


图 5 不同处理各沉降粒级有机碳(SOC)含量

Fig.5 Soil organic carbon (SOC) of different treated particle size

TN 的分布特征与 SOC 相似(图 6)。非冻融和全冻全融处理土壤在沉降后 TN 均在 $\leq 32 \mu\text{m}$ 时最大,为 2.30, 2.38 g/kg;而在 32~63 μm 最小,为 1.67, 1.75 g/kg。经过冻融处理,仅在最大粒级(250~

500 μm)由 2.09 g/kg 减小至 1.86 g/kg,而在中、细粒级($\leq 125 \mu\text{m}$)则表现为增加。分层解冻土壤 3 层 TN 均在 250~500 μm 含量最多,在 32~63 μm 粒级含量最少。最外层 T₁ 的 TN 含量在粗、中粒级

(63~500 μm)中最多,在细粒级(<63 μm)中最少,并在 125~250 μm 和 ≤32 μm 与 T₂, T₃ 达到显著差

异($p < 0.05$)。内层 T₃ 则在粒级 ≤63 μm 后升高到三层中的较高水平。

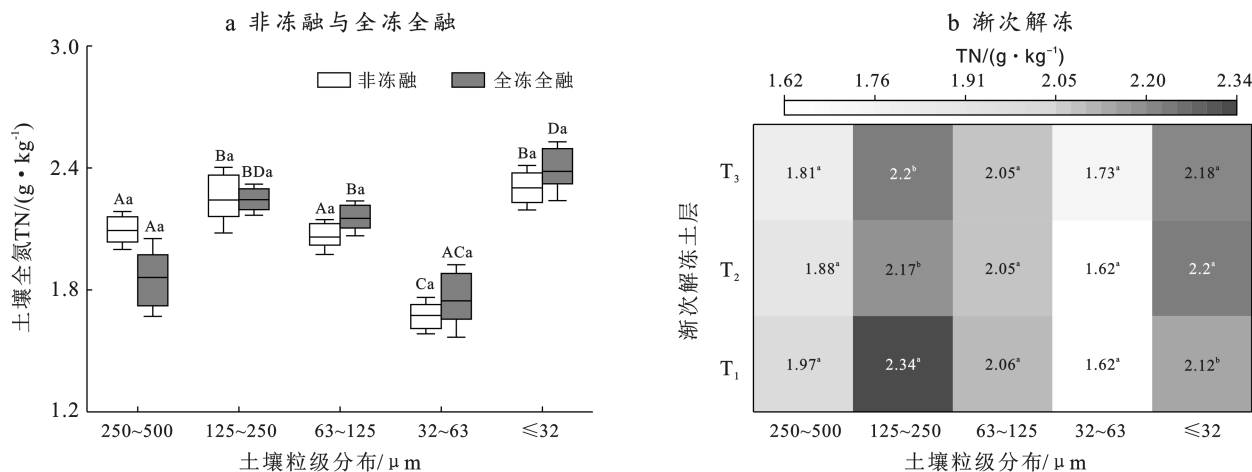


图 6 不同处理各沉降粒级全氮(TN)含量

Fig.6 Total nitrogen (TN) of different treated particle size

2.4 盐分及有机质流失特征

各处理土壤经过沉降作用后各粒级盐分及有机碳氮相对于原土流失情况见表 2。结果显示,沉降作用造成的盐分流失率达 68.38%,DOC 和 DON 次之,SOC 和 TN 流失率相对较低。而经过全冻全融沉降后,各组分流失程度有所减少,盐分、SOC, TN, DOC 和 DON 分别流失 64.80%,4.08%,2.72%,15.61%和 25.84%。渐次解冻处理各解冻层之间具有明显差

异。具体而言,经过冻融沉降的黑土,盐分流失程度最大,其相较于原土流失量高达 64.73%~66.14%,层间差异较小;其次是可溶性有机质 DOC 与 DON,流失程度随解冻层有明显变化,最外层 T₁ 流失较小为 14.26%和 14.33%,而内层流失最多,为 17.69%和 34.43%;SOC 与 TN 流失程度相对较低,流失比例范围分别为 2.99%~5.49%和 2.64%~3.54%,但 3 层之间表现出明显差异,流失量 T₃>T₂>T₁。

表 2 冻融沉降后各解冻层盐分及有机质流失量

Table 2 Loss of dissolved solids and organic matter from non-freezing, complete freezing-thawing and progressive freezing-thawing soil

