

冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响

左小锋¹, 王磊¹, 郑粉莉^{1,2}, 富涵¹, 王一菲¹, 覃超^{1,3}, 张勋昌⁴

(1.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, 杨凌 712100;
2.中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,
北京 100084; 4.美国农业部农业研究局牧草地实验室, 厄尔雷诺 73036)

摘要: 为了揭示东北黑土区季节性冻融循环作用和土壤性质对土壤可蚀性的影响, 采集黑龙江省宾县典型薄层黑土区(BX)和克山县典型厚层黑土区(KS)0—20 cm的耕层土壤, 通过室内冻融循环模拟和土壤直剪试验, 分析了冻融作用和土壤性质对土壤抗剪强度的影响。结果表明: (1) 经历1次冻融作用后 BX 和 KS 2种供试土壤抗剪强度分别减小3.9%和9.2%, 二者黏聚力分别减小15.2%和29.4%, 内摩擦角分别减小1.4%和3.6%。经历7次冻融作用后, BX 和 KS 2种供试土壤抗剪强度分别减小9.1%和15.1%, 土壤黏聚力分别减小40.7%和74.5%, 土壤容重分别减小6.7%和9.2%。受土壤有机质、水稳性团聚体、黏粒含量等的影响, KS土壤抗剪强度、黏聚力、内摩擦角和土壤容重的减小幅度皆大于BX供试土壤。(2) 2种供试土壤抗剪强度皆随冻融循环次数的增加呈先逐渐减小后趋于稳定的变化趋势; 第1次冻融循环对土壤抗剪强度破坏最大, 经历1次冻融循环后2种土壤抗剪强度和黏聚力的减小量分别占7次冻融循环土壤抗剪强度和黏聚力总减小量的43.4%和61.0%, 37.3%和39.4%。(3) 土壤抗剪强度与土壤容重和团聚体平均重量直径(MWD)呈极显著的正相关, 而与冻融循环次数呈极显著的负相关。

关键词: 冻融循环; 土壤性质; 抗剪强度; 东北黑土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0030-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2020.02.005

Effects of Freeze-thaw Cycles and Soil Properties on Mollisol Shear Strength in Chinese Black Soil Region

ZUO Xiaofeng¹, WANG Lei¹, ZHENG Fenli^{1,2}, FU Han¹,

WANG Yifei¹, QIN Chao^{1,3}, ZHANG Xunchang⁴

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 3.State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084; 4.Grazinglands Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, El Reno, USA 73036)

Abstract: In order to reveal effects of seasonal freeze-thaw cycles and soil properties on soil erodibility in the black soil region of Northeast China, the effects of freeze-thaw cycles and soil properties on soil shear strength were analyzed through indoor freeze-thaw cycle simulation and direct shear tests in laboratory. Two different tested soils were collected from top soil (0—20 cm plough layer) at typical thin-layer black soil region (BX) in Binxian County and typical thick-layer black soil region (KS) in Keshan County of Heilongjiang Province. The results showed that: (1) Freeze-thaw alternations reduced soil shear strength, cohesion and internal friction angle for both tested soils (BX and KS). After one time of freeze-thaw cycle, soil shear strength of BX and KS tested soils decreased by 3.9% and 9.2%, the soil cohesion decreased by 15.2% and 29.4%, and internal friction angle decreased by 1.4% and 3.6%, respectively. After seven times of freeze-thaw cycle, soil shear strength of the two tested soils decreased by 9.1% and 15.1%, soil cohesion decreased by 40.7% and 74.5%, and soil bulk density decreased by 6.7% and 9.2%, respectively. Due to the differences in the contents of soil organic matter, soil water stable aggregate and clay content, the decreasing extent of shear strength, cohesion and internal friction angle of KS tested soil were all greater than those of BX tested soil. (2) Soil shear strength decreased gradually and then tended to be stable with the increasing of

收稿日期: 2019-08-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571263); 国家重点研发计划项目(2016YFE0202900)

第一作者: 左小锋(1992—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: zxf397474560@163.com

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

freeze-thaw cycles for both tested soils. Moreover, the first freeze-thaw cycle had the greatest damage to soil shear strength, the decrement of soil shear strength after the first freeze-thaw cycle for both BX and KS soils occupied 43.4% and 61.0% of the total decrement of soil shear strength after seven freeze-thaw cycles, respectively; the decrement of soil cohesion after the first freeze-thaw cycle accounted for 37.3% and 39.4% of the total decrement of soil cohesion after seven freeze-thaw cycles, respectively. (3) Soil shear strength had significant positive correction with soil bulk density and mean weight diameter of soil aggregates (MWD), while it had significant negative correction with freeze-thaw cycles.

