

# 交替冻融对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响

魏 宁<sup>1</sup>, 魏 霞<sup>2,3</sup>, Huang Chihua<sup>3</sup>

(1.西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨陵 712100; 2.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 3.Agronomy Dep., Purdue Univ., and USDA-ARS National Soil Erosion Research Lab., 275S Russell St, West Lafayette, IN 47907-2077, USA)

**摘 要:**为了揭示冻融作用对土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性的影响,为冻融作用影响下的土壤侵蚀预报提供科学依据,通过室内交替冻融循环试验和变流量微型“V”型水槽人工放水冲刷试验,研究了交替冻融作用影响下土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的变化特征。试验设计了参照试验(CK),3 种交替冻融循环周期处理(1,3,6)和 2 种土壤质量含水率水平(10%,20%)。结果表明:不同试验处理对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响程度和趋势不同。当冻融循环周期为 1 时,土壤的临界剪切力和土壤细沟可蚀性相比参照试验呈现增大的趋势;当冻融循环周期继续增大至 3,6 时,土壤的临界剪切力和土壤细沟可蚀性相对于参照试验呈减小趋势。当冻融循环周期相同时,10% 含水率水平下的土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性均大于 20% 含水率水平下的土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性。研究为冻融作用影响下土壤侵蚀的预报提供重要参考。

**关键词:**冻融作用; 变流量冲刷; 土壤临界剪切力; 土壤细沟可蚀性

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0019-06

## Influence of Freeze-Thaw Effects on Soil Critical Shear Stress and Soil Rill Erodibility

WEI Ning<sup>1</sup>, WEI Xia<sup>2,3</sup>, HUANG Chihua<sup>3</sup>

(1.College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Agronomy Department, Purdue University, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907-2077, USA )

**Abstract:** In order to reveal the influence of freeze-thaw effects on soil erosion by water, effects of freeze-thaw on the variation of critical shear stress under the influence of effects of freeze-thaw were studied by alternately freezing-thawing tests and scouring tests. Three kinds of freeze-thaw cycles (1, 3 and 6), two kinds of soil moisture mass fractions (10% and 20%) and control test (CK) were involved. The results show that different experimental treatments have different impact degrees and different impact tendency on soil critical shear stress and soil erodibility; when test soil experiences one freeze-thaw cycle, soil critical shear stress and soil erodibility show the increasing trend compared to the control experiment; when the freeze-thaw cycle continues to increase to 3 and 6, the soil critical shear stress and soil erodibility show the decreasing trend compared to the control experiment, and when freeze-thaw cycle is equal to 3, soil critical shear stress and soil erodibility were minimum; Soil moisture mass fraction has the significant effect on soil critical shear stress and soil erodibility; when freeze-thaw cycles are same, soil critical shear stress and soil erodibility under 10% soil moisture mass fraction are bigger than the corresponding values under 20% soil moisture mass fraction. These results can provide the support for soil erosion prediction in the context of freeze-thaw cycle.

**Keywords:** effects of freeze-thaw; variable flow scouring; soil critical shear stress; soil erodibility

收稿日期:2020-06-21

修回日期:2020-07-02

资助项目:国家自然科学基金(51679115);兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基本科研业务费专项基金(lzujbky-2018-kb01)

第一作者:魏宁(1981—),女,陕西扶风人,硕士,讲师,主要从事应用数学与统计学方面的研究。E-mail:weining@nwfau.edu.cn

通信作者:魏霞(1980—),女,陕西扶风人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文学及水资源学等方面的研究。E-mail:weix@lzu.edu.cn

