

冻融循环对黑土团聚体稳定性与微结构特征的影响

王文刚^{1,2}, 王彬^{1,2}, 顾汪明¹, 陈祖明^{1,2}, 蒋瑶钰^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083)

摘要: 冻融循环作用下的土壤结构变化被认为是融雪期黑土坡面土壤侵蚀加剧的主要原因之一,土壤团聚体稳定性与团聚体微结构是影响土壤可蚀性的关键因子。基于控制条件土壤冻融模拟试验,采用湿筛法、扫描电子显微技术(SEM)和 Image-Pro Plus(IPP)图像分析处理相结合的方法,分析了冻融循环过程中黑土团聚体微结构的动态变化特征,阐明了土壤团聚体水稳定性与团聚体微结构特征的内在联系。结果表明:(1)冻融循环对黑土团聚体水稳定性整体呈破坏作用。该作用在微观层面上表现为冻融循环驱动土壤孔隙趋于长条状发育,且随冻融循环次数的增加,土壤孔隙连通性增强,面积孔隙率增加;宏观层面上表现为土壤大团聚体向微团聚体的迁移转化,土壤团聚体水稳定性下降。(2)土壤初始含水率增加会导致冻融循环过程中土壤团聚体破坏程度增强,且在7次冻融循环内呈显著性变化;随着土壤初始含水率的增高团聚体面积孔隙率呈显著增加趋势。(3)土壤团聚体面积孔隙率与平均重量直径 MWD 和几何平均直径 GMD 呈显著负相关,面积孔隙率的增加分别解释了 MWD 和 GMD 变化率的 49.1% 和 50.3%。

关键词: 典型黑土区;冻融循环;团聚体水稳定性;土壤微结构特征

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)01-0066-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.01.010

Effect of Freeze-Thaw Cycles on Soil Aggregate Stability and Microstructure of Black Soil

WANG Wengang^{1,2}, WANG Bin^{1,2}, GU Wangming¹, CHEN Zuming^{1,2}, JIANG Yaoyu^{1,2}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Three-gorges Area (Chongqing) Jinyun Forest Eco-system Research Station, Beijing 100083)

Abstract: The change of soil structure under freeze-thaw cycles is one of the main reasons for the aggravation of soil erosion on black soil slope during snowmelt period. The stability and microstructure of soil aggregates are the key factors affecting soil erodibility. Based on the controlled freezing and thawing simulation experiment, the dynamic characteristics of the microstructure of black soil aggregates during the freeze-thaw cycles were analyzed by using the wet sieving method, scanning electron microscopy (SEM) and Image Pro Plus (IPP) analysis. Moreover, the interaction between the water stability and the microstructure characteristics of soil aggregates was elucidated. The results showed that: (1) The destructive effect on soil aggregate stability was found during the freezing and thawing cycles. At the micro level, the freeze-thaw cycles derived soil pores to develop into long strips. With the increase of freeze-thaw cycles, the connectivity of soil pores and the area porosity increased. On the macro level, it showed that soil macro aggregates migrated to micro aggregates, and the water stability of aggregates decreased. (2) The increase of soil initial water content would enhance the damage degree of soil aggregate under freeze-thaw cycles, and there was a significant change within seven freeze-thaw cycles. With the increase of soil initial water content, the aggregate area porosity increased significantly. (3) Aggregate area porosity was significantly correlated to the mean weight diameter (MWD) and the geometric mean diameter (GMD). The increase of area porosity could explain 49.1% and 50.3% of MWD and GMD, respectively.

Keywords: typical black soil region; freeze-thaw cycle; water stability of soil aggregate; soil microstructure characteristics

收稿日期:2021-07-21

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0202900);国家自然科学基金项目(41977060)

第一作者:王文刚(1996—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wangwengang@bjfu.edu.cn

通信作者:王彬(1983—),男,副教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wangbin1836@bjfu.edu.cn

东北黑土区为我国典型季节性冻土区,冻融循环引发的土壤结构的改变,被认为是导致该地区冬末春初坡面土壤侵蚀加剧的主要原因之一^[1]。冻融循环发生时土壤孔隙水的相变过程对土壤颗粒的键合与分布排列具有明显作用,进而改变土壤微结构特征与团聚体稳定性^[2-3],导致土壤可蚀性发生分异变化^[4]。团聚体稳定性与土壤微结构是影响土壤结构稳定性的关键因子^[5],结构良好的土壤具有更好的稳定性与抗蚀性^[6]。

已有研究^[7-9]表明,即使是同一土壤也会因冻融循环次数或土壤含水量等因子的差异导致土壤团聚体稳定性呈现明显异质性。Oztas 等^[7]研究发现,土壤团聚体稳定性通常在 3~6 次冻融循环内得到加强,6 次冻融循环阈值后团聚体稳定性表现为下降趋势。王展等^[8]研究表明,土壤微团聚体平均质量直径随冻融循环次数增加表现为先增加后降低的变化趋势。Ma 等^[3]提出,随冻融循环次数增加,土壤团聚体稳定性降低,20 次冻融循环后,黑土抗崩解稳定性与抗机械破坏稳定性分别降低 42.3%,62.7%;当土壤含水量在 40% 上下变化时,黑土不同粒径土壤水稳性团聚体含量表现为相反的变化趋势^[9]。Žabenská 等^[10]认为,团聚体稳定性对冻融循环的响应存在争议,冻融循环降低团聚体稳定性的假设仍未得到试验结果的证实。王风等^[11]通过冻融模拟试验发现,40% 初始含水量条件下冻融作用会增加黑土团聚体稳定性,而过高或过低的土壤含水量均会降低其结构稳定。牛浩等^[12]则提出,冻融作用会使 50% 初始含水率的黑土团聚体稳定性增强。而金万鹏等^[13]、Fu 等^[14]研究发现,冻融循环通常促进黑土团聚体的破碎分解,破坏土壤结构,降低团聚体的稳定性。综上所述,冻融循环作用对黑土团聚体稳定性的影响未形成一致观点^[11-14],尚未明晰多次冻融循环作用下土壤团聚体机械应力的累积效应^[15],因此,开展不同冻融循环次数对不同初始土壤含水量条件下土壤团聚体稳定性的影响研究,对分析黑土区冬春季坡面土壤抗侵蚀能力的动态变化具有重要意义。

