

冻融循环作用对黑土团聚体破碎机制的影响

孙义秋¹, 顾汪明^{2,3}, 关颖慧³, 吴海龙¹

(1.天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 2.济宁自然资源和规划局,
山东 济宁 272000; 3.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为探究冻融循环作用对黑土团聚体抵抗不同破坏作用能力的影响,以黑龙江省典型黑土耕作层土壤为研究对象,通过 LB 法的 3 种不同破碎处理,分析冻融循环次数、初始含水量对不同初始粒级土壤团聚体稳定性的作用机制。结果表明:冻融循环作用对 1~2, 2~3, 3~5 mm 不同粒级团聚体稳定性有显著影响 ($P < 0.05$),其稳定性均呈现为湿润振荡 (WS) > 慢速湿润 (SW) > 快速湿润 (FW),快速湿润 (FW) 处理对黑土团聚体稳定性的破坏作用最大,而慢速湿润 (SW) 和湿润振荡 (WS) 破坏作用较小。同时,初始含水量和冻融循环次数对 3 种不同粒级团聚体的快速湿润平均重量直径 (MWD_{FW})、慢速湿润平均重量直径 (MWD_{SW})、湿润振荡平均重量直径 (MWD_{WS}) 均具有极显著影响 ($P < 0.01$)。随着冻融循环交替次数的增加, >0.2 mm 的大团聚体破碎而小团聚体 (<0.2 mm) 含量增加。初始含水量对于 2~3, 3~5 mm 粒级团聚体具有破坏作用,而对 1~2 mm 粒级团聚体有助于改良团聚体结构,增大团聚体稳定性。

关键词: 冻融循环; 破碎机制; 黑土团聚体

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0053-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.008

Effect of Freeze-thaw Cycle on the Fragmentation Mechanism of Black Soil Aggregates

SUN Yiqiu¹, GU Wangming^{2,3}, GUAN Yinghui³, WU Hailong¹

(1.College of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology,
Tianjin 300384; 2.Jining Natural Resources and Planning Bureau, Jining, Shandong 272000;
3.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to explore the effect of freeze-thaw cycle on the ability of black soil aggregate to resist the influence of different damage, the typical black soil of Heilongjiang province was taken as the research object, and the effects of freeze-thaw cycles and the initial moisture content on stability of soil aggregate with different initial size were analyzed through three different crushing processes of LB method. The results showed that the freeze-thaw cycles had significant effect on the stability of aggregates with different size of 1~2, 2~3 and 3~5 mm ($P < 0.05$). The stability of aggregates followed the order of wetting oscillation (WS) > slow wetting (SW) > fast wetting (FW). FW treatment had the greatest damage to the stability of black soil aggregates, while the SW treatment and WS treatment had less damage. At the same time, the initial water content and the number of freeze-thaw cycle had extremely significant influence on the MWD_{FW} , MWD_{SW} and MWD_{WS} of three different sizes aggregates ($P < 0.01$). With the increasing of the number of freeze-thaw cycle, the large aggregate of >0.2 mm was broken and the content of the small aggregate (< 0.2 mm) increased. The initial water content had a destructive effect on 2~3 and 3~5 mm aggregates, while for 1~2 mm aggregates, it was helpful to improve the structure and increase the stability of aggregates.

Keywords: freeze-thaw cycle; fragmentation mechanism; black soil aggregates

土壤侵蚀是东北黑土区最重要的环境问题之一,而冻融循环作用对坡面水土流失具有重要影响^[1]。已有研究^[2-4]发现,在土壤侵蚀机理研究中,土壤团聚体稳定性与土壤抗侵蚀能力息息相关,土壤团聚体是表征土壤可蚀性的关键因子,对土壤可蚀性有重要作用;同时,一些学者^[5-7]认为,冻融循环作用破坏了团聚体结构,从而使其稳定性降低,但也有学者^[8-9]认为,冻融循环作用可以使团聚体稳定性进一步增强。地表植被类型、土壤质地、气候变化以及试验条件设定可能是造成这一差异的原因。因此,深入了解冻融循环作用影响土壤侵蚀的发生机理及团聚体破碎机制,对于有效防治水土流失与土壤侵蚀有着重要的意义。近些年来,国内学者^[10-12]在南方石漠化地区、黄土丘陵区等地已运用 Le Bissonnais 法开展了土壤团聚体破碎机制研究,并阐明了上述地区土壤团聚体破碎机制;也有学者^[13]在东北典型黑土区开展了土壤团聚体破碎机制的相关研究。而基于冻融循环作用对黑土团聚体破碎机制方面的研究相对较少。

东北黑土区地处中高纬度地区,受到气候条件影响较大,每年春季冻融循环现象严重,在融雪集中期,受融雪径流及表土解冻水分下渗的影响,表层解冻的土壤水分含量增多^[14-15],冻融循环的强度发生变化,经过多次冻融后土壤团聚体抗破坏能力下降,侵蚀过程以及发生机制改变,加剧了黑土区土壤侵蚀过程。鉴于此,为给研究区土壤冻融循环下土壤团聚体破碎机制研究提供充分的理论基础,本文基于室内模拟冻融试验,对 3 组不同粒级团聚体、4 个不同初始含水量,采用 Le Bissonnais 法 3 种处理方式,快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)和湿润振荡(WS)对 8 种不同冻融次数下的团聚体稳定性变化情况进行分析,通过 3 种不同处理分析冻融循环作用对团聚体抵抗不同破坏作用能力的影响,进而基于获取的数据探讨土壤团聚体不同初始含水量、冻融次数对不同粒级团聚体稳定性的影响,以期揭示冻融循环作用对土壤团聚体破碎机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黑龙江省西北部克山县克山农场(125°08′—125°37′E,48°12′—48°23′N)。区内属于漫川漫岗地带,地形起伏不平,地势呈东南高、西北低,平均坡度 3°~5°,海拔 240~340 m,土地总面积为 31 067 hm²。区域内以黑钙土为主,分布少量的草甸土,属典型耕作黑土区,其中主要作物为大豆和玉米。气候类型为典型温带季风气候,年均气温