Keywords: freeze-thaw cycles; soil properties; shear strength; northeast black soil region

我国东北黑土区属于季节性冻融区,每年晚秋和春季发生土壤“昼融夜冻”的冻融交替现象,导致该地区坡耕地表层土壤结构遭到破坏,从而加剧坡面土壤侵蚀。土壤抗剪强度是表征土体力学性质和衡量土壤可蚀性的重要指标,对坡面土壤侵蚀过程有重要影响^[1]。已有研究^[2-6]表明,冻融循环作用是影响土壤抗剪强度的重要外力因子,其通过改变土壤物理性质(黏粒含量、土壤结构、土壤容重、土壤含水量、团聚体稳定性等)影响土壤抗剪强度和土体稳定性;也有研究^[7]认为,在土壤含水量一定的条件下,黑土黏聚力随冻融循环次数的增加而降低,3 次冻融循环是冻融作用影响土壤黏聚力的临界循环次数,当冻融作用超过 3 次循环后黑土黏聚力和内摩擦角趋于稳定;另有研究^[8]则认为,冻融循环使土壤黏聚力和内摩擦角均呈增加趋势;还有研究^[9]认为,冻融循环对土壤抗剪强度影响不明显。上述不同研究结论表明目前冻融作用对土壤抗剪强度的影响机理还需进一步探究。此外,有关研究^[10]还表明,冻融作用导致土壤团聚体破碎以及土壤颗粒的重新组合,从而降低土壤团聚体稳定性,使土壤抗剪强度减小,造成土壤抵抗径流冲刷能力减弱,进而加剧土壤侵蚀^[11]。目前,尽管冻融

作用对黄土抗剪强度的影响研究^[1,12-14]相对较多,但有关季节性冻融循环对黑土抗剪强度的影响研究相对较少,且大多研究仅涉及单一影响因素^[14-15],其研究结果还不能解释冻融作用影响土壤侵蚀的机理。为此,本文通过室内冻融循环模拟试验和土壤直剪试验,结合土壤水稳性团聚体和土壤容重的分析测定,分析季节性冻融循环作用和土壤性质对东北典型黑土区土壤抗剪强度的影响,以期解释冻融作用影响土壤侵蚀的机理,为黑土区坡面土壤侵蚀防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为东北典型薄层黑土区的耕层土壤(黑龙江省宾县)和典型厚层黑土区的耕层土壤(黑龙江省克山县)^[16],其中,典型薄层黑土区的耕层土壤(BX)采自黑龙江省宾县宾州河流域(127°25′36″E, 45°45′22″N),典型厚层黑土区的耕层土壤(KS)采自黑龙江省克山县粮食沟流域(126°04′59″E, 48°08′27″N),采集土壤为坡耕地表层 20 cm 耕层土壤。土样带回室内风干后去除作物秸秆等杂质,然后过 2 mm 筛备用。供试土壤的基本性质见表 1。

表 1 2 种供试土壤基本物理性质

供试 土壤	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	土壤颗粒组成/%		
			砂粒 (0.05~2 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
BX	1.20	20.25	9.27	61.31	29.42
KS	1.20	37.02	10.69	48.72	40.58

1.2 土壤直剪试验的试样制备

试样制备、冻融试验和剪切试验于 2018 年 3 月 21 日至 6 月 10 日在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室完成。剪切试样的制备和剪切试验程序按照中国《土工试验规程》^[17]进行。剪切试样制作的具体步骤为:(1)称取适量过 2 mm 筛的风干土,测定其土壤含水量;(2)根据野外实测的耕层土壤容重(1.20 g/cm³)和试验所用铝盒体积(22.2 cm×12.9 cm×5.5 cm)计算所需的试验土样;(3)根据试验土壤含水量和设计的初始土壤含水量,计算所需添加于试验土样的水量;(4)采用小型喷雾器将所需要的水

量(无离子水)均匀喷洒于已称重的试验土样,并将其装入容器内密封并静置一昼夜使土壤水分达到均匀分布;(5)将试验土样装填于铝盒,填土时采用分层填土(即按 2 cm 装填土并将表层刮毛,再装填另外 2 cm 土层,减少土层间的不整合现象),同时铝盒上部留出 1.5 cm 空间确保冻胀过程中土体不会溢出铝盒;(6)采用保鲜膜将填好试验土样的铝盒表面覆盖,以减少土壤水分蒸发;(7)将已填土样的铝盒放入-15℃恒温冰箱冻结 12 h,确保土层全部冻结;(8)调整冰箱温度至 8℃并持续 12 h,使土层全部融化,这样就完成了 1 次冻融循环过程。待试验土样融解后,用环刀(30 cm²×2

cm)从试验铝盒中取剪切试验土样并将表面削平,然后进行室内不固结不排水直剪试验。

试验设计 1 个初始土壤含水量,其设计依据是根据研究区早春冻融交替过程中实测的土壤含水量而确定的。2016—2019 年连续 4 年野外测定的土壤质量含水量变化为 13.5%~18.6%,所以试验设计的初始土壤质量含水量为 16.5%,这个值也是 50%田间持水量所对应的土壤含水量。