冻融是指土层由于温度降到 0℃ 以下和升至 0℃ 以上而产生冻结和融化的一种物理地质作用和现象<sup>[1-2]</sup>。土壤的冻结和融化实质是土壤水的冻结和融化,即土壤中水分相态的变化过程。交替冻融指的是由于季节或昼夜热量变化在冻土表层及以下一定深度形成的反复冻结——融化的土壤过程,它作为一种自然现象普遍存在于高纬度、高海拔地区以及大多中纬度地区。交替冻融对土壤物理性质的影响,主要表现在水与冰转化过程中体积胀缩对土壤团聚结构的破坏。交替冻融对土壤物理性质的影响主要取决于交替冻融的速率、交替冻融温度、土壤含水率、土壤容重和交替冻融循环的次数等<sup>[3]</sup>。研究表明,交替冻融作用下土壤理化性质、结构和质地等均会发生改变,使土壤更容易成为侵蚀的物质来源,进而加剧土壤侵蚀程度<sup>[3-8]</sup>。既然交替冻融作用破坏土壤团聚体结构,降低土壤的团聚体稳定性<sup>[8-15]</sup>,那么必然会影响到土壤的临界剪切力和土壤细沟可蚀性,进而影响土壤侵蚀量。众所周知,土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性是表征土壤抗侵蚀能力的两个重要参数,反映土壤对侵蚀外营力剥蚀和搬运的易损性和敏感性,是影响土壤流失量的内在因素和定量研究土壤侵蚀的基础<sup>[16-23]</sup>。然而,目前有关冻融的研究主要集中在交替冻融作用对土壤团聚体稳定性<sup>[8,10-12]</sup>、土壤容重<sup>[13-14]</sup>、土壤抗冲性等<sup>[15]</sup>方面,对冻融作用影响下的土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性这两个参数的研究较少涉及。鉴于此,本文利用室内冻融循环试验和变流量放水冲刷试验,研究冻融作用影响下土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的变化特征,旨在揭示交替冻融作用影响下土壤自身抗侵蚀能力的两个重要参数——土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的变化趋势与规律,为冻融作用影响下土壤侵蚀的预报提供重要参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与装置

本试验是在美国农业部土壤侵蚀国家重点实验室进行。供试土壤取自美国印第安纳州西拉法叶普渡大学动物科学研究和教育中心(87°00′54″W, 40°29′24″N)的表层土壤(0—10 cm),供试土壤>0.05,0.05~0.002,<0.002 mm 的粒径质量百分比为 14%,66%,20%。将采集的土壤剔除植物根系和杂物后自然风干,然后过 5 mm 筛,配置成试验设计的土壤质量含水率(10%和 20%),放置在冻融循环监测系统中进行交替冻融循环,将满足冻融循环周期

设计的土壤再次风干,作为试验用土备用。冻融循环试验的最高温度为 4℃,最低温度为-12℃,交替冻融的温度变化速率分别是-12℃/24 h 和 4℃/24 h,冻融循环的周期为 1,3,6。该冻融循环格局(温度、温度的变化速率、冻融循环周期等)的设计与该土壤所在地区的主要交替冻融方式相符合。

试验土槽<sup>[22-23]</sup>尺寸为 3 个 0.5 m×0.045 m×0.13 m 底部开孔的土槽,每个土槽的两端有一个“V”型通道。装土前,在土槽下部铺填一层 0.08 m 厚的天然砂砾,以保持试验土的透水状况接近天然坡面,再在天然沙层上铺设一层粗纤维,然后装填试验用土,试验用土的厚度为 0.05 m,试验设计坡度 3%。具体试验处理见表 1,除此之外,为了保证降雨前期土壤初始含水率一致,以不经受任何冻融作用的风干土为参照试验(CK)进行对照。

表 1 试验处理

试验处理	冻融循环周期/次	含水率/%
A <sub>11</sub>	1	10
A <sub>12</sub>	3	10
A <sub>13</sub>	6	10
A <sub>21</sub>	1	20
A <sub>22</sub>	3	20
A <sub>23</sub>	6	20
CK	0	自然风干状态

### 1.2 变流量人工放水冲刷试验

小流量的情况下,径流剪切力小于土壤抗侵蚀的临界剪切力,几乎不会发生土壤侵蚀,当土壤表面径流的强度增加时,径流剪切力增加,当超过土壤临界剪切力时就会产生侵蚀。因此依据土壤临界剪切力出现的实际,本试验设计从小流量向大流量依次梯度变化。冲刷试验采用逐渐增大流量的方法进行,在稳流水箱与冲刷试验槽之间安装小型流量计进行流量控制。试验过程中,总共有 100,150,200,250,300,350,400,450,500,550,600,700 ml/min 12 个梯级流量。试验过程中每分钟接取一个径流样品,每种流量下接取 3 个径流样品。冲刷方式为连续冲刷。

试验结束后,将试验径流样品称重,加入饱和明矾溶液沉淀 24 h,然后倒掉上清液,将倒掉清液的径流泥沙样放进烘箱,105℃烘 24 h,等彻底干燥后,取出称重,计算径流泥沙样品。根据土壤侵蚀率和水流剪切力的关系确定土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性。