土壤类别	流失量/(g·kg ⁻¹)					流失率 R/%				
	盐分	SOC	TN	DOC	DON	盐分	SOC	TN	DOC	DON
非冻融土	15.50	2.97	0.21	48.44	3.61	68.38%	10.97%	10.21%	18.14%	26.07%
全冻全融土	14.69	1.11	0.06	41.68	3.58	64.80%	4.08%	2.72%	15.61%	25.84%
解冻层 T ₁	1.47 ^a	0.81 ^a	0.05 ^a	38.00 ^a	1.99 ^a	64.73 ^a	2.99 ^a	2.64 ^a	14.26 ^a	14.33 ^a
解冻层 T ₂	1.47 ^a	1.11 ^b	0.06 ^{ab}	41.02 ^{ab}	3.27 ^b	64.83 ^a	4.11 ^b	3.00 ^{ab}	15.36 ^{ab}	23.57 ^b
解冻层 T ₃	1.50 ^b	1.49 ^c	0.07 ^b	47.23 ^b	4.77 ^c	66.14 ^b	5.49 ^c	3.54 ^b	17.69 ^b	34.43 ^c

注:不同小写字母表示 3 个解冻层之间差异显著($p = 0.05, n = 3$)。

3 讨论

3.1 全冻全融对黑土沉降粒级分布和理化性质的影响

冻融与非冻融土壤沉降粒级分布存在显著差异,表明冻融作用可显著改变土壤粒级结构:主要表现为 >500 μm 的粗粒级显著减少,而 125~500 μm 的中粒级明显增多。这主要是因为黑土在冻融过程中,孔隙中冰晶膨胀的分离力打破了颗粒间的连接,增加了土壤中的微裂缝,或使土壤中存在的微裂隙破裂,

这种冻结膨胀引起的总孔隙度的增加并不能在解冻时得以恢复,解冻导致的水分迁移和后续的沉降作用反而会削弱颗粒之间的黏聚力^[2],导致粗粒级的减少。同时,由于细粒级(如 <63 μm)比表面积较大,结合水比粗粒级更多,细粒级周围大量未冻结水的存在使其不会发生开裂,或使细粒级团聚体的内部气体在冻结后冷却收缩,增大了颗粒间的结合力^[11],并经过沉降作用和双电子壳层效应聚集为相对较大粒级土壤团聚体颗粒(如本文的 125~500 μm)。Zhang

等^[17]的研究也表明冻融使土壤颗粒粒级发生双向变化,与本研究结果具有一致性。此外,冻融改变土壤团聚体的稳定性,本研究结果显示土壤团聚体稳定性在冻融后发生小幅度增加。这与王恩姮等^[18]认为冻融作用会加强水稳性团聚体聚集的研究观点相符,王风等^[19]的研究也表明当土壤含水量为田间持水量时,冻融会增加黑土团聚体稳定性。Li Guiyang 等^[11]的研究则指出当含水率低于 40% 时,冻融后 >1 mm 的团聚体水稳性增强,而更小粒径的团聚体则破碎效果更加明显。但本试验主要为 500 μm 以下的团聚体,且冻结时土壤含水率较高,可能最终导致破碎效应小于聚集效应。因此,本研究揭示的冻融作用对沉降粒级团聚结构的改变,也必将改变融雪侵蚀过程黑土坡耕地土壤团聚粒级的迁移性,尤其是 125~500 μm 的中粒级团聚体迁移比例得到增强。

由于土壤水盐之间存在着复杂的耦合关系,因此各类盐离子在固相和液相之间的分配也受土壤的水分变化的影响,而溶质的溶解与絮凝又会一步影响土壤酸碱度。本研究中,较大团聚粒级的盐分含量在冻融后下降,而小团聚粒级的盐分增加。可能是因为盐分因冰晶纯化从相变区分离,冰晶的产生和盐分子的分离导致盐浓度增加,叠加冻融过程对粒级的改变,导致小粒级冻融土相较于非冻融土更高的 EC 值。此外,冻融作用引起的土壤颗粒分布变化也进一步影响了颗粒间 SOC 和 TN 的分布,两者在大粒级中的含量减少,在小粒级中增加。一般情况下,冻融可以通过破坏土壤团聚体物理结构,释放包裹于土体内部的有机基质^[20],同时冻胀压力也可造成一些微生物死亡、萎蔫或细胞裂解,造成土壤有机质的增加。而冻融作用下大团聚体破碎程度较大,原本包裹在团聚体内的有机碳失去了物理保护而被暴露,聚集在了拥有更多结合水、结合有机质能力更强的小粒级上。这说明粗粒级沉积物对土壤中物质的吸附能力较细粒级低,导致融雪径流运输的细粒级土壤团聚体会比粗粒级土壤团聚体富含更多的有机碳和全氮。同时,本研究揭示的不同粒级大小团聚体在融雪侵蚀过程中可迁移性不同,使得黑土的有机质与盐分会因土壤颗粒在坡面上迁移距离的不同而分选沉积,改变黑土区耕地土壤质地和养分的空间分布。