为了尽可能模拟东北黑土区农田土壤春季融雪中昼融和夜冻交替过程,共设计 4 个冻融循环次数(1,3,5,7 次)和 1 个初始土壤含水量(16.5%),以无冻融作用土壤作为对照组。对于 2 次以上冻融次数,是在第 1 次试样融解后,再将其置于-15℃恒温冰箱进行 12 h 冻结,然后在 8℃恒温条件下进行 12 h 融解,形成 2 次冻融循环次数。以此类推,分别制作 3,5,7 次冻融循环试验样。每个试验处理重复 3 次,具体试验设计见表 2。

表 2 冻融循环试验设计

供试土壤	初始土壤含水量/%	冻融循环次数/次	冻结温度/℃	融解温度/℃
0(无冻融)				
BX	16.5	1	-15	8
		3		
		5		
		7		
0(无冻融)				
KS	16.5	1	-15	8
		3		
		5		
		7		

1.3 土壤直剪试验

采用南京宁曦土壤仪器厂生产的 DSJ-3 型电动应变控制式直剪仪进行土壤直剪切试验。将不同处理后的剪切试验土样完整地压入剪切盒内,调整量力环和百分表的初始位置,设定剪切速度为 0.8 mm/min,分别在 50,100,150,200 kPa 4 种垂直压力下进行剪切,启动仪器后待百分表指针开始变化后用秒表记录时间,同时观察百分表读数,待量力环中百分表指针不再前进或出现倒退现象,记录百分表读数和时

间,土样形变超过 4 mm 即认定剪断。如百分表读数未出现峰值,则土样形变达到 6 mm 即认为已剪断。试样所受的剪应力按公式(1)计算^[18]:

τ=10CR/A (1)

式中:τ 为土壤抗剪强度(kPa);R 为量力环测表的读数(0.01 mm);C 为量力环校正系数(1.945 N/0.01 mm);A 为试样受力面积(cm²)。

按照库仑定律,土壤抗剪强度参数黏聚力 c 和内

摩擦角 φ 通过公式(2)求得^[17]:

τ=C+σtan φ (2)

式中:τ 为土壤抗剪强度(kPa);σ 为垂直压力(kPa);c 为土壤的黏聚力(kPa);φ 为土壤的内摩擦角(°)。

因每组试样分别是在 4 个不同的垂直压力(50,100,150,200 kPa)下进行的直剪试验,因此将不同垂直压力下的土壤抗剪强度按照公式(3)进行加权处理,得到加权平均抗剪强度^[19]。

τ=∑τ_iσ_i/∑σ_i (3)

式中:τ 为土壤抗剪强度(kPa);σ 为垂直压力(kPa)。

1.4 土壤水稳性团聚体测定

采用 Yoder 湿筛法^[20]测定不同冻融循环次数后的各级土壤团聚体大小。将试验设计初始土壤含水量为 16.5%的土样经过不同冻融循环(0,1,3,5,7 次)后风干,称取 50 g 土样置入孔径分别为 2,1,0.5,0.25 mm 套筛的顶层,然后套筛以 30 次/min 速度在水中匀速振动 30 次(TPF-100 型土壤团粒结构分析仪)后,收集各级团聚体,烘干称重,计算各级团聚体所占的百分比。采用平均重量直径(MWD)表征各粒级土壤团聚体稳定性。

1.5 土壤容重测定

根据《土工试验规程》^[17]要求制备容重土样,将风干后的供试土样过 5 mm 筛后测定其含水量,再根据上述剪切试样的制备过程,按 1.20 g/cm³容重分 3 层填装至饭盒中,用保鲜膜密封,静置 12 h 后再进行冻融循环试验,然后根据初始土壤含水量和冻融循环次数的试验处理要求,用环刀法测定不同冻融循环次数后的土壤容重。

1.6 数据处理

土壤的抗剪强度为不同垂直压力下的剪切力的加权平均值,应用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析与作图。采用 LSD 法和 Pearson 法进行各指标间的显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 冻融作用对土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角的影响