### 1.3 土壤临界剪切力、细沟可蚀性的确定

土壤临界剪切力计算公式如下<sup>[24-26]</sup>:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \tag{1}$$

式中: $D_r$  为土壤分离能力 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ;  $K_r$  为土壤细沟可蚀性 $(\text{s}/\text{m})$ ;  $\tau$  为水流剪切力 $(\text{Pa})$ ;  $\tau_c$  为土壤临界剪切力 $(\text{Pa})$ 。

水流剪切力计算公式如下<sup>[27-28]</sup>:

$$\tau = \rho g H S \quad (2)$$

式中: $\tau$  为水流剪切力 $(\text{Pa})$ ;  $\rho$  为水的密度 $(\text{kg}/\text{m}^3)$ ;  $g$  为重力加速度 $(\text{m}/\text{s}^2)$ ;  $H$  为水深 $(\text{m})$ ;  $S$  为水槽坡度 $(\%)$ 。

土壤分离能力计算公式如下<sup>[29-30]</sup>:

$$D_r = \frac{M_s}{tA} \quad (3)$$

式中: $D_r$  为土壤分离能力 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ;  $M_s$  为时间  $t$  内被分离的土壤干重 $(\text{kg})$ ;  $t$  为坡面径流冲刷时间 $(\text{s})$ ;  $A$  为采样器面积 $(\text{m}^2)$ 。

## 1.4 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2010 和 IBM SPSS Statistics 20 统计软件对试验数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(least-significant difference, LSD)比较相同含水率不同冻融循环周期期间的差异。

## 2 结果与分析

众所周知,土壤侵蚀的发生必须具备两个条件,即外部营力——侵蚀动力和内在物质——侵蚀对象。对于水力侵蚀而言,侵蚀的外营力即是降雨及其形成的径流,侵蚀对象即为地表土壤。径流在沿坡面梯度方向运动过程中,在其运动方向上有径流剪切力产生,径流剪切力是径流在坡面位置 and 时间的函数<sup>[24-25]</sup>。只有当土壤表面径流的强度增加,径流剪切力增加,超过临界剪切力  $\tau_c$  时就会产生侵蚀。与之相伴随的临界剪力  $\tau_c$  是表征土壤抗侵蚀能力的一个参数,其值相对比较固定,与土壤的比重、含水率、结构等因素有关,是土壤侵蚀计算式中的一个非常重要的参数。土壤细沟可蚀性  $K_r$  也是表征土壤自身抗侵蚀能力大小的一个重要因子,是评价土壤对侵蚀敏感程度的重要指标,表示了土壤被侵蚀的难易程度,反映土壤对侵蚀外营力剥蚀和搬运的易损性和敏感性。但如何确定  $\tau_c$  和  $K_r$ , 至今仍没有一个广为接受的理论或试验的方法。目前,通常的做法是将侵蚀率与径流剪应力进行回归分析,取回归直线在剪应力轴上的截距为  $\tau_c$  值,取回归直线的斜率为  $K_r$  值。

因此,本文也采用目前比较通用的做法来确定土壤的临界剪切力  $\tau_c$  和土壤细沟可蚀性  $K_r$ 。土壤侵

蚀率采用“V”型水槽的放水冲刷试验,观测得到土壤侵蚀量,进而转换得之。径流剪切力由公式(2)确定。将计算的每种试验处理,不同交替冻融循环周期和不同土壤质量含水率组合下的土壤的侵蚀率与径流剪切力点绘在直接坐标系中,见图 1。可以看出,土壤侵蚀率随水流剪切力的增大而增大,土壤侵蚀率与水流剪切力呈线性关系。其函数的一般形式如下:

$$y = Ax - B \quad (4)$$

式中: $y$  为土壤侵蚀率 $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ;  $x$  为水流剪切力 $(\text{Pa})$ ;  $A, B$  为系数。

为了进一步分析不同交替冻融循环周期和不同的土壤质量含水率对土壤临界剪切力的影响,将图 1 各种处理下的侵蚀率与径流剪切力的关系式(1)进行变形,变形为与公式  $D_r = K_r (\tau - \tau_c)$ <sup>[25]</sup> 形式一致的关系式,如下所示:

$$y = A(x - B/A) \quad (5)$$

式中: $y$  为土壤侵蚀率 $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ;  $x$  为水流剪切力 $(\text{Pa})$ ;  $A$  为土壤细沟可蚀性 $(\text{s}/\text{m})$ ;  $B/A$  为水流临界剪切力 $(\text{Pa})$ 。也就是说对于每场试验,只有当水流剪切力大于相应的  $B/A$  时,才会有侵蚀发生,该值也为每种处理下的土壤临界剪切力值。