2.4℃,年均降水量 500 mm,无霜期 122 d,日照时间较短,气温日较差大。

1.2 样品采集与试验设计

在 2018 年 6 月,春季解冻种植前,在克山农场坡耕地坡上、坡中和坡下部分分别随机采集 5 个 0—10 cm 原状土样品(无垄沟和垄台之分),带回实验室后风干并去除根系残留等杂质后过筛备用。同时,用铝盒和环刀采集试验土壤,用于土壤容重、饱和含水量以及田间持水量等指标的测定。土壤风干后,采用干筛法筛出 >5, 2~5, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, <0.25 mm 共 6 级粒径团聚体,并对各粒级团聚体进行称重,计算其含量分别为 14.28%,43.48%,17.44%,11.09%,7.73%,5.98%。同时,按照风干团聚体组成比例在 100 mL 铝盒内配置 50 g 混合土壤试样,并控制土壤容重为 1.25 g/cm³,有机质含量 6.21%,pH 为 6.36。

基于野外实际调查,试验设置 4 个不同初始含水量,即饱和含水量(BH,43.39%质量含水率)、田间持水量(TJ,32.25%质量含水率)、田间持水量的 70%(TS,22.57%质量含水率)及风干土含水量(FG,3.34%质量含水率),以风干土含水量为对照组,采用控制土壤基质势(ψ)的方法保证团聚体湿润时不受“气爆”的影响,并通过改进沙盘法对土壤团聚体初始含水量进行控制,以达到试验设计含水率^[16]。采用 Le Bissonnais 法对试验样品进行快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)和湿润振荡(WS)处理。试验设置 0,1,3,5,7,10,15,30 次 8 种不同冻融次数,结合当地实际气象资料,并确保冻融完全,设置土壤冻结温度 -15℃,解冻温度 6℃,冻融各 12 h,共 24 h 为 1 次冻融循环,冻融周期 30 天左右,每个处理进行 3 次重复。

1.3 测定项目与方法

试验在 2019 年 5 月先将干筛法筛出的原状土进一步筛分成 3~5, 2~3, 1~2 mm 3 级团聚体,然后将(3~5, 2~3, 1~2 mm)室内冻融模拟试验后的土壤试样,进行快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)和湿润振荡(WS)3 种处理,再将处理后的团聚体洗入浸在乙醇中的套筛内(筛孔大小依次为 2, 1, 0.5, 0.25, 0.1, 0.05 mm),上下振荡 5 次后将留在各筛上的团聚体烘干、称重^[17]。

本文采用土壤团聚体质量百分数(P_i)、平均重量直径(MWD,mm)^[18]作为团聚体稳定性评价指标,并用 MWD_{FW}、MWD_{SW}、MWD_{WS}表示快速湿润、慢速湿润和湿润振荡 3 种处理下团聚体稳定性。团聚体质量百分数反映了各粒级团聚体的分布情况,计算公式为:

$$P_i = \frac{m_i}{m_0} \times 100\%$$

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_0 为样品总质量(g)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件对数据进行处理,采用 Or-
igin 2017 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同破坏机制下团聚体粒径分布特征

2.1.1 消散作用对团聚体粒径分布的影响 快速湿
润下初始含水量和冻融循环次数均对不同粒级团聚
体粒径分布特征产生显著影响。未冻融条件下,不同初
始含水量的团聚体粒级在快速湿润(FW)处理下表现出
不同的分布趋势。由图 1 可知,4 种不同初始含水量下,

占比最大的团聚体粒级均为 0.2~0.5 mm,其中 BH 处
理下含量最多,分别为 40.66%和 44.87%。而>2 mm 的
团聚体含量分布均较低,相对来说 FG 处理下含量较高,
分别为 12.93%和 7.07%,而含量最低的是 BH 处理,分
别为 3.13%和 0。在同一初始粒径时,土壤的初始含水
量越高,团聚体破碎越大。而与 2~3,3~5 mm 初始
粒径团聚体不同,1~2 mm 粒径的团聚体,仅在 FG
处理下 0.2~0.5 mm 粒级含量最多,为 27.73%。其
余 3 种处理下含量最多的粒级为<0.05 mm,其中
TS 处理下含量最多,为 41.83%。表明 1~2 mm 初
始粒径受初始含水量的影响比 2~3,3~5 mm 粒径
大,且团聚体容易破碎成更微小土壤颗粒。