土壤黏聚力和内摩擦角是反映土壤抗剪强度的 2 个重要指标,而土壤黏聚力是影响土壤抗剪强度的重要因素^[21]。以 1 次冻融(表 3)为例,在初始土壤含水量为 16.5%时,与无冻融试验土壤相比,经过冻融作用后的 2 种供试土壤(BX 和 KS)抗剪强度及黏聚力和内摩擦角均有所减小,其中,BX 和 KS 土壤抗剪强度分别减小 3.9%和 9.2%,二者的土壤黏聚力分别

减小 15.2% 与 29.4%，内摩擦角分别减小 1.4% 与 3.6%。此外，2 种供试土壤抗剪强度及黏聚力和内摩擦角在未发生冻融作用时存在差异，经过 1 次冻融作用后，KS 试验土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角的减小幅度皆大于 BX 试验土壤，其主要原因是 2 种试验土壤内在性质的差异所造成的。

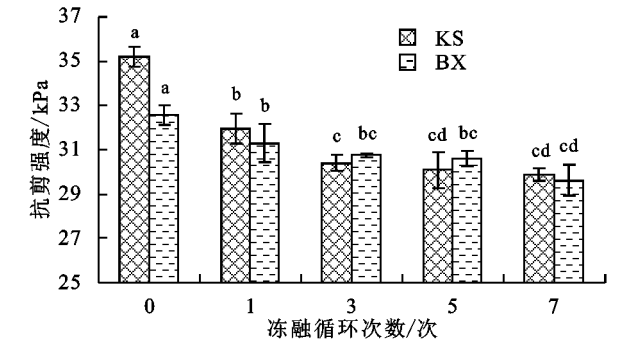
表 3 1 次冻融与无冻融作用下的 2 种供试土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角的对比

供试土壤	冻融作用	抗剪强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
BX	无冻融	32.57±0.46a	5.73±0.76a	10.14±0.42a
	冻融	31.29±0.87b	4.86±0.79ab	10.00±0.47a
KS	无冻融	35.20±0.45a	8.27±0.74a	10.18±0.10a
	冻融	31.96±0.66b	5.84±0.53b	9.81±0.24ab

注:表中数据为平均值±标准差;在相同供试土壤下同列不同字母表示供试土壤差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 冻融循环次数对土壤抗剪强度的影响

野外原位观测表明,在黑龙江宾县和克山县每年春季融雪期间出现的“昼融夜冻”现象可达 7~12 次,这种“昼融夜冻”循环作用加剧了土壤结构的破坏,增加了坡面土壤侵蚀^[22]。本试验结果表明,2 种试验土壤抗剪强度随冻融循环次数的增加均呈减小趋势(图 1)。经历 7 次冻融循环后,BX 和 KS 试验土壤抗剪强度分别减小 9.1% 和 15.1%。从图 2 还可看出,经历 3 次冻融循环后,2 种试验土壤抗剪强度的减小幅度趋于平缓。整体而言,KS 试验土壤抗剪强度减小幅度大于 BX 试验土壤。



注:图中不同字母表示不同冻融循环次数下 2 种土壤处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同冻融循环次数下的 2 种试验土壤抗剪强度对比

从图 2 可以看出,随着冻融循环次数的增加,BX 和 KS 试验土壤黏聚力均呈现减小趋势。与未冻融试验土壤相比,经过 7 次冻融循环后,BX 和 KS 试验土壤黏聚力分别降低 40.7% 和 74.5%。而 2 种试验土壤内摩擦角随冻融循环次数的增加具有不同的变化趋势(图 3);对于 KS 试验土壤,冻融循环次数从 0 次增加至 1 次,土壤内摩擦角呈减少趋势,而冻融循环次数从 1 次增加至 7 次,土壤内摩擦角呈不显著的增加趋势;而对于 BX 试验土壤,土壤内摩擦角整体上呈不显著的减少趋势。

从图 1 和图 2 还可看出,第 1 次冻融循环过程对土壤抗剪强度和黏聚力的影响较大。与未冻融试验土壤相比,经过 1 次冻融循环后,BX 和 KS 土壤抗剪强度的减小量分别占 7 次冻融循环后抗剪强度总减小量的 43.4% 和 61.0%;土壤黏聚力减小量分别占 7 次冻融循环后总减小量的 37.3% 和 39.4%。