### 2.1 相同土壤含水率条件下冻融循环对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响

表 2 列出了根据图 1 中的各个拟合关系方程计算的土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性值。由表 2 可知,参照试验 CK 的土壤临界剪切力为 0.300 Pa。当土壤质量含水率为 10%,冻融循环周期为 1,3,6 时,对应的土壤临界剪切力的值分别为 0.380,0.259,0.267 Pa。当土壤质量含水率为 20%,冻融循环周期为 1,3,6 时,对应的土壤临界剪切力的值分别为 0.338,0.238,0.242 Pa。分析发现,两种土壤质量含水率下,土壤经过 1 个周期的冻融循环后,土壤临界剪切力与参照试验的相应值相比有所增大,当土壤经过 3 个周期的冻融循环后,土壤临界剪切力显著降低,随着土壤的冻融循环周期增至 6 时,土壤临界剪切力又有所增加,但其值仍小于参照试验 CK 的土壤临界剪切力。

由表 2 可知,参照试验 CK 的土壤细沟可蚀性为 0.003 0 s/m,当土壤质量含水率为 10%,冻融循环周期为 1,3,6 时,对应的土壤细沟可蚀性的值分别为 0.007 9,0.002 7,0.001 5 s/m,即当土壤经历 1 个周期的冻融循环后,土壤细沟可蚀性相对参照试验显著增大,当土壤经历 3 个和 6 个周期的冻融循环后,土壤临界剪切力降低,且均小于参照试验 CK 的土壤细

沟可蚀性值。同理,当土壤质量含水率为 20%,冻融循环周期为 1,3,6 时,对应的土壤细沟可蚀性的值分别为 0.006 8,0.002 1,0.003 3 s/m,即当土壤经历 1 个周期的冻融循环后,土壤细沟可蚀性增大,当土壤

继续经历冻融循环作用,其周期增大至 3 时,土壤细沟可蚀性出现明显的减小趋势,当冻融循环周期增大至 6 时,土壤细沟可蚀性又有所增加,但冻融循环周期为 3,6 时,土壤的细沟可蚀性均小于参照试验。