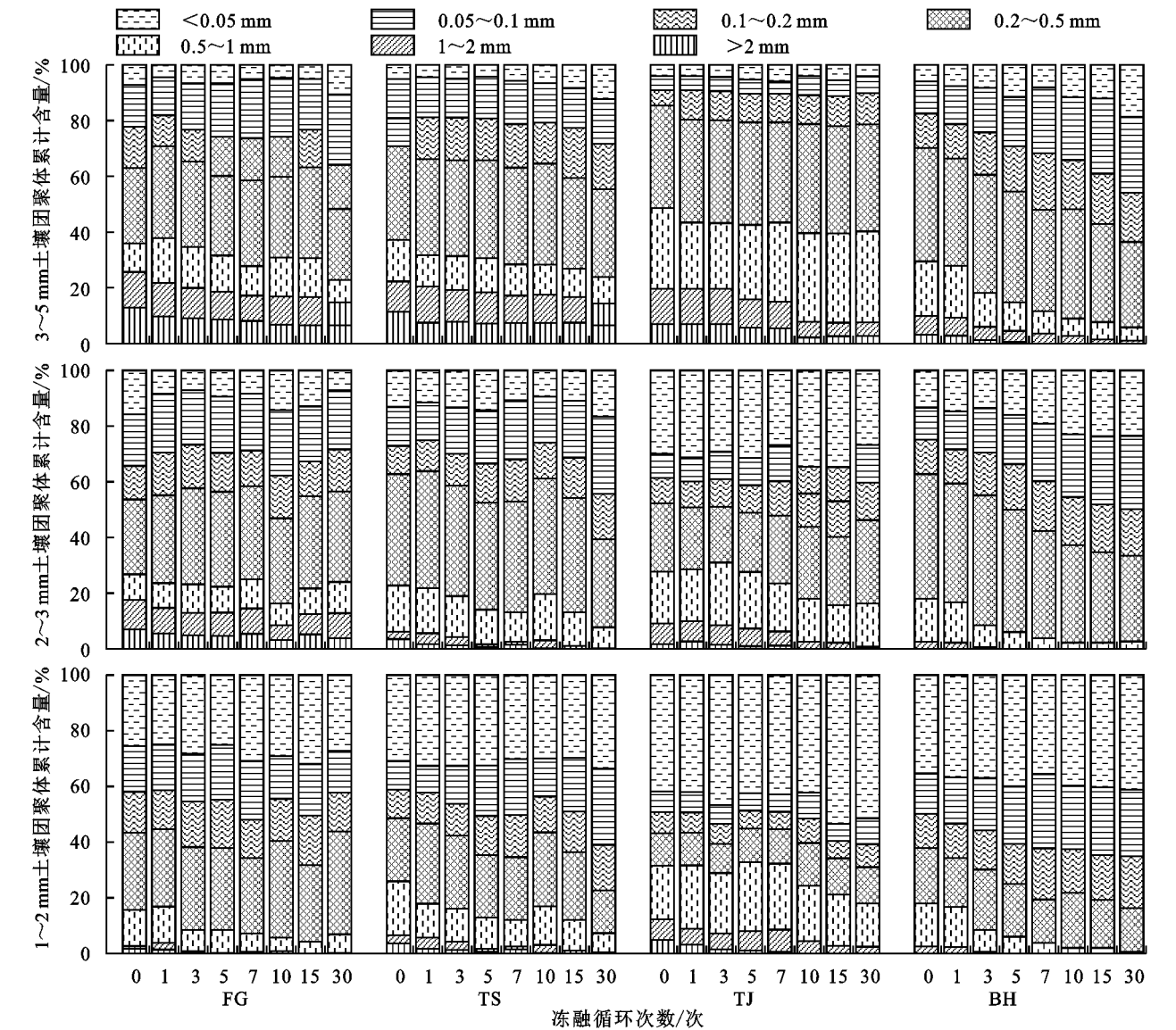


图 1 FW 处理下冻融循环作用对土壤团聚体粒级分布的影响

冻融条件下,随着冻融循环次数的增加,>0.2
mm 的粒级呈现下降的趋势,而<0.2 mm 的粒级含
量整体呈现增加的趋势。FG 处理下,<0.05,0.05~
0.1,0.1~0.2,0.2~0.5,0.5~1 mm 粒级受冻融循环
次数的影响较小,粒级呈波动性变化。TS 与 TJ 处

理下,0.5~1 mm 粒级的含量随着冻融循环次数的增
加呈现下降趋势,而<0.2 mm 粒级的含量随着冻融
循环次数的增加而增大。BH 处理变化最明显,在 30
次冻融结束后,0.5~1,1~2,>2 mm 3 个粒级的含
量较冻融循环前均出现明显下降,降幅均超过 70%。

同时,BH 处理下 $<0.05,0.05\sim0.1,0.1\sim0.2,0.2\sim0.5\text{ mm}$ 4 个粒级的含量均出现上升趋势,涨幅均超过 40%。FG 处理下,除 $>1\text{ mm}$ 粒径随冻融循环次数的增加呈现减少的趋势外,其余粒级均呈波动性变化。TS 处理下, $0.2\sim0.5,0.5\sim1,1\sim2,>2\text{ mm}$ 4 个粒级含量呈现下降的趋势,经过 30 次冻融后,降幅分别为 21%~100%。而 $<0.05,0.05\sim0.1,0.1\sim0.2\text{ mm}$ 3 个粒级较冻融循环前上升了 26.53%,62.25%,97.63%。在 TJ 处理下, $<0.2\text{ mm}$ 粒级整体呈现增加的趋势。FG 处理下, $>0.5\text{ mm}$ 粒径随冻融循环次数的增加呈现减少的趋势,其余粒级变化趋势呈波动性变化。而 TS 处理下, $>2\text{ mm}$ 的粒级呈现下降的趋势,经过 30 次冻融后,降幅分别为 88.89%~100%。除 FG 处理下,其余水分处理均出现明显的