受限于技术手段等因素的影响,现有研究大都通过冻融循环过程对土壤团聚体稳定性等宏观性质的变异特征研究,揭示土壤可蚀性的变化与冻融侵蚀机理;而对冻融循环过程中土壤微结构的动态变化特征以及微结构变化与团聚体稳定性等宏观性质改变的内在联系研究相对薄弱。电子科学技术的发展使扫描电子显微镜(SEM)技术应用于土壤微观尺度的研究成为可能,因具有高分辨率、较广的放大倍率、可多角度观察分析试样等特点,SEM 技术被逐步应用于土壤微结构量化分析。张英等^[5]基于 SEM 试验分

析了冻融循环对粉质黏土力学性质改变的微观机制发现,连通孔隙与裂隙的产生改变了土壤颗粒骨架与颗粒特征,土壤结构与受力体系发生改变,最终导致了土壤力学性质的变化。丁智等^[16]通过 SEM 试验分析了冻融循环过程中冻融软土微观结构的变化表明,冻融循环破坏了土壤颗粒间的联结,土壤骨架重新分布排列,微小孔隙发育并连通为大土壤孔隙,土壤结构发生弱化效应。土壤宏观力学性质的改变被认为可以从土壤微观结构的发展变化中得到解释^[3]。因此,研究黑土微结构对冻融循环过程的响应特征,将为团聚体宏观性质的改变提供一定的解释依据与数据支撑。

本研究选取东北典型黑土为研究对象,通过控制条件冻融循环模拟试验,并结合湿筛法、扫描电镜(SEM)和 IPP 图像处理分析等方法,分析了冻融循环过程黑土团聚体水稳定性变化特征,量化了土壤微结构动态演化过程,并进一步探讨了团聚体水稳性与土壤微结构演化的内在联系。以期进一步加深理解冻融循环作用对黑土团聚体稳定性与微结构特征的作用机制,为黑土资源保护和水土流失防治提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 土样采集与处理

土壤样品采自黑龙江省克山县克山农场(125°08'00"—125°37'00"E,48°12'00"—48°23'00"N)。该地区气候为典型温带大陆性季风气候,年平均气温 2.1℃,年平均降水量 500 mm。四季温差大,霜冻早,秋季迅速降温,冬季漫长多雪。土壤冻结多发生在 11 月至翌年 3 月。3 月下旬至 5 月中上旬气温逐渐回升,受昼夜温差的影响,土壤呈现出白昼消融解冻,夜间再次冻结的融冻特征,白昼融雪发生时坡面径流侵蚀严重^[3,9]。

2018 年 5—6 月,春季土壤解冻后,在研究区玉米坡耕地中布设 1 m×1 m 样地,样地内随机选取了 5 个采样点,采集表层原状土壤(0—10 cm)带回实验室后风干待测。干筛法^[17]得出 >5, 5~2, 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25, <0.25 mm 6 种粒径的土壤团聚体含量,分别为 14.28%, 43.48%, 17.44%, 11.09%, 7.73%, 5.98%。同时,环刀采集原状土样,测定土壤饱和含水率、田间持水量以及土壤容重^[3]。

1.2 土壤冻融循环处理

基于野外调查与定位监测资料,试验设计了 4 种不同初始土壤含水量(质量含水率分别为:风干 FG, 3.34%; 70% 田间持水量 TS, 22.57%; 田间持水量土壤 TJ, 32.25%; 饱和 BH, 43.39%),其中风干条件为对照。采用控制土壤水分吸力(基质势 φ)的方法,通过改进沙盘法控制并得到各设计初始土壤含水量,以减少

湿润过程中水分对土壤团聚体的消散与崩解破坏^[18]；土壤达到设置含水量后按设定容重 1.28 g/cm³ 填入土柱。冻结与融化时间分别设置为 12 h，以确保土柱内土壤发生完全的冻结与消融，冻融温度根据当地气温变化分别设置为 -15, 6 °C。基于野外土壤的冻融周期在 30 天左右，试验设置了 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30 次共 9 个冻融循环处理，每个处理 3 次重复。

1.3 土壤湿筛

冻融循环处理后，各试样自然风干。湿筛法^[19]测定风干后冻融土样的水稳定性。选取 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm 套筛进行土壤团聚体筛分，筛分后各粒级样品在 60 °C 下烘干至恒重并称重；获取 >5, 5~2, 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25, < 0.25 mm 6 个粒级的水稳性团聚体质量。

1.4 SEM 扫描与 IPP 图像处理

室内模拟冻融循环后，将土壤削成 1 cm×1 cm×2 cm 的试样，风干后镀膜处理，采用日立 S-3400N II 型扫描电镜装置对典型土壤孔隙或单元体进行拍摄。根据已有研究^[20]，SEM 在 200~600 的放大倍数下可清晰观察到土壤微形态信息，故选择 500 倍数放大观测。采用 Image-Pro Plus (IPP) 6.0 软件处理土壤 SEM 图像，多人多次的目视分割法确定阈值，执行灰度阈值处理以区分土壤颗粒与土壤孔隙，将 SEM 图像转化为黑白二元图像，分析土壤微结构特征。