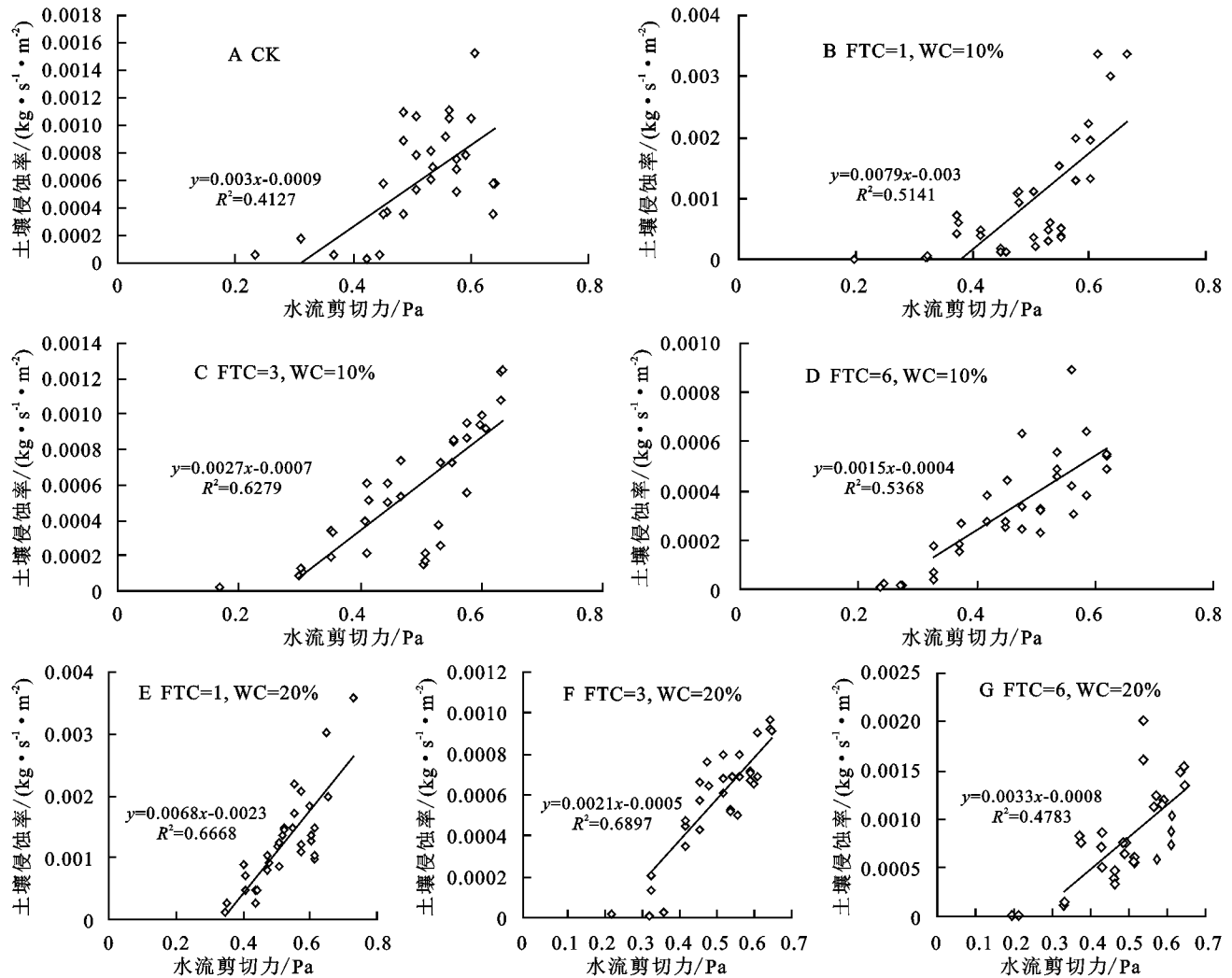


图 1 不同试验处理下土壤侵蚀率与径流剪切力的关系

表 2 不同试验处理下的土壤临界剪切力				
处理	FTC	$W_c$	$\tau_c$	$K_r$
A <sub>11</sub>	1	10%	0.38a	0.0079a
A <sub>12</sub>	3	10%	0.259e	0.0027cd
A <sub>13</sub>	6	10%	0.267d	0.0015e
A <sub>21</sub>	1	20%	0.338b	0.0068a
A <sub>22</sub>	3	20%	0.238f	0.0021d
A <sub>23</sub>	6	20%	0.242f	0.0033b
CK	0	自然风干状态	0.3c	0.003bc

注:不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著,下同。

由以上分析可知,交替冻融循环周期对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响显著,且随着交替冻融循环周期的不同,土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响趋势与程度不同。两种土壤含水率水平下,当交替冻融循环周期为 1 时,交替冻融作用使土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性显著增大,当交替冻融循

环周期为 3,6 时,交替冻融作用使土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性减小。

### 2.2 相同交替冻融循环周期下土壤含水率对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响

由表 2 可知,当交替冻融循环周期为 1 时,10%和 20%两种不同土壤含水率下的土壤临界剪切力的值分别为 0.380,0.338 Pa,均大于参照试验的 0.300 Pa,即在两种不同含水率下,经过 1 个周期的冻融循环后,土壤临界剪切力增大,且低含水率时土壤临界剪切力增大的幅度较高含水率时土壤临界剪切力增加的幅度大。当交替冻融循环周期为 3 时,10%和 20%两种不同土壤含水率下的土壤临界剪切力分别为 0.259,0.238 Pa,均小于参照试验的 0.300 Pa,且低含水率下的土壤临界剪切力较高含水率下土壤临界



剪切力的值大。当交替冻融循环周期为6时,10%和20%两种不同土壤含水率下的土壤临界剪切力分别为0.267,0.242 Pa,均小于参照试验的0.300 Pa,且10%含水率下的土壤临界剪切力较20%含水率下的土壤临界剪切力大。