大团聚体破碎成小团聚体的趋势,且在初始含水量不断增大的情况下,冻融循环次数对各初始粒级的团聚体能产生显著的破碎作用。

2.1.2 黏粒膨胀作用对团聚体粒径分布的影响 由图 2 可知,慢速湿润下,不同粒级、不同初始含水量以及不同冻融次数会对团聚体破碎过程产生显著影响。未冻融条件下,同一初始粒级,随着初始含水量的增加, $>2\text{ mm}$ 含量逐渐降低, $0.5\sim1,0.2\sim0.5\text{ mm}$ 粒级变化不一。初始粒级为 $2\sim3,3\sim5\text{ mm}$ 的团聚体和 $0.5\sim1,0.2\sim0.5$ 粒级含量呈先增加后降低的趋势,初始粒级为 $1\sim2\text{ mm}$ 的团聚体呈先减少后增加的趋势。团聚体初始粒级越小,受含水量的影响越大,小颗粒团聚体内部空间较小,随着含水量的增大,团聚体的破碎作用越明显。

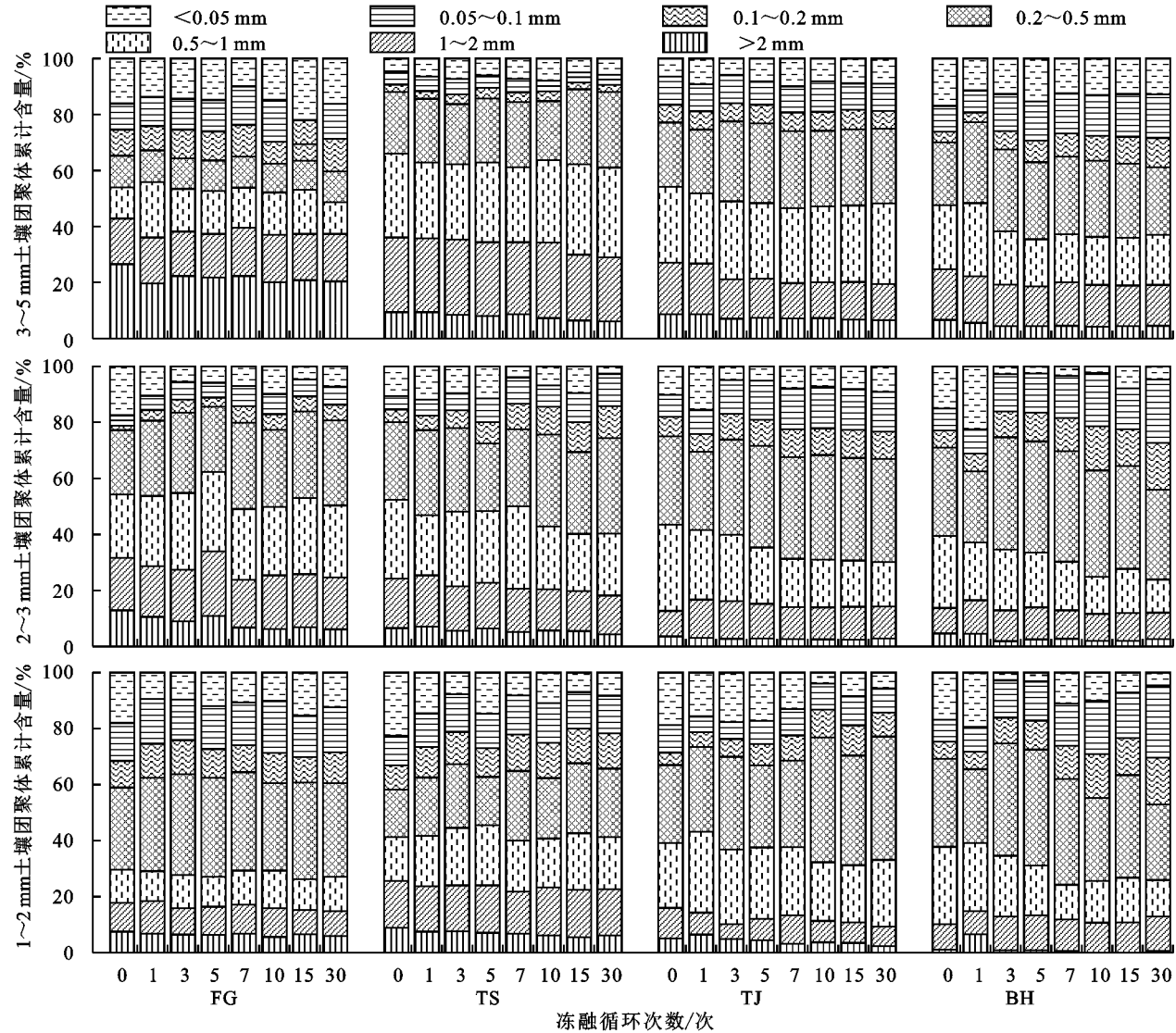


图 2 SW 处理下冻融循环作用对土壤团聚体粒径分布的影响

冻融条件下,同一初始含水量,随着冻融循环次数的增加,各粒级呈现波动变化,变化趋势不明显,而随着含水量和冻融次数的同时增加, $>1\text{ mm}$ 粒级含

量逐渐下降, $<1\text{ mm}$ 粒级含量总体上呈上升趋势,且团聚体含量主要集中在 $0.2\sim1\text{ mm}$ 粒级。FG 处理下,随着初始含水量的升高, $0.5\sim1\text{ mm}$ 粒级含量随冻融