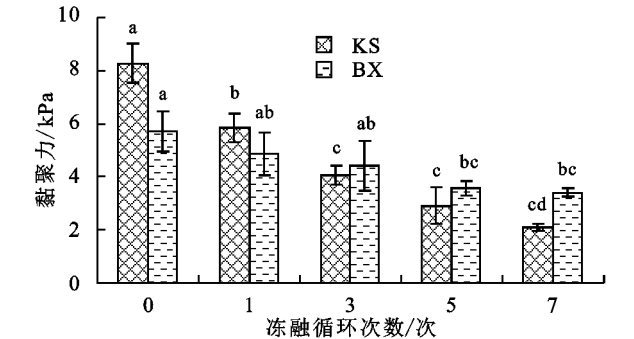


图 2 不同冻融循环次数下的 2 种试验土壤黏聚力对比

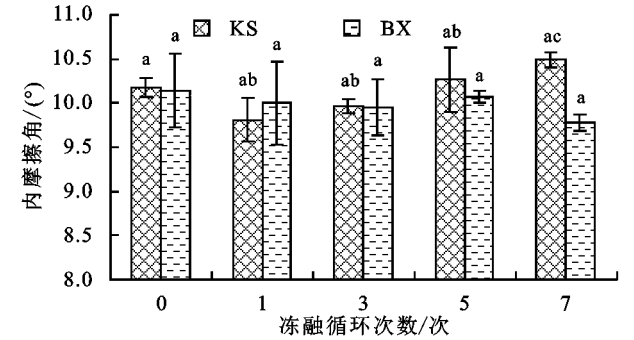


图 3 不同冻融循环次数下的 2 种试验土壤内摩擦角对比

2.3 冻融条件下的黏粒含量和有机质对土壤团聚体稳定性的影响

土壤黏粒含量和有机质是土壤团粒结构的重要组成部分,对土壤团粒结构的形成和稳定具有重要作用^[23]。由表 1 可知,相对于 BX 试验土壤,KS 试验土壤具有较高的黏粒含量和有机质含量,因此,更有利于土壤颗粒胶结而形成较大的土壤抗剪强度和黏聚力。此外,在初始未冻融状态下,KS 试验土壤比 BX 试验土壤具有较多的水稳性团聚体(表 4),其中 KS 土壤的水稳性团聚体平均重量直径(MWD)是 BX 土壤的 1.81 倍。随着冻融循环次数的增加,2 种试验土壤 >0.25 mm 的水稳性土壤团聚体含量和 MWD 均减少;7 次冻融循环后,BX 和 KS 土壤 >0.25 mm 的水稳性土壤团聚体含量分别减少 7.5% 和 12.7%,MWD 分别减少 22.6% 和 26.8%。冻融循环使 KS 土壤的水稳性团聚体和 MWD 减少幅度明显大于 BX 土壤,这可能也是 KS 土壤抗剪强度减幅较大的原因之一。

3 讨论

土壤冻融循环过程使土体结构性状发生改变,土体从不稳定状态最终发展为新的动态稳定平衡状态^[5]。随着冻融循环次数的增加,土体内部裂纹和裂

缝不断发育演化,水分迁移通道不断扩展^[24],土体体积发生反复地膨胀和收缩;且经过多次冻融循环后,土壤颗粒的大小、形状、表面起伏也逐渐趋于稳定。因此,土壤颗粒间的胶结强度会随冻融循环次数的增加而逐渐减小,最终趋于相对稳定^[12]。本研究中 2 种供试土壤抗剪强度随冻融循环次数的增加均表现为先减小后趋于稳定的变化趋势,这与前人^[25]的研究结果一致。董晓宏等^[13]认为,冻融循环过程中土壤水分的散失会造成冻融循环强化现象,因此其认为初始土壤含水量是引起土壤抗剪强度变化的关键因素。本研究仅设计了 1 个初始土壤含水量(16.5%),但为了减小冻融过程中土壤水分的散失,在装有试验土样的铝盒表面覆盖保鲜膜,以此减少冻融循环过程中由于水分散失产生的试验误差;其试验结果表明随着冻融循环次数增加,2 种试验土壤黏聚力均减小,但内摩擦角变化不同,其中 KS 土壤内摩擦角显著增加,而 BX 土壤内摩擦角变化不显著。其原因可能与冻融循环过程中 2 种试验土壤性质有关,相对于 BX 试验土壤,KS 试验土壤团粒结构较多,冻融循环过程中因 KS 土壤冻胀敏感性较强,会使较大的团粒结构破碎,增加土壤颗粒之间的接触点,从而造成其土壤内摩擦角显著增加。