选取面积孔隙率、孔隙丰度和孔隙成圆率表征冻融循环过程中土壤微结构的动态变化。面积孔隙率用以衡量土壤孔隙的发育程度，是土壤内孔隙占据土壤二维平面面积的百分比。孔隙丰度与孔隙成圆率均用以表征土壤孔隙的几何形态，孔隙丰度范围为 0~1，丰度值趋近 0 值，表明土壤孔隙趋近长条形分布，趋近 1 值则趋近圆形分布。孔隙成圆率趋近 1 值，表明土壤孔隙趋近圆形分布，等于 1 则为圆形，大于 1 表示非圆形分布^[21]。

1.5 数据处理

(1) 选取土壤团聚体平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 作为团聚体稳定性的评价指标，MWD 与 GMD 值越大，表明土壤团聚体越稳定。计算公式为：

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

$$\text{GMD} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}\right)$$

式中： w_i 为第 i 粒级团聚体质量百分数 (%)； x_i 指相邻两级团聚体的平均粒径 (mm)； $\ln x_i$ 为土壤粒级平均直径的自然对数。

(2) 选用土壤团聚体破碎变化系数，分析不同含水量土壤团聚体强度的动态变化。 K_{var} 值变化范围越大代表团聚体破碎强度越剧烈^[13, 22]。

$$K_{\text{var}} = \sum |A_i - B_i| / N$$

式中： K_{var} 为变化系数； A_i 为冻融前第 i 个团聚体粒径质量分数； B_i 为冻融后第 i 个团聚体粒径质量分数； N 为冻融循环次数。

$$P_i = \frac{m_i}{m_o} \times 100\%$$

式中： P_i 为处理后的各粒级团聚体质量百分数 (%)； m_i 为各粒级团聚体的质量 (g)； m_o 为样品总质量 (g)。

采用 SPSS 24.0 软件进行方差分析，沃德—邓肯法进行多重比较，偏最小二乘回归 (partial least squares regression, PLSR) 模型进行团聚体水稳定性与土微结构演化的内在联系分析，量化土壤微结构参数对团聚体稳定性变化的贡献度，通过 SIMCA-P 11.5 进行模型构建。PLSR 分析中，预测因子 (微结构参数) 对响应变量 (团聚体稳定性) 的作用强弱通过最具解释成分中的预测因子的权重和回归系数进行判断。当回归模型中 $Q^2_{\text{cum}} > 0.097$ 和 $R^2 Y_{\text{cum}} > 0.5$ 时，认为预测因子对响应变量的影响是显著的，并且预测因子可提供响应变量可靠的预测度。变量投影重要性 (variable importance of projection, VIP) 表示预测因子对响应变量的解释权重，VIP > 1.0 时，预测因子对响应变量具有重要解释作用；0.8 < VIP < 1.0 时，预测因子对响应变量有重要影响，VIP < 0.8 时，预测因子对响应变量的解释作用很小。RC 为回归系数，表示预测因子对响应变量的变化方向与强度^[23]。

2 结果与分析

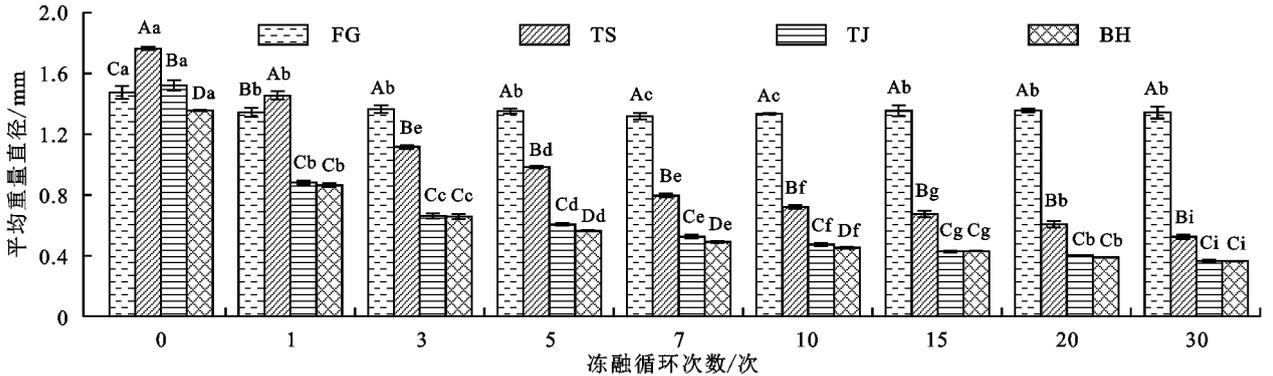
2.1 土壤团聚体水稳定性与粒径分布特征

2.1.1 土壤团聚体水稳定性特征 由图 1 和图 2 可知，冻融循环对黑土团聚体水稳定性整体表现为破坏作用，且随着初始土壤含水量的增加，冻融循环的破坏作用更为剧烈。对于相同初始土壤含水量条件，随冻融循环次数的增加团聚体水稳定性显著降低 ($P < 0.05$)，且冻融循环次数对团聚体水稳性的影响表现出显著差异性；而 FG 条件下，冻融循环对团聚体水稳性的影响并不明显。相同冻融循环次数条件，3 次冻融循环后随初始土壤含水量上升团聚体水稳性显著下降 ($P < 0.05$)，在第 3 次与 15~30 次冻融循环内 TJ 与 BH 条件土壤团聚体水稳性无显著差异，其余不同初始土壤含水量均表现出显著差异性 ($P < 0.05$)。

30 次冻融循环内，不同初始土壤含水量条件下的团聚体 MWD 和 GMD 变化范围分别为：FG, 1.44~1.34, 0.91~0.85 mm；TS, 1.76~0.53, 1.06~0.43 mm；TJ, 1.52~0.37, 0.88~0.33 mm；BH, 1.36~