循环次数的增加呈降低趋势,而 <0.2 mm 粒级含量则呈增大的趋势。当初始含水量接近饱和时,冻融循环 30 次后 $0.5\sim1$, $1\sim2$, >2 mm 各粒级的含量较冻融循环前显著下降 70% 以上;而 <0.05 , $0.05\sim0.1$, $0.1\sim0.2$, $0.2\sim0.5$ mm 各较小粒级的含量上升均大于 40%。随着冻融循环次数的增加, >2 mm 粒级呈下降趋势,冻融循环 30 次后其比例降低了 24.07%~52.85%。FG 处理下,除 >2 mm 和 <0.05 mm 外,其他各粒径均随冻融循环次数的增加呈显著上升趋势。随着初始含水量的增加, $0.5\sim1$ mm 粒级分布比例随冻融次数的增加而下降,而 $0.1\sim0.2$, $0.05\sim0.1$ mm 粒级含量则呈增加的趋势,饱和条件下表现得尤为明显。FG 处理下, >2 , $1\sim2$ mm 团聚体含量随冻融次数和初始含水量的增加而降低,而 $0.1\sim0.2$, $0.2\sim0.5$, $0.5\sim1$ mm 均出现先增大后减小的趋势。当初始含水量接近饱和时, >2 mm 团聚体粒径分布先增大后减小,而 $0.5\sim1$ mm 团聚体含量呈逐渐降低的趋势。可以看出,初始含水量越大,冻融次数越高,团聚体破碎越充分;同时,初始粒级越大,含水量越高,冻融循环作用越明显。

2.1.3 机械破坏作用对团聚体粒径分布的影响 由图 3 可知,不同粒级、不同初始含水量以及不同冻融次数均会对 WS 处理团聚体机械破碎过程产生显著影响。未冻融条件下, $3\sim5$, $2\sim3$ mm 初始粒级随着初始含水量的增加, >1 mm 粒级含量逐渐减小,而 $1\sim2$ mm 初始粒级随着含水量的增加, >1 mm 粒级含量呈现出先增加后减少的趋势。这是由于水分膨胀使周围的小团聚体受到挤压,土粒间的距离被压缩,增加其吸引力,从而使得小颗粒团聚成大颗粒,但随着含水量的增加,土粒进一步被挤压,并最终崩解破碎。

冻融条件下,随着冻融循环次数和初始含水量的增加,各粒级呈现波动变化,但变化趋势不明显。不同初始含水量处理下, >2 mm 的粒级均随冻融次数的增加呈现下降的趋势,30 次冻融结束后,与冻融循环前相比,分别降低了 1.12%~33.38%。其中变化最明显的是 TJ 与 BH 处理, >0.5 mm 的 3 个粒级均呈现下降的趋势。FG 处理下,除 <0.05 mm 粒径外,其余均随冻融循环次数的增加呈减少的趋势。在 TS 处理下, >2 mm 与 $1\sim2$ mm 2 个粒级呈现下降的趋势,经过 30 次冻融后,降幅分别为 15.54% 和 25.53%,而 BH 处理与 TS 处理变化趋势类似,在 30 次冻融结束后, >0.5 mm 粒级整体呈现出下降的趋势。对于初始粒级为 $1\sim2$ mm 的土壤团聚体而言,BH 处理下, $0.2\sim0.5$, <0.05 mm 粒级含量随着冻融循环次数的增加而降低,

降幅分别为 54.52% 和 85.33%,而 $0.05\sim0.1$, $0.1\sim0.2$ mm 分别增加 73.24% 和 62.32%。可以看出,在 WS 处理下,初始含水量越高,冻融循环作用对 <0.5 mm 团聚体的破碎越显著;在初始含水量一定时,冻融循环作用对团聚体的影响较小。

2.2 土壤团聚体平均重量直径

由显著性分析(表 1)可知,冻融循环作用对 $1\sim2$, $2\sim3$, $3\sim5$ mm 3 种不同粒级团聚体稳定性有显著影响($P<0.05$)。分析表明,初始含水量对 3 种不同粒级团聚体的 MWD_{FW} 、 MWD_{SW} 、 MWD_{WS} 均具有极显著影响($P<0.01$);并且冻融循环次数同样对 3 种不同粒级团聚体的 MWD_{FW} 、 MWD_{SW} 、 MWD_{WS} 也均具有极显著影响($P<0.01$)。冻融循环次数与初始含水量的交互作用对 $1\sim2$, $2\sim3$, $3\sim5$ mm 3 种不同粒级团聚体的 MWD_{FW} 和 MWD_{SW} 产生了显著的影响,同样对 $3\sim5$ mm 粒级团聚体的 MWD_{WS} 也具有显著性影响($P<0.05$),但对 $1\sim2$, $2\sim3$ mm 粒级团聚体的 MWD_{WS} 影响不显著。

王晟强等^[3]通过研究验证粒径 $3\sim5$ mm 的团聚体与土壤侵蚀的关系最为密切。3 种破碎机制下,4 种含水量处理均呈现出 $WS>SW>FW$ 的现象。同时进行差异显著性分析可以发现,FW 处理下 MWD 值最小,且与 SW 和 WS 的相关性 P 值均小于 0.05,说明快速湿润处理对团聚体的破坏程度显著大于其余 2 种处理方式(SW 与 WS)。