本研究沉降分选过程也可指示融雪侵蚀过程可能随水流迁移损失的土壤盐分、有机碳氮比例。经沉降分选后,全冻全融处理的流失率低于非冻融土,二者盐分损失较多(64.73%~66.14%),而有机碳氮损失相对较少。这可能因为冻融过程可释放土壤中一定量的有机质,如周旺明等^[21]的研究结果中显示,一

次冻融后土壤 DOC 含量呈现明显增加,这一补偿效应,使得冻融土盐分和有机碳氮的计算流失率较非冻融土低。但事实上,土壤有机质和全氮作为农田中重要的肥力因子,在解冻期融雪径流的作用下,一部分因土壤团聚体结构破坏而暴露于水中流失,另一部分可能随土壤团聚体被水流挟带迁移,即土壤养分会因冻融和融雪侵蚀而产生大量流失或坡面空间重分布。Zhang Shaoliang 等^[14]关于东北黑土区土壤养分空间异质性的研究显示,土壤的流失和沉积导致在 0—60 cm 剖面上,土壤碳、氮储量距离流域出口越远,土壤有机质含量越低。因此,在黑土区不同粒级土壤团聚体在冻融和径流复合的融雪侵蚀过程,将会造成不同大小土壤团聚粒级、有机碳和全氮的空间异质性,从而改变坡面不同尺度微环境变化。

3.2 渐次解冻土层沉降粒级分布特征及其微环境作用

不同渐次解冻土层间,黑土粒级沉降分选差异明显,主要表现为先解冻的外层粗粒偏少,破碎程度更大,而后解冻的内层粗粒偏多,更易发生聚集。这主要是因为土柱在低温环境中冻结时,内外层温差驱使土体内的水分向外层冻结锋面迁移,形成大量冰透镜,因冻胀作用而造成外层粗颗粒破裂的程度更加剧烈。随着冻结峰向内层土体推移,冰透镜量相对较少,颗粒破坏程度逐渐减弱。同时,解冻最内层 T₃ 显示了更高的团聚体稳定性,外层 T₁ 的团聚体稳定性最低。因此,黑土在解冻时,最先解冻的土层对融雪径流作用的抵抗能力较弱,更容易发生水土流失。

不同渐次解冻土层的 EC, pH 值, SOC 和 TN 等理化性状整体上显示出一定的层间差异,在外层大粒级中 EC 较高,有机碳氮含量相对较多,但其分布规律仍以粒级格局为主导。在 Qin Yan 等^[22]的研究中,表层土壤盐分的累积来自于深层,土壤盐分在空间上向冻结层积累。这表明,冻结过程可驱动水分从未冻结区域驱动到冻结锋,同时盐分、有机质协同迁移,促使外层盐分或有机碳氮的含量更高;但事实上,盐既随液态水从未冻区向冻结区迁移,也会在冰晶斥盐作用下向流体流动的相反方向迁移^[23-25]。因此,在对流与扩散两个过程同时作用下,溶质迁移方向往复多变,且迁移速度不一,这可能是导致部分粒级的盐分没有明显层间差异的原因之一。同时,土壤质地在于有机质的化学和物理保护机制中起着直接和间接的作用,附着于矿物表面或包裹于团聚体内部的有机质受土壤粒级的影响较大^[26],在冻融过程中的空间迁移有限。而 125~250 μm 的中粒级颗粒具有较高的 SOC 和 TN 含量,并在 3 个解冻层之间具有显著性差异,这可能因为冻融作用对粗颗粒的破坏和细颗粒的

聚集作用均可造成 125~250 μm 中粒级的富集,使得该粒级对渐次解冻层间差异较为敏感。根据表 2 各解冻层的流失程度可看出,内层土壤盐分和有机质损失更多,说明在解冻期径流侵蚀下土壤养分的流失程度存在空间差异性。而盐分、有机质会向表层迁移,使得本研究中内层解冻土壤除因沉降过程在水中损失,还因冻结时物质向外层迁移而造成内外解冻层流失差异明显,这有助于深入揭示融雪侵蚀对表层土壤渐次剥离后的坡面物质平衡过程。