0.36, 0.78~0.33 mm, 测定结果与王凤等^[24]在相近研究区发现的田间持水量条件下黑土水稳性团聚体 MWD 为 1.04~0.65 mm 的结果相近。30 次冻融循环后, 各初始土壤含水量下的团聚体水稳性均显著下降 ($P < 0.05$); FG、TS、TJ 与 BH 条件土壤的 MWD 分别降低 7.6%, 70.1%, 75.9%, 73.2%; GMD 分别降低 6.6%, 59.2%, 62.3%, 58.1%, 测定结果与 Ma 等^[3]、金万鹏等^[13]关于黑土团聚体对冻融循环响应特征的试验结果一致, 证实了冻融循环对土壤团聚

体水稳定性具有明显的破坏作用, 而与 Li 等^[9]黑土含水量 $\leq 40\%$ 时, 冻融循环促进团聚体的水稳定性, $> 40\%$ 时, 团聚体水稳性通常降低的试验结论不相符。冻融作用于土壤时, 土壤容重的差异可能导致团聚体稳定性不同, 本试验 1.28 g/cm^3 的土壤容重为 Li 等^[9]采用的 0.9 g/cm^3 的 1.42 倍, 温美丽等^[25]研究表明, 冻融循环作用通常使小容重土壤变的更加紧密, 大容重土壤结构变得更加疏松, 这可能导致土壤团聚体稳定性的异质性变化。



注: FG 为风干土壤; TS 为 70% 田间持水量土壤; TJ 为田间持水量土壤; BH 为饱和土壤; 图柱上方不同大写字母表示同一冻融循环次数不同初始土壤含水量间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一初始土壤含水量不同冻融循环次数间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 团聚体平均重量直径随冻融循环次数的变化

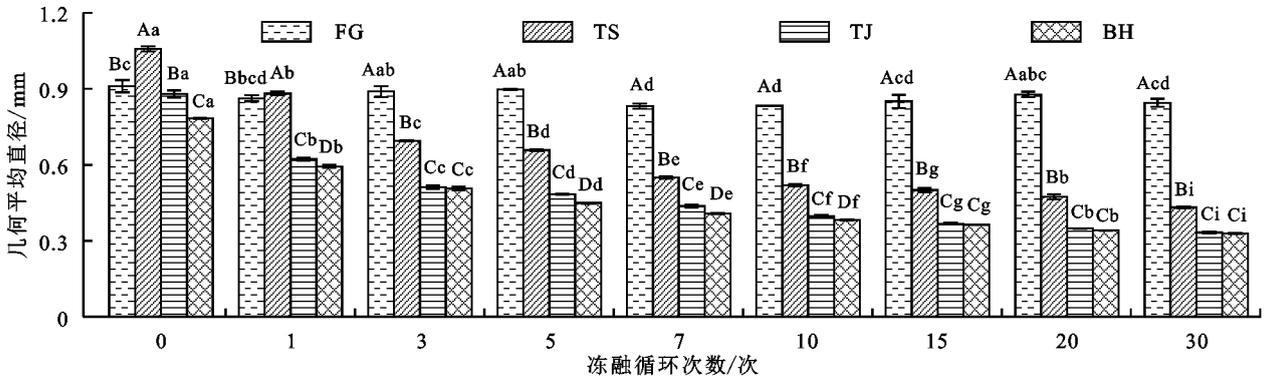


图 2 团聚体几何平均直径随冻融循环次数的变化

冻融循环对团聚体水稳性的破坏程度受初始含水量的影响显著。30 次冻融循环, TS、TJ 与 BH 条件土壤团聚体水稳性在大幅度下降后逐渐趋于稳定减小, 而 FG 条件土壤团聚体水稳性只表现为较小范围内 (13%) 的波动变化。相同冻融循环次数、不同初始土壤含水量团聚体水稳性在 3 次冻融循环后均为 $FG > TS > TJ > BH$, 而在 0 次与 1 次冻融循环时, TS 条件土壤团聚体水稳性最强, 可见 70% 田间持水量在 0 次与 1 次冻融循环内有所提高团聚体的水稳性, 而其自身稳定性仍表现为下降趋势。初始含水量最高的 BH 条件下, 土壤团聚体在 30 次冻融循环内团聚体水稳性最低。其主要原因为, 在土壤冻结过程中, 孔隙水的分布是冰晶冻胀发展的基础, FG 条件土壤作为低含水量土壤, 有限的水分形成的冻胀冰晶可被土壤原有孔隙体积所容纳^[26-27]。TS、

TJ 与 BH 条件土壤, 冰晶的发展有一定的水分基础, 这就不可避免地在土壤内形成超越土壤原有孔隙体积的冻胀冰晶。当冰晶冻胀应力超越土壤抗拉强度时, 驱动土壤孔隙扩大生长, 分裂破碎土壤团聚体^[28], 导致团聚体稳定性下降。

2.1.2 团聚体粒径分布特征 冻融循环过程中, 土壤发生明显的团聚体粒径间迁移转化 (图 3)。随冻融循环次数增加, TS、TJ 与 BH 条件下土壤团聚体均表现出由大团聚体向微团聚体转移的现象, 大团聚体分裂破碎占比减小, 微团聚体累积比例增加; 而冻融循环作用下 FG 条件土壤团聚体间的迁移转化并不明显。FG 条件土壤与 TS、TJ、BH 土壤团聚体分裂破碎的差异性主要在于初始含水量对冰晶体积发展的影响。冰晶冻胀生长通常造成土壤团聚体发生分裂破碎^[28], 初始含水量在一定程度上限制了冻融

循环对团聚体的破坏(图 1 和图 2)。在土壤冻结过程中,水分相变为冻胀冰晶,体积增大 9%,且随着冻融的循环交替,冰晶进一步发展施加更大的挤压力,形成破坏性的冻胀^[29],分裂土壤团聚体。