由图 4 可知,在不同破碎机制下团聚体 MWD 随着冻融次数与初始含水量的变化而发生改变。在快速湿润(FW)处理下,随着初始含水量的增加, MWD 呈现先增加后迅速减小的趋势,在 TJ 含水量时达到峰值 0.68 mm,而在 BH 含水量时为谷值 0.48 mm;在慢速湿润(SW)处理下,在冻融循环初期(<5 次冻融循环时), MWD 随初始含水量的增加呈现先增大后减小的趋势,5 次冻融循环后,随着初始含水量的增加, MWD 逐渐减小。湿润振荡处理(WS)下土壤团聚体反馈发生变化,在整个冻融循环过程中, MWD 均随着初始含水量的增加而持续减少,没有出现随着初始含水量增加 MWD 上升的情况。

3 种破碎机制比较发现,与 0 次冻融对照相比,经过冻融循环作用后的团聚体 MWD 值均有下降,说明冻融循环作用破坏团聚体的稳定性。在快速湿润(FW)处理下,随着冻融次数的增加,除 FG 含水量下, MWD 在 10, 15 次冻融有轻微上涨,其余情况下 MWD 均随冻融次数增加呈现减小的趋势;在慢速湿润(SW)处理下,随冻融次数的增加 MWD 仍然呈现

减小的现象,且在 30 次冻融循环后,MWD 达到最低值。湿润振荡处理(WS)团聚体稳定性表现出差异性,在 1 次冻融循环后均明显降低,但在 7 次冻融循环后,4 种初始含水量处理的 MWD 均出现波动性变化,没有明显规律性,然而从整个冻融循环过程整体

进行比较,团聚体 MWD 经过冻融循环后均较 0 次循环对照组有所减小,表明冻融循环对土壤稳定性的破坏作用。由以上分析可知,冻融交替频繁的地区,在降雨强度较大时,消散作用是黑土团聚体主要的破碎机制,且易造成更大面积的土壤侵蚀。