本研究通过将冻结黑土在 10 $^{\circ}\text{C}$ 去离子水中浸水逐层解冻,并采用沉降管物理模拟了冻融前后与渐次解冻土层的土壤团聚粒级沉降变化与盐分养分分异规律。然而黑土坡面在解冻过程中,其实际融化温度会因日均温度变化而具有不同的融雪径流温度、流速与侵蚀含沙量,同时也会随融雪阶段不同,导致侵蚀程度的差异性。此外,由于积雪覆盖可能的增温效应,土壤冻结时的温度相较于本试验设计的温度可能偏高。本研究在设置冻结温度偏低条件下,冻结对土壤团聚体结构可能产生更为强烈迅速的破坏^[19];而 10 $^{\circ}\text{C}$ 的融化环境也会造成比实际更快的融化速度。事实上,这些差异相比于实际缩短了空间层面碳氮转化、养分迁移的时间,但依然能显示出渐次解冻土层理化特性的时空分异,因此在实际较长的融化期中,这种层间差异可能更为明显。

因此,虽然本研究与东北长缓坡黑土实际冻融环境有一定差异,但观察到的渐次解冻土层间的沉降粒级和碳氮盐异质性分布特征,也有效揭示了土壤渐次解冻过程对东北黑土理化特征影响及其可能的侵蚀和环境风险,突显了全冻全融等传统研究方法刻画土壤冻融过程空间异质性的局限性。呼吁未来研究应更多关注侵蚀坡面上下土层逐渐解冻过程,并考虑不同质地、初始含水率、冻结和解冻温度、冻融循环次数等因素的影响;在融雪侵蚀等外营力作用下,各渐次解冻土层间逐步剥离、迁移,其粒级分布的显著差异或可对坡面泥沙粒级空间分布以及养分循环产生深远影响。

4 结论

(1) 黑土全冻全融沉降分选后,>500 μm 粒级明显减少,而 125~500 μm 粒级明显增多,冻融促使粗颗粒破碎而细颗粒聚集,土壤粒级呈双向变化。土壤电导率整体呈现升高趋势,pH 值呈现减小趋势;各粒级颗粒间 SOC 和 TN 的分布主要受沉降粒级控制,表现为 SOC 与 TN 在粗粒级(125~500 μm)中的含量减少,在细粒级(<125 μm)中含量增加。

(2) 分层解冻次序对土壤沉降粒级分布产生影响:外层粗粒偏少,内层粗粒偏多,内层土壤团聚体更稳定,表明外层颗粒的破碎程度更大,而内层则更易发生聚集。盐分和有机碳氮在解冻外层>63 μm 粒级中含量更高,冻融会使盐分和有机质在土层空间由内层向外层迁移。

(3) 土壤经全冻全融沉降后盐分流失 64.80%,DOC 和 DON 分别流失 15.61%和 25.84%,SOC 和 TN 流失程度相对较低;渐次解冻处理,后解冻的内层土壤沉降分选后碳氮流失相对较多。

[参 考 文 献]

- [1] 孙宝洋,李占斌,肖俊波,等.冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J].应用生态学报,2019,30(1):337-347.
- [2] Ma Renming, Jiang Yu, Liu Bo, et al. Effects of pore structure characterized by synchrotron-based micro-computed tomography on aggregate stability of black soil under freeze-thaw cycles [J]. Soil and Tillage Research, 2021,207:104855.
- [3] 张科利,刘宏远.东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J].中国水土保持科学,2018,16(1):17-24.
- [4] Liu Xinmin, Feng Bo, Tian Rui, et al. Electrical double layer interactions between soil colloidal particles: polarization of water molecule and counterion [J]. Geoderma, 2020,380:114693.
- [5] Zhai Jinbang, Zhang Ze, Melnikov A, et al. Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on the mineral particle fragmentation and aggregation with different soil types[J]. Minerals, 2021,11(9):913. <https://doi.org/10.3390/min11090913>
- [6] Liu Jianpeng, Yang Ping, Yang Zhaohui. Water and salt migration mechanisms of saturated chloride clay during freeze-thaw in an open system [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021,186:103277.
- [7] Wang Mengqin, Zhu Yan, Zhao Tianxing, et al. Chemical characteristics of salt migration in frozen soils during the freezing-thawing period [J]. Journal of Hydrology, 2022,606:127403.
- [8] 崔莉红,朱焱,赵天兴,等.季节性冻融土壤盐离子组成与冻结层盐分迁移规律研究[J].农业工程学报,2019,35(10):75-82.
- [9] Liu Tiejun, Xu Xiangtian, Yang Jie. Experimental study on the effect of freezing-thawing cycles on wind erosion of black soil in Northeast China [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017,136:1-8.
- [10] 王伦,郑粉莉,师宏强,等.壤中流和土壤解冻深度对黑土坡面融雪侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32