不同初始土壤含水量条件,团聚体的迁移转化路径表现不同。TS 条件土壤团聚体表现为 $>5, 5 \sim 2, 2 \sim 1$ mm 的团聚体向 $1 \sim 0.5, 0.5 \sim 0.25, <0.25$ mm 微团聚体的迁移; TJ 与 BH 条件土壤团聚体均表现为 $>5, 5 \sim 2, 2 \sim 1, 1 \sim 0.5$ mm 的团聚体向 $0.5 \sim 0.25, <0.25$ mm 微团聚体的迁移。冻融循环作用的土壤大团聚体向微团聚体的转移现象与已有研究^[12-13]相似。冻结过程中,团聚体不仅有来自冰晶的冻胀生长造成的分裂破碎作用,同时也有冻融循环引起土壤内部空气收缩造成的聚合效应^[9],团聚体的破

碎机制是冰晶体积增长与空气体积收缩的矛盾统一^[11],对于粒径较大的土壤团聚体,其内部空间可分布更多水分,冻胀应力的分裂破碎大于颗粒的团聚效应,表现为大团聚体的占比逐渐降低;对于微团聚体,内部空间狭小,含水量分布少,冻融循环的分裂效应小,它们具有比大团聚体更强的抗挤压力与抗收缩力。故而在土壤冻融循环过程中,通常发生大团聚体颗粒的分裂破碎与转移,微团聚体的聚合累积,含量增加。造成 $1 \sim 0.5$ mm 粒径团聚体在 TS 条件土壤含量增加,而在 TJ 与 BH 土壤含量减少的这种迁移转化路径的差异来自团聚作用向分裂作用的转化, TJ 与 BH 条件土壤水分含量增加,空气含量有所减少,这种条件下更多水分可渗入 $1 \sim 0.5$ mm 的团聚体内,增加了冻胀应力的分裂破碎作用。

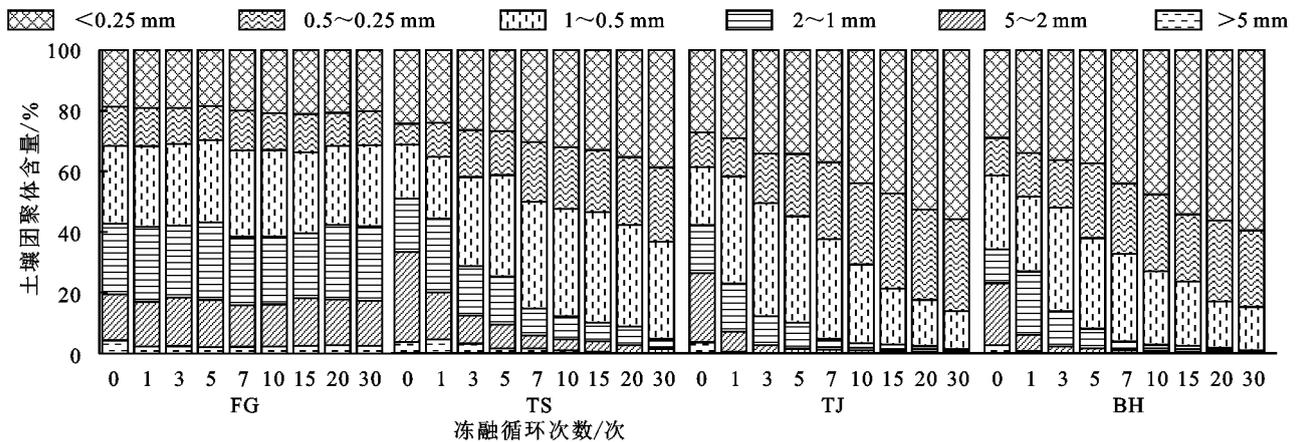


图 3 不同初始含水量土壤团聚体粒径分布随冻融循环次数的变化

2.2 团聚体破碎强度变化特征

不同初始含水量土壤均表现为在 1 次冻融循环时团聚体强度变化系数最大,3 次冻融循环 K_{var} 快速降低后逐渐趋于平稳减小(图 4),这种变化趋势同金万鹏等^[13]关于冻融循环影响下黑土不同粒径团聚体破碎强度的动态变化一致。TS、TJ 与 BH 条件土壤团聚体的破碎变化明显高于 FG 条件下土壤团聚体的变化程度。TS 与 TJ 条件土壤在 7 次冻融循环内 K_{var} 变化均分布在中等强度区,10~30 次冻融循环 K_{var} 降低在低强度区分布;BH 条件土壤在 5 次冻融循环内 K_{var} 变化分布在中等强度区,7~30 次冻融循环 K_{var} 降低在低强度区分布;而 FG 条件土壤在 3 次冻融循环后 K_{var} 再无明显波动变化,30 次冻融循环内变化系数均处于低强度变化区。

FG 条件土壤团聚体的破碎强度变化反映在其粒径分布特征中(图 3),含水量限制了冰晶冻胀应力对团聚体的分裂与破碎,表现为团聚体强度的变化程度相对较低。相对于 FG 条件土壤,TS、TJ 与 BH 条件土壤整体表现为前 7 次冻融循环对团聚体的强烈破坏,与 Leuther 等^[2]5 个冻融循环次数显著影响土壤

结构以及金万鹏等^[13]9 次冻融循环显著影响土壤稳定结果相近,进一步证实冻融循环对土壤团聚体的强烈破坏发生在冻融循环的前期。7 次冻融循环后 TS、TJ 与 BH 条件土壤 K_{var} 降低至分布在低强度区并以相同趋势降低的主要原因在于,前期的冻融循环过程中大团聚体被冻胀冰晶分裂破碎,迁移转化为内部空间无法容纳较多水分的微团聚体(图 3),存在于微团聚体内部的仅有水分无法形成破坏性的冻胀应力或是这种破坏性很小,微团聚体表现为强抗挤压力与抗收缩能力^[9],土壤结构趋于新的稳态,冻融的破坏作用逐渐弱化。