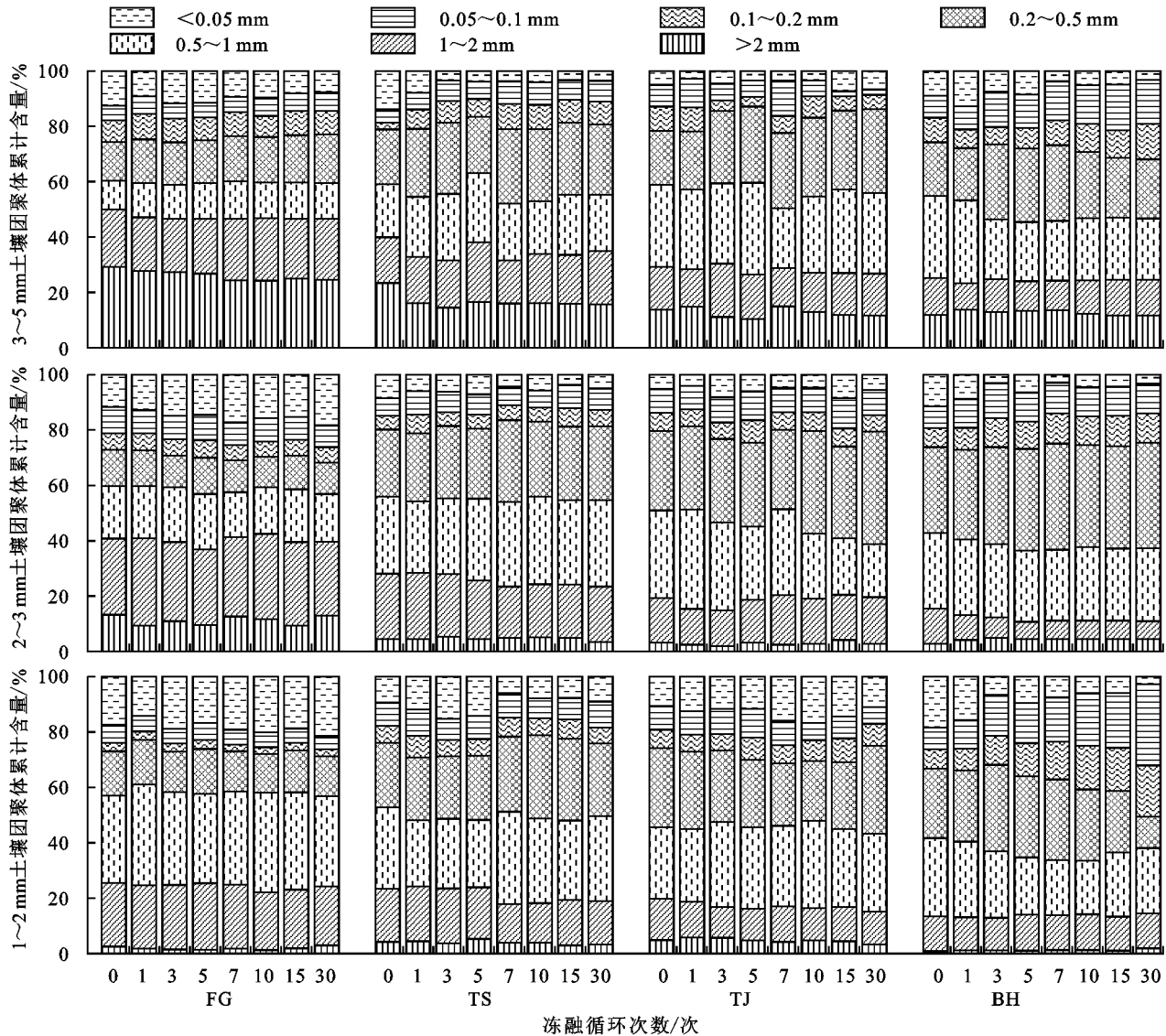


图 3 WS 处理下冻融循环作用对土壤团聚体粒级分布的影响

表 1 GLM 检验中不同处理条件下的 P 值

处理	1~2 mm 团聚体			2~3 mm 团聚体			3~5 mm 团聚体		
	MWD _{FW}	MWD _{SW}	MWD _{WS}	MWD _{FW}	MWD _{SW}	MWD _{WS}	MWD _{FW}	MWD _{SW}	MWD _{WS}
W	<0.001	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	0.022	<0.001	<0.001	<0.001
FTC	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
W×FTC	<0.001	0.002	NS	<0.001	<0.001	NS	<0.001	0.042	<0.001

注:W 表示不同初始含水量处理;FTC 表示不同冻融次数处理;W×FTC 代表两者的交互影响作用;NS 代表差异不显著,即 $P>0.05$ 。

3 讨论

冻融循环作用主要是通过土壤水分在温度的变化下,发生反复的膨胀收缩,从而影响团聚体的破碎机制^[19]。从试验结果可以看出,冻融循环作用对团聚体抵抗不同破坏作用的影响差异显著。FW 处理

下土壤团聚体结构受到的破坏最大,而慢速湿润(SW)和湿润振荡(WS)破坏作用较小,土壤团聚体降低主要受到消散作用的影响,这与刘雷等^[20]的结论相似。FW 法处理下,水分迅速进入到团聚体内部,内部空气及压强情况均发生剧烈变化,导致产生

“气爆”破坏团聚体内部结构,同时反复的冻融,使得团聚体不断受到内部收缩力和外部挤压力的作用,造成其孔隙增大结构松散,破坏力最强^[21];而 SW 法是预先将团聚体放到水里达到充分饱和状态,消除了团聚体中的空气,在冻融条件下,同时受到黏粒膨胀和冰晶膨胀的作用使土粒间产生了微小裂隙,从而造成团聚体的破碎,而与 FW 产生的消散作用相比,黏粒

的膨胀能力较弱,并低于土壤中的毛管张力,因此 SW 处理下对土壤结构的破坏力低^[11];WS 处理下,团聚体经过酒精处理的团聚体,受到乙醇的保护作用,去除了 FW 及 SW 作用的影响,主要受到振荡过程中的机械外力导致团聚体破碎,然而机械外力作用小于团聚体之间的胶结作用,所以 WS 处理下,团聚体受到的破坏力小^[2]。

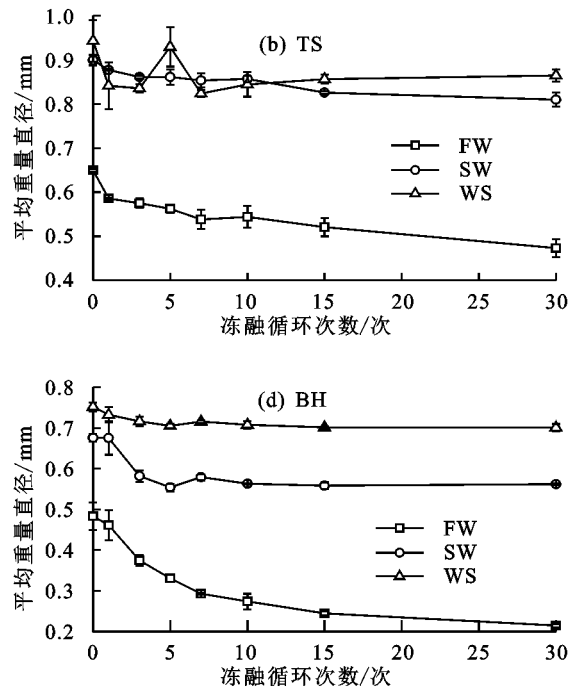
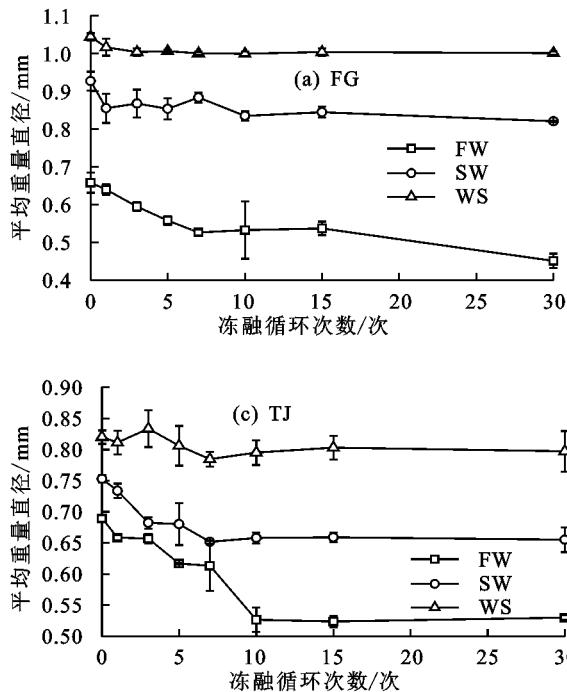