表 4 不同冻融循环次数下 2 种试验土壤水稳性团聚体的变化

供试土壤	冻融循环次数/次	>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数/%	平均重量直径(MWD)/mm
BX	0	36.42	0.31±0.02a
	1	35.33	0.27±0.02b
	3	34.61	0.25±0.01bc
	5	34.22	0.26±0.04ab
	7	33.70	0.24±0.02c
KS	0	62.62	0.56±0.00a
	1	57.53	0.53±0.06ab
	3	56.31	0.47±0.01ab
	5	55.89	0.49±0.12bc
	7	54.65	0.41±0.02bc

本研究还发现,1 次冻融循环对土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角的减小影响较大,这与 Tian 等^[26]的结果相一致。其主要原因在于初始未冻融状态下的土体内部颗粒、水分、有机质等物质之间的胶结作用使土壤颗粒之间的联结力较强,经过第 1 次冻融循环后,冻胀、融化过程中发生土壤颗粒重新排列和组合^[27],改变土壤结构,土壤颗粒间凝聚作用减弱,且土体融化后被破坏的土壤结构难以恢复到原始状态,因此,土壤抗剪强度和黏聚力出现较大幅度的减小。经过多次冻融循环后,土体体积变化达到一种动态平衡,同时限制土体内水分发生迁移,使土体中的水分

也趋于一种动态平衡状态^[5],导致土体结构的破坏程度减弱,从而使土壤抗剪强度减大幅度随冻融循环次数的增加而趋于稳定。由表 5 可知,2 种供试土壤容重随冻融循环次数的增加也呈逐渐减小并趋于稳定的变化趋势,其中经过 7 次冻融循环后,BX 和 KS 土壤容重分别减小 6.7%和 9.2%。这也从土壤结构上反映出冻融循环过程中对土体的破坏作用,即冻融次数增加导致土体变松,从而增加土壤侵蚀量。

表 5 不同冻融循环次数下 2 种试验土壤容重的变化

供试土壤	冻融循环次数/次	容重/(g·cm ⁻³)
BX	0	1.20±0.01a
	1	1.16±0.01b
	3	1.14±0.02b
	5	1.13±0.02b
	7	1.12±0.01b
KS	0	1.20±0.01a
	1	1.14±0.02b
	3	1.11±0.01bc
	5	1.09±0.02cd
	7	1.09±0.02cd

土壤有机质含量、黏粒含量、水稳性团聚体和土壤容重等因素是反映土壤结构稳定性的重要指标^[11]。本研究中,未冻融状态下的 KS 试验土壤抗剪强度大于 BX 试验土壤,但冻融循环后,KS 土壤抗剪强度衰减程度大于 BX 土壤,其原因是 KS 试验土壤有机质含量、土壤黏粒含量和 MWD 均大于 BX 试验土壤,加之冻融作用后 KS 土壤容重减少幅度也大于 BX 土壤;另外,BX 和 KS 土壤均属于黄土母质发育而来的典型黑土,其黏粒矿物组成主要以 2:1 型的伊利石和蒙脱石为主^[28]。蒙脱石具有很大的胀缩性,因其本身晶层间分子引力小,晶层间结合力弱,当土壤晶层间有水分进入时会发生膨胀,失水时又会收缩^[29],这种矿物特性也增加冻融作用对土壤结构的破坏。土壤在初始状态下存在一定的水分,土体会通过水分、土壤颗粒、有机物质等胶结而形成一定的黏结力,使其在该状态下具有较大的土壤抗剪强度;而当土壤发生冻融作用时,黏粒含量较高的土壤会因为冻融作用导致冻胀敏感性增加,同时伴随着土壤水分的迁移而出现不同程度的水分散失,且经过多次冻融循环后,土体发生反复地膨胀和收缩,使土壤颗粒间空隙增加较大无法恢复其原有状况,致使冻融作用后 KS 比 BX 土壤抗剪强度衰减的程度大。

通过对 2 种试验土壤的抗剪强度与冻融循环次数、土壤容重和 MWD 之间进行相关性分析(表 6)发现,对于 2 种试验土壤,土壤抗剪强度与冻融循环次数、土壤容重和 MWD 之间存在较强的相关关系,其

中土壤抗剪强度与土壤容重和 MWD 均呈极显著正相关关系($P<0.01$),即土壤抗剪强度随土壤容重和 MWD 的减小而减小;而土壤抗剪强度与冻融循环次数呈极显著负相关关系($P<0.01$),说明随着冻融循环次数的增加,土壤抗剪强度呈减小趋势。此外,初始土壤含水量、土壤紧实度和冻结温度等其他因素也是影响土壤抗剪强度的重要原因,其对土壤抗剪强度的影响有待于进一步研究。