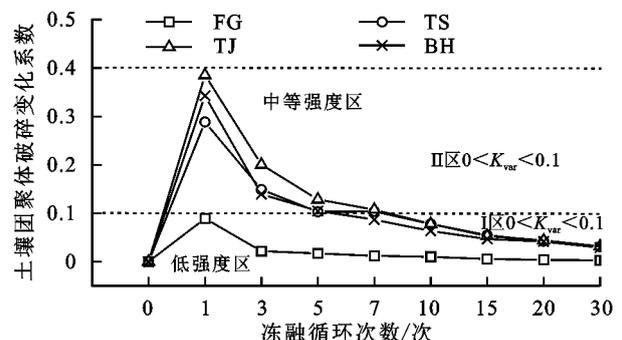


图 4 不同初始含水量土壤团聚体破碎变化系数随冻融循环次数的变化

3 次冻融循环内, K_{var} 表现为 $TJ > BH > TS > FG$; 5~30 次冻融循环内 K_{var} 的分布发生改变, 表现为 $TJ > TS > BH > FG$; 而在 30 次冻融循环内团聚体强度变化整体表现为 TJ 条件土壤团聚体对冻融循环的响应最为强烈, 大于作为孔隙水分布最多的 BH 条件土壤团聚体的变化强度, 这可能在土柱层面, BH 条件土壤颗粒间所有孔隙被水分填满, 冻结发生时土壤团聚体受到各个方向的冰晶挤压作用, 在一定程度上弱化了冰晶的分裂破碎作用。

2.3 土壤微结构特征

相同初始土壤含水量条件下, 随冻融循环次数增加, 团聚体面积孔隙率显著上升 ($P < 0.05$), 且冻融循环次数对团聚体面积孔隙率的影响有显著差异性, FG 条件土壤面积孔隙率未表现出明显的变化规律 (表 1)。30 次冻融循环下, TS、TJ 与 BH 条件土壤面积孔隙率分别由 0 次冻融时的 11.65%, 8.73%, 2.51% 增长到 16.27%, 23.19%, 22.19%, 增长率分别达 39.65%, 165.64%, 784.06%。FG 条件土壤面积孔隙率在经历上下波动变化后最终表现为 20.97% 的增加比; 初始土壤含水量分布最高的 BH 条件土壤面积孔隙率的增加表现最为剧烈。试验呈现出与 Ma 等^[3] 相同的黑土微结构对冻融循环的响应变化规律, 且高含水量比低含水量土壤孔隙特征的变异更为显著。土壤孔隙率的增加源于冰晶冻胀应力挤压土壤原有孔隙, 造成土壤孔隙的生长发育, 受限于土壤弹性小^[30], 消融后的土壤收缩不足以补偿冰晶的冻胀所增加的孔隙体积, 冰晶产生的这种不可逆的变形导致土壤无法还原为原有的孔隙分布状态与结构特征^[27]; 在冻融的循环交替下土壤孔隙不断发育, 面积

孔隙率持续增加。由图 5 和图 6 可知, 在冻融循环次数不断增加的过程中, 土壤孔隙数量逐渐增多, 孔隙形态趋于长条状发育, 微孔隙逐渐相互连通, 形成了复杂的孔隙网络, 表现为土壤面积孔隙率的增长。相对于低含水量土壤, 高含水量带给土壤原有孔隙更大的冰晶冻胀应力, 故而 BH 条件土壤面积孔隙率的增加更为剧烈。

不同初始土壤含水量对土壤孔隙丰度与孔隙成圆率均有显著影响 ($P < 0.05$), 冻融循环次数对土壤孔隙丰度也表现出显著影响, 但对土壤孔隙成圆率的影响并不明显 ($P < 0.05$)。30 次冻融循环内, 不同初始土壤含水量条件土壤孔隙丰度与孔隙成圆率均未表现出规律性变化, 这可能存在试验扫描过程的影响。但孔隙丰度整体表现为小于 0 次未冻融土壤的孔隙丰度值, 变化趋势呈现趋近于 0 值减小, 除 TJ 条件土壤丰度值略有增加, FG、TS、TJ 与 BH 条件土壤孔隙丰度值的变化分别为 -17.8%, -12.8%, 6.8%, -10.0%; 土壤孔隙成圆率整体高于 0 次未冻融土壤的孔隙成圆率, 变化趋势偏离 1 值增加, FG、TS、TJ 与 BH 条件土壤的孔隙成圆率变化分别为 6.8%, 4.8%, 71.3%, 40.8%。可见, 冻融循环倾向于驱动土壤孔隙向长条状发育, 观测到的土壤 SEM 图像中土壤孔隙的形态特征应征了这一点, 随冻融循环次数增加, 土壤孔隙数量增多, 微孔隙相互连通发育成长条状大土壤孔隙, 发育成复杂的土壤孔隙网状结构 (图 5 和图 6)。土壤孔隙丰度与孔隙成圆率也均未表现出高含水量土壤比低含水量土壤的剧烈变化, 试验过程中土样切片与典型孔隙的扫描可能影响了这一规律性变化。