- (12):4177-4185.
- [11] Li Guiyuan, Fan Haoming. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China [J]. *Pedosphere*, 2014, 24(2):285-290.
- [12] Hu Y, Kuhn N J. Aggregates reduce transport distance of soil organic carbon: are our balances correct? [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(22):6209-6219.
- [13] Han Zhen, Wang Xiaoyan, Song Dandan, et al. Response of soil erosion and sediment sorting to the transport mechanism on a steep rocky slope [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(12):2467-2478.
- [14] Zhang Shaoliang, Zhang Xingyi, Liu Zhihua, et al. Spatial heterogeneity of soil organic matter and soil total nitrogen in a mollisol watershed of Northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(1):275-288.
- [15] Edwards L M. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince Edward Island soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1991, 42(2):193-204.
- [16] 胡亚鲜, Nikolaus J. Kuhn. 利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5):1115-1124.
- [17] Zhang Ze, Pendin V V, Feng W, et al. The influence of freeze-thaw cycles on the granulometric composition of Moscow morainic clay [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2015, 7(3):199-205.
- [18] 王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟. 季节性冻融对典型黑土区土壤团聚体特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4):889-894.
- [19] 王风, 韩晓增, 李良皓, 等. 冻融过程对黑土水稳性团聚体含量影响[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5):915-919.
- [20] Mueller C W, Schlund S, Prietzel J, et al. Soil aggregate destruction by ultrasonication increases soil organic matter mineralization and mobility [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5):1634-1643.
- [21] 周旺明, 王金达, 刘景双, 等. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3):1-6.
- [22] Qin Yan, Bai Yufeng, Chen Guoshuang, et al. The effects of soil freeze-thaw processes on water and salt migrations in the western Songnen Plain, China [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11:3888.
- [23] Wu Daoyong, Zhou Xiangyang, Jiang Xingyuan. Water and salt migration with phase change in saline soil during freezing and thawing processes [J]. *Groundwater*, 2018, 56(5):742-752.
- [24] Bing Hui, He Ping, Zhang Ying. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1):675-681.
- [25] Liu Bo, Ma Renming, Fan Haoming. Evaluation of the impact of freeze-thaw cycles on pore structure characteristics of black soil using X-ray computed tomography [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206:104810.
- [26] Plante A F, Conant R T, Stewart C E, et al. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(1):287-296.

(上接第 34 页)

- [33] 罗琰, 苏德荣, 纪宝明, 等. 辉河湿地不同草甸植被群落特征及其与土壤因子的关系[J]. *草业学报*, 2018, 27(3):33-43.
- [34] 王云英, 裴薇薇, 辛莹, 等. 2008—2015 年高寒草甸土壤有机碳变化特征及影响因素解析[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(12):47-54.
- [35] 张静妮, 赖欣, 李刚, 等. 贝加尔针茅草原植物多样性及土壤养分对放牧干扰的响应[J]. *草地学报*, 2010, 18(2):177-182.
- [36] 张莉, 王长庭, 刘伟, 等. 不同建植期人工草地优势种植物根系活力、群落特征及其土壤环境的关系[J]. *草业学报*, 2012, 21(5):185-194.
- [37] 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 等. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6):667-673.
- [38] 王艳芬, 陈佐忠. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(6):545-551.
- [39] 杨崇曜, 李恩贵, 陈慧颖, 等. 内蒙古西部自然植被的物种多样性及其影响因素[J]. *生物多样性*, 2017, 25(12):1303-1312.
- [40] 文海燕, 傅华, 赵哈林. 退化沙质草地植物群落物种多样性与土壤肥力的关系[J]. *草业科学*, 2008, 25(10):6-9.
- [41] 杨静, 孙宗玖, 巴德木其其格, 等. 封育对草地植被功能群多样性及土壤养分特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2018, 40(4):102-110.
- [42] 万志强, 杨九艳, 谷蕊, 等. 不同刈割频度对大针茅草原群落特征及土壤元素含量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(17):5477-5484.