表 6 土壤抗剪强度与冻融循环次数和土壤性质之间的相关关系

供试土壤	指标	冻融循环次数	土壤容重	平均重量直径
BX	抗剪强度	-0.810**	0.689**	0.788**
KS	抗剪强度	-0.808**	0.887**	0.662**

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

4 结论

(1)冻融作用使 BX 和 KS 2 种试验土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均呈减小趋势。其中,BX 和 KS 土壤抗剪强度分别减小 3.9%和 9.2%,二者的土壤黏聚力分别减小 15.2%和 29.4%,内摩擦角分别减小 1.4%和 3.6%,且 KS 土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角的减小幅度皆大于 BX 土壤,主要原因:一是 KS 试验土壤有机质含量、土壤黏粒含量和 MWD 均大于 BX 土壤;二是冻融作用导致 KS 土壤容重减少幅度大于 BX 试验土壤。

(2)2 种试验土壤抗剪强度随冻融循环次数的增加呈先逐渐减小后趋于稳定的变化趋势;1 次冻融循环对试验土壤抗剪强度影响最大,经历 3 次冻融循环后,2 种试验土壤抗剪强度的减小幅度趋于平缓。其中 1 次冻融循环下 2 种试验土壤的抗剪强度减小量分别占 7 次冻融循环土壤抗剪强度总减小量的 43.4%和 61.0%;土壤黏聚力减小量分别占 7 次冻融循环后总减小量的 37.3%和 39.4%。

(3)土壤抗剪强度与冻融循环次数、土壤容重和 MWD 显著相关,对于 2 种试验土壤,土壤抗剪强度与土壤容重和 MWD 皆呈极显著的正相关关系($P<0.01$);而其与冻融循环次数呈极显著负相关关系($P<0.01$),说明 2 种试验土壤的抗剪强度皆随着土壤容重和 MWD 的减小而减小,而随着冻融循环次数的增加而减小,且冻融循环作用对 KS 土壤抗剪强度的影响大于 BX 土壤。

参考文献:

[1] 范兴科,蒋定生,赵合理.黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):70-76.

[2] Viran P A G, Binal A. Effects of repeated freeze-thaw cycles on physico-mechanical properties of cohesive soils [J].Arabian Journal of Geosciences,2018,11:250-262.

[3] Hotineanu A, Bouasker M, Aldaood A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays[J].Cold Regions Science and Technology,2015,119:151-157.

[4] Liu H Y, Yang Y, Zhang K L, et al. Soil erosion as affected by freeze-thaw regime and initial soil moisture content [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017,81(3):459-467.

[5] 杨成松,何平,程国栋,等.冻融作用对土体干容重和含水量影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增刊 2):2695-2699.

[6] Wang E, Cruse R M, Chen X, et al. Effects of moisture condition and freeze/thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability[J].Canadian Journal of Soil Science,2012,92(3):529-536.

[7] 范昊明,钱多,周丽丽,等.冻融作用对黑土力学性质的影响研究[J].水土保持通报,2011,31(3):81-84.

[8] 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.

[9] Bondarenko G L, Sadovsky A V. Water content effect of the thawing clay soils on shear strength[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1991:123-127.

[10] 王连峰,蔡延江,解宏图.冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系[J].应用生态学报,2007,18(10):2361-2366.

[11] 查小春,唐克丽.黄土丘陵林地土壤侵蚀与土壤性质变化[J].地理学报,2003,58(3):464-469.

[12] 倪万魁,师华强.冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J].冰川冻土,2014,36(4):922-927.

[13] 董晓宏,张爱军,连江波,等.反复冻融下黄土抗剪强度劣化的试验研究[J].冰川冻土,2010,32(4):767-772.

[14] 王铁行,罗少锋,刘小军.考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J].岩土力学,2010,31(8):2378-2382.

[15] 马巍,徐学祖,张立新.冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J].岩土工程学报,1999,21(2):23-25.

[16] 水利部.中国水土流失防治与生态安全.东北黑土区卷[M].北京:科学出版社,2010.

[17] 中华人民共和国水利电力部.土工试验规程 SDS01-79 [M].北京:水利出版社,1980.

[18] 张惠忍,李法虎,吕威.冻融状态和初始含水率对土壤力学性能的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):128-133.

[19] 张祖莲,洪斌,黄英,等.降雨作用下云南省红土抗剪强度与坡面侵蚀模数的关系[J].水土保持通报,2017,37(1):1-8.

[20] Yoder, Robert E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J].Journal of the American Society of Agronomy,1936,28,22(5):337-351.