表 1 土壤微结构参数随冻融循环次数的变化

指标	处理	0 次	1 次	3 次	5 次	7 次	10 次	15 次	20 次	30 次
面积孔隙率	FG	5.72Bc	13.35Bbc	5.82Bbc	13.05Babc	7.12Babc	7.73Bab	8.13Bab	7.83Bab	6.92Ba
	TS	11.65Ac	12.05Abc	11.94Abc	12.75Aabc	13.05Aabc	13.15Aab	14.66Aab	15.16Aab	16.27Aa
	TJ	8.73Ac	10.94Abc	12.95Abc	13.76Aabc	16.16Aabc	18.57Aab	19.28Aab	20.58Aab	23.19Aa
	BH	2.51ABc	6.63ABbc	8.33ABbc	9.74ABabc	12.35ABabc	13.86ABab	16.87ABab	18.67ABab	22.19ABa
孔隙丰度	FG	0.45Ca	0.40Cab	0.34Cab	0.41Cb	0.42Cab	0.41Cab	0.34Cab	0.35Cab	0.37Cab
	TS	0.47BCa	0.38BCab	0.38BCab	0.37BCb	0.37BCab	0.44BCab	0.45BCab	0.44BCab	0.41BCab
	TJ	0.44ABa	0.44ABab	0.44ABab	0.39ABb	0.46ABab	0.44ABab	0.46ABab	0.46ABab	0.47ABab
	BH	0.50Aa	0.42Aab	0.47Aab	0.44Ab	0.43Aab	0.44Aab	0.47Aab	0.46Aab	0.45Aab
孔隙成圆率	FG	7.21ABa	10.33ABa	7.43ABa	14.17ABa	8.91ABa	9.31ABa	6.90ABa	7.17ABa	7.70ABa
	TS	4.80Ba	8.15Ba	7.70Ba	7.75Ba	6.90Ba	6.14Ba	6.63Ba	6.05Ba	5.03Ba
	TJ	7.70Aa	13.55Aa	7.03Aa	6.81Aa	10.96Aa	8.59Aa	11.14Aa	11.81Aa	13.19Aa
	BH	6.77Aa	6.90Aa	6.45Aa	9.44Aa	14.53Aa	8.90Aa	11.72Aa	11.00Aa	9.53Aa

注: 同列不同大写字母表示不同含水率土壤间差异显著; 同行不同小写字母表示不同冻融循环次数间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 微结构特征与团聚体水稳定性分析

土壤团聚体水稳性与团聚体微结构偏最小二乘回归 (PLSR) 模型表明, 土壤面积孔隙率的增长是解

释团聚体水稳性下降的主要预测因子, 土壤孔隙丰度的变化对团聚体水稳性有重要影响 (表 2 和表 3)。PLSR_{MWD} 与 PLSR_{GMD} 的交叉验证均只提取了 1 个主

成分(面积孔隙率)解释了团聚体水稳性的变异,面积孔隙率是解释土壤 MWD($VIP=1.561>1$)与 GMD($VIP=1.553>1$)变异的重要因子,分别解释了 MWD 和 GMD 变化率的 49.1%和 50.3%,模型均具有较好的可预测性。

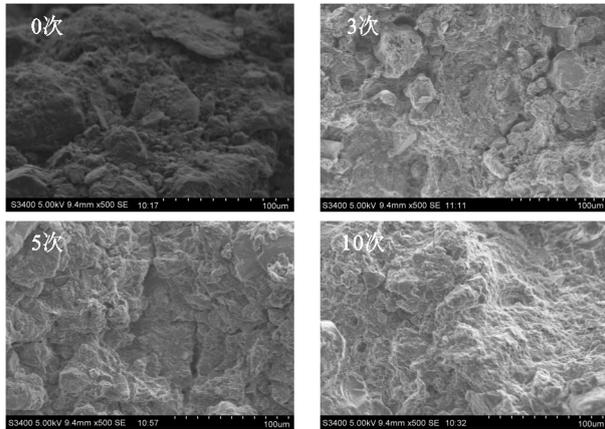


图 5 TS 条件冻融土壤 0,3,5,10 次 SEM 图像

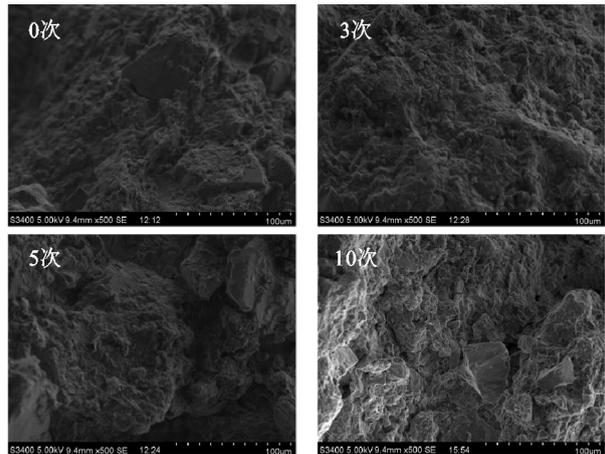


图 6 BH 条件冻融土壤 0,3,5,10 次 SEM 图像

MWD、GMD 与团聚体面积孔隙率显著负相关,相关系数 RC 值分别为 -0.409 , -0.416 , 面积孔隙率的增加导致团聚体水稳性的下降。Munkholm 等^[31]证实了土壤孔隙特性对土壤易碎性存在显著影响,土壤孔隙连续性的增加导致了土壤几何平均直径的降低,土壤孔隙结构的改变解释了土壤破碎度与土壤强度变化率的 55%^[32]。Naveed 等^[33]指出,多孔的土壤显得更加脆弱,土壤孔隙在发展的同时土壤强度逐渐降低。Ma 等^[3]研究表明,黑土孔隙特征的变化解释了团聚体抗崩解稳定性与机械破坏稳定性变化率的 86%,81%。黑土团聚体水稳性与微结构形态特征的变化密切相关,团聚体水稳性的变化可从其微结构改变中得到解释。土壤冻融循环过程中,冰晶生长导致土壤孔隙的发育破坏了颗粒间的键合,土壤颗粒重新分布排列,大团聚体颗粒转化成微团聚颗粒(图 3),土壤颗粒骨架与颗粒特征改变;冻融的循环交替,使得微孔隙不断发育并相互连通成为更大的

土壤孔隙,形成复杂的孔隙网络(图 5 和图 6),分裂团聚体与土壤结构,造成土壤结构的疏松与弱化,最终导致土壤宏观力学性质的改变,土壤团聚体水稳性降低(图 1 和图 2)。