图 4 土壤试样冻融循环作用 LB 处理团聚体平均重量直径变化

冻融循环作用使水稳性团聚体比例发生显著变化,随着冻融循环交替次数的增加, >0.2 mm 的大团聚体减少而小团聚体(<0.2 mm)所占比例增加。这是由于团聚体之间存在孔洞形成孔隙结构,所以在冻融循环作用下,团聚体内部的水分膨胀,孔隙结构发生扩张,破坏了团聚体结构,而导致大团聚体破碎成小团聚体^[22],且随着冻融次数的增多,该现象越明显。同时,冻融循环作用的破坏力大小还与团聚体初始含水率直接相关,Song 等^[23]研究表明,团聚体含水率越大,冻融循环作用的破坏力越显著。在本研究中,2~3,3~5 mm 团聚体在冻融循环过程中,土壤中的水分不断凝结融化,循环反复变化,对土壤孔隙起到扩张作用,且初始含水量越大,水分膨胀的体积越大,造成土壤的孔隙也越大,胶结作用就越小,使得团聚体内部结构更为松散,团聚体破碎更加严重,表现为团聚体初始含水量越高,平均重量直径越小,稳定性越差。

4 结论

(1) 3 种破碎机制下,冻融循环作用对团聚体抵抗不同破坏作用的影响差异显著。经过冻融循环后,1~2,2~3,3~5 mm 初始粒级团聚体在 3 种不同破

碎机制下的平均重量直径均表现为 $WS > SW > FW$,FW 处理下 MWD 值最小,且与 SW 和 WS 的相关 P 值均小于 0.05。3 种不同粒级团聚体 SW 以及 WS 处理 >1 mm 的团聚体比例显著高于 FW 处理,即快速湿润(FW)处理对黑土团聚体稳定性的破坏作用最大,而慢速湿润(WS)和湿润振荡(SW)破坏作用较小。

(2) 冻融循环次数是冻融循环过程的重要因素。不同初始粒级和初始含水量团聚体经过 30 次冻融循环后,MWD 值均显著小于 0 次冻融循环;且随着冻融循环交替次数的增加, >0.2 mm 的大团聚体破碎而小团聚体(<0.2 mm)含量增加。其中 FW 和 SW 处理下,团聚体破碎主要集中在 0.5~1 mm 粒级,最大降幅分别达到 100% 和 70%, <0.2 mm 粒级含量最大涨幅分别为 97.63% 和 69.27%。

(3) 初始含水量是影响冻融循环过程的关键因素,冻融循环作用的破坏力大小与团聚体初始含水率直接相关。2~3,3~5 mm 团聚体破碎严重,表现为团聚体初始含水量越高,平均重量直径越小,稳定性越差。对于 1~2 mm 团聚体来说,初始含水量增加有助于改良团聚体结构,增大团聚体稳定性。

参考文献：

[1] 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.

[2] 王彬.土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[3] 王晟强,郑子成,李廷轩.应用 Le Bissonnais 法研究茶园土壤团聚体稳定性[J].茶叶科学,2014,34(3):307-314.

[4] 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.

[5] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements [J].Soil Biology and Biochemistry,2006,39(5):977-986.

[6] 姜宇,刘博,范昊明,等.冻融条件下黑土大孔隙结构特征研究[J].土壤学报,2019,56(2):340-349.

[7] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability [J].Catena,2003,52:1-8.

[8] 李嘉,刘楠,韩进斌,等.冻融对五台山典型林线植被土壤水稳性大团聚体的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(5):140-146.

[9] 娄鑫,谷岩,张军辉,等.冬季积雪与冻融对土壤团聚体稳定性的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(4):63-70.

[10] 李娅芸,刘雷,安韶山,等.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].自然资源学报,2016,31(2):287-298.

[11] 汪三树,黄先智,史东梅,等.基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究[J].生态学报,2013,33(18):5589-5598.

[12] 姚珂涵,肖列,李鹏,等.冻融循环次数和土壤含水率对油松林土壤团聚体及有效态微量元素的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):259-266.

[13] 张孝存,郑粉莉.基于 Le Bissonnais 法的东北黑土区土壤团聚体稳定性研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2009,37(5):82-86.

[14] 华文杏,范昊明,许秀泉,等.东北坡耕地春季融雪侵蚀观测研究[J].水土保持学报,2017,31(2):92-96,110.

[15] 刘雨佳,许秀泉,范昊明,等.东北黑土区横垄坡面融雪期细沟侵蚀特征研究[J].土壤通报,2017,48(3):701-706.

[16] 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.

[17] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology [J].European Journal of Soil Science,1996,47(4):425-437.

[18] 胡波,王玉杰,王彬,等.自然降雨条件下结皮层团聚体稳定性变化特征研究[J].农业机械学报,2017,48(6):225-231.

[19] Kværnø S H, Øygarden L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway [J].Catena,2006,67:175-182.

[20] 刘雷,安韶山,黄华伟.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2013,33(20):6670-6680.

[21] 邬铃莉,王玉杰,王彬,等.干湿交替作用对西南地区黄壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):317-321,329.

[22] 方丽莉,齐吉琳,马巍.冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化[J].冰川冻土,2012,34(2):435-440.

[23] Song Y, Zou Y C, Wang G P, et al. Stimulation of nitrogen turnover due to nutrients release from aggregates affected by freeze-thaw in wetland soils [J].Physics and Chemistry of the Earth,2017,97:3-11.