年)佳芦河流域发生蓄满产流的几率增大。

植被对流域产流的调控作用取决于植被的三要素,即植被盖度、枯落物厚度以及根系密度^[17]。因此本文的后续研究应以枯落物和根系密度作为研究对象,采用人工模拟产流试验,定量探究枯落物覆盖量及根系密度与产流特征值的相关关系,为全面揭示黄土高原主要产沙区植被对于流域产流机制影响提供坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] 江泽慧.全球变化背景下土地退化防治的挑战与创新发展[J].世界林业研究,2013,26(6):1-4.
- [2] Kathleen A F, Esteban G J, Robert B J. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy[J].Global Change Biology,2015,11(10):1565-1576.
- [3] 李国荣,李希来,陈文婷.黄河源区退化草地水土流失规律[J].水土保持学报,2017,31(5):51-55.
- [4] 张翀,王静,雷田旺.退耕还林工程以来黄土高原植被覆盖与地表湿润状况时空演变[J].干旱区研究,2018,35(6):1468-1476.
- [5] 蔺鹏飞,张晓萍,刘二佳,等.黄土高原典型流域水沙关系对退耕还林(草)的响应[J].水土保持学报,2015,29(1):1-6.
- [6] 赵阳,胡春宏,张晓明.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,38(21):112-119.
- [7] 刘晓燕,杨胜天,李晓宇.黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制[J].中国科学,2015,45(10):1052-1059.
- [8] Zhao G J, Mu X M, Tian P, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: A case study of the Wei River basin, China[J].Hydrological Processes,2013,27(26):3852-3863.
- [9] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [10] 李楠.下垫面变化条件下的黄土高原产流机制辨析研究[D].郑州:郑州大学,2018.
- [11] 姚文艺,徐建华,冉大川,等.黄河流域水沙变化情势分析与评价[M].郑州:黄河水利出版社,2011.
- [12] 李世明,马骏,许珂艳.黄河多沙粗沙区典型流域次暴雨产洪产沙预报研究[M].郑州:黄河水利出版社,2014.
- [13] 宋孝玉.工程水文学[M].郑州:黄河水利出版社,2014.
- [14] 芮孝芳.产流模式的发现与发展[J].水利水电科技进展,2013,33(1):1-6.
- [15] 信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学(D 辑),2007,37(11):1504-1514.
- [16] 俞奇骏,张洪波,陈克宇,等.佳芦河流域水沙演变及其驱动因素分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):151-156.
- [17] 刘晓燕.黄河近年水沙锐减成因[M].北京:科学出版社,2016.
- [18] 杨波,王全九,郝姗姗.佳芦河流域 1988—2013 年土壤侵蚀时空变化特征[J].水土保持学报,2017,31(5):87-93.
- [19] 张霞,李鹏,李占斌.不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究[J].水土保持学报,2018,32(6):16-21.
- [20] 赵梦杰,姚文艺,王金花,等.植被覆盖度对黄土高原地区土壤入渗及产流影响的实验研究[J].中国水土保持,2015(6):41-43.
- [21] 廖建华,李丹勋,王兴奎,等.黄土高原侵蚀产沙与高含沙水流空间分异对比分析[J].自然资源学报,2010,25(1):100-111.
- [22] 李坤,姚文艺,肖培青,等.植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J].中国水土保持,2017(3):27-30.
- [23] 孙一源,高行方,余登苑.农业土壤力学[M].北京:农业出版社,1985:54-97.
- [24] 范昊明,张瑞芳,周丽丽,等.气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析[J].干旱区资源与环境,2009,23(6):48-53.
- [25] 张海欧,解建仓,南海鹏,等.冻融交替对复配土壤团粒结构和有机质的交互作用[J].水土保持学报,2016,30(3):273-278.
- [26] 宁俊,王玉花,张聪敏.初始含水量及冻融循环对黄土微结构的影响[J].科学技术与工程,2018,18(5):285-290.
- [27] 苏谦,唐第甲,刘深.青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊 1):2990-2994.
- [28] Tian J F, Ye W J, Yang G S. The analysis of effects on shear strength characteristics of loess by moisture content changes and freeze-thaw circle[C]// Isrm Young Scholars Symposium on Rock Mechanics,2014:415-420.
- [29] 袁琳.蒙脱石的胀缩机理及改性技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
- [30] 蒋梅茵,杨德涌,熊毅.中国土壤胶体研究:VI II.五种主要土壤的粘粒矿物组成[J].土壤学报,1982,19(1):62-70,98.
- [31] 卜建清,王天亮.冻融及细粒含量对粗粒土力学性质影响的试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(4):608-614.

(上接第 35 页)