表 2 团聚体稳定性与微结构参数的 PLSR 模型内容

指标	最具解释成分数量	R^2Y	Q^2	R^2Y_{cum}	Q^2_{cum}
MWD	1(面积孔隙率)	0.491	0.443	0.491	0.443
GMD	1(面积孔隙率)	0.503	0.453	0.503	0.453

表 3 PLSR 中 MWD、GMD 与微结构参数的 VIP 和 RC 值

微结构参数	MWD		GMD	
	VIP	RC	VIP	RC
面积孔隙率	1.561	-0.409	1.553	-0.416
孔隙丰度	0.915	-0.240	0.988	-0.265
孔隙成圆率	0.681	-0.179	0.649	-0.174

3 结论

(1)冻融循环对黑土团聚体水稳定性整体呈破坏作用。该作用在微观尺度上表现为冻融循环驱动土壤孔隙趋于长条状发育,且随冻融循环次数的增加,土壤孔隙连通性增强,面积孔隙率增加;宏观尺度上表现为土壤大团聚体向微团聚体的迁移转化,土壤团聚体水稳定性下降。

(2)土壤初始含水量增加会导致冻融循环下土壤团聚体破坏程度增强,且在 7 次冻融循环内呈显著变化;随着土壤初始含水量的增高团聚体面积孔隙率呈显著增加趋势。

(3)土壤团聚体面积孔隙率与平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)呈显著负相关,面积孔隙率的增加分别解释了 MWD 和 GMD 变化率的 49.1%和 50.3%。

参考文献:

- [1] 刘绪军,景国臣,杨亚娟,等.冻融交替作用对表层黑土结构的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(1):42-46.
- [2] Leuther F, Schlüter S. Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties [J].Soil Discussions,2021, 7(1):179-191.
- [3] Ma R M, Jiang Y, Liu B, et al. Effects of pore structure characterized by synchrotron -based microcomputed tomography on aggregate stability of black soil under freeze-thaw cycles [J].Soil Tillage Research,2021,207(3):e104855.
- [4] 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.
- [5] 张英,邵慧.基于压汞法的冻融循环对土体孔隙特征影响的试验研究[J].冰川冻土,2015,37(1):169-174.
- [6] Ma Q H, Zhang K L, Jabro J D, et al. Freeze-thaw cycles effects on soil physical properties under different

- degraded conditions in Northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(10): e321.
- [7] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability [J]. *Catena*, 2003, 52(1): 1-8.
- [8] 王展, 张玉龙, 虞娜, 等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 83-88.
- [9] Li G Y, Fan H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of northeast China [J]. *Pedosphere*, 2014, 24(2): 285-290.
- [10] Žabenská A, Dumbrovský M. Changes of soil aggregate stability as a result of the effect of freeze-thaw cycles [J]. *Acta Universitatis Agriculture Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2015, 63(4): 1211-1218.
- [11] 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.
- [12] 牛浩, 罗万清, 王晋峰, 等. 冻融对东北黑土风干团聚体与水稳性团聚体组成及稳定性的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4): 841-847.
- [13] 金万鹏, 范昊明, 刘博, 等. 冻融交替对黑土团聚体稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4195-4201.
- [14] Fu Q, Yan J W, Li H, et al. Effects of biochar amendment on nitrogen mineralization in black soil with different moisture contents under freeze-thaw cycles [J]. *Geoderma*, 2019, 353: 459-467.
- [15] 魏霞, 丁永建, 李勋贵. 冻融侵蚀研究的回顾与展望[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 271-275.
- [16] 丁智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁循环荷载下冻融软土孔压发展及微观结构研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(11): 2328-2336.
- [17] Zhang S X, Li Q, Lü Y, et al. Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 147-156.
- [18] Edwards L. 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*, 2006, 42(2): 193-204.
- [19] 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.
- [20] 袁中夏, 王兰民, 邓津. 电镜图像在黄土结构性研究中应用的几个问题[J]. *工程勘察*, 2005, 195(4): 1-4, 12.
- [21] 蒋森峰, 仝磊, 吕岩. 季冻区草炭土微观结构特性对生态环境的作用研究[J]. *环境科学与管理*, 2020, 45(6): 175-179.
- [22] Zhang Z, Pendin V V, Feng W J, et al. The influence of freeze-thaw cycles on the granulometric composition of Moscow morainic clay [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2018, 7(3): 199-205.
- [23] Trap Jean, Hattenschwiler S, Gattin I, et al. Forest ageing: An unexpected driver of beech leaf litter quality variability in European forests with strong consequences on soil processes [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 302: 338-345.
- [24] 王风, 李海波, 韩晓增, 等. 黑土水稳性团聚体测定方法研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23(2): 138-140, 145.
- [25] 温美丽, 刘宝元, 魏欣, 等. 冻融作用对东北黑土容重的影响[J]. *土壤通报*, 2009, 40(3): 492-495.
- [26] Zhang Q, Song Z P, Li X, et al. Deformation behaviors and microstructure characteristics variation of the weathered soil of Pisha sandstone caused by freezing-thawing effect [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 167(1): e102864.
- [27] Lu Y, Liu S H, Alonso E, et al. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 157: 206-214.
- [28] Liu Y H, Li D Q, Chen L, et al. Study on the mechanical criterion of ice lens formation based on pore size distribution [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(24): e8981.
- [29] Kim V, Kim M. Experimental studies of soil frost heaving pressure development in confined space [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 272: e022018.
- [30] Xie S B, Qu J J, Lai Y M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(4): 999-1009.
- [31] Munkholm L J, Schjonning P, Kay B D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(1/2): 125-135.
- [32] Munkholm L J, Heck R J, Deen B, et al. Relationship between soil aggregate strength shape and porosity for soils under different long-term management [J]. *Geoderma*, 2016, 268: 52-59.
- [33] Naveed M, Arthur E, De Jonge L W, et al. Pore structure of natural and regenerated soil aggregates: An X-ray computed tomography analysis [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(2): 377-386.