同理,当交替冻融循环周期为1时,10%和20%两种不同土壤含水率下的土壤细沟可蚀性分别为0.007 9,0.006 8 s/m,均大于参照试验的0.003 0 s/m,即在两种不同含水率处理下,土壤经过1个周期的冻融循环后,土壤细沟可蚀性增大,且低含水率时土壤细沟可蚀性增大的幅度较高含水率时土壤细沟可蚀性增大的幅度大。当交替冻融循环周期为3时,10%和20%两种不同土壤含水率下的土壤细沟可蚀性分别为0.002 7,0.002 1 s/m,均小于参照试验的0.300 Pa,且低含水率下的土壤细沟可蚀性较高含水率下的土壤细沟可蚀性大。当交替冻融循环周期为6时,10%和20%两种不同土壤含水率下土壤细沟可蚀性分别为0.001 5,0.003 3 s/m,均小于参照试验的0.300 s/m,且10%含水率下的土壤细沟可蚀性较20%含水率下的土壤细沟可蚀性大。

综上可知,不同土壤含水率对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响程度不同,土壤质量含水率水平为10%时的土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的变化幅度均大于土壤质量含水率水平为20%时的土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的变化幅度。

### 3 讨论

本研究是探索交替冻融作用对土壤临界剪切力和细沟可蚀性的影响,结果表明,交替冻融能够改变土壤的临界剪切力和细沟可蚀性。当冻融循环周期为1时,10%和20%含水量处理下的土壤临界剪切力和细沟可蚀性相比对照组都显著增大。随着冻融循环周期继续增大至3时,两种含水量处理下的土壤临界剪切力和细沟可蚀性显著降低,且明显低于对照组。当冻融循环周期继续增大至6时,10%含水量的土壤临界剪切力反而显著增大,细沟可蚀性显著减小,但其值小于控制组;20%含水量的土壤临界剪切力和细沟可蚀性显著增大。并且随着冻融循环周期的增加,土壤临界剪切力和细沟可蚀性的变化速率减小,即随着冻融循环周期的增加,土壤临界剪切力和细沟可蚀性趋于稳定。已有研究结果也表明,历经一次冻融循环,土壤的团聚体稳定性显著增大,随着冻融循环周期的增加,土壤团聚体的稳定性降低,最终

趋于稳定。

此外,土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性是表征土壤抗侵蚀能力的两个重要参数,土壤细沟可蚀性越大,土壤越易侵蚀,土壤临界剪切力越小,土壤越易侵蚀。从理论上讲,土壤临界剪切力和细沟可蚀性对交替冻融的响应应该相反。但本研究的结果表明,在10%含水量时,随着冻融循环周期的增加,土壤临界剪切力和细沟可蚀性的变化趋势相反,但在20%含水量时,随着冻融循环周期的增加,土壤临界剪切力和细沟可蚀性的变化趋势相同。这可能是由于初始冻融含水量相比冻融循环周期对土壤临界剪切力和细沟可蚀性影响较大缘故,已有研究也表明,对于同一种土壤,团聚体稳定性可能随着F-T循环的增加而增加或降低,具体取决于冻融初始土壤含水量<sup>[10-12]</sup>。

### 4 结论

(1) 交替冻融循环周期不同,其对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响程度和趋势也不同,当冻融循环周期为1时,交替冻融作用使土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性增大,当冻融循环周期为3,6时,交替冻融作用使土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性减小。

(2) 土壤含水率不同,其对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响程度不同,本研究所涉及的两种土壤质量含水率下,当交替冻融循环周期相同时,低含水率(10%)下的土壤临界剪切力与土壤细沟可蚀性均大于高含水率(20%)下的土壤临界剪切力与土壤细沟可蚀性。

(3) 各种试验处理下的土壤侵蚀率与径流剪切力之间的关系仍然呈良好的线性关系。不同处理下,交替冻融作用对土壤临界剪切力与土壤细沟可蚀性的影响趋势相同。

致谢:感谢同在美国农业部土壤侵蚀国家重点实验室吴秋菊博士和杨韶洋硕士在试验过程中给予的帮助!

#### 参考文献:

- [1] 李述训,南卓铜,赵林.冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J].冰川冻土,2002,24(2):109-115.
- [2] 杨梅学,姚植栋.青藏高原表层土壤的日冻融循环[J].科学通报,2006,51(16):1974-1976.
- [3] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: trends, methodological weaknesses and suggested improvements [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(5):977-986.
- [4] 范昊明,蔡强国.冻融侵蚀研究进展[J].中国水土保持科

- 学,2003,1(4):50-55.
- [5] 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.
  - [6] Harmon R S, William W, Doe III. Landscape erosion and evolution modeling[M]. Springer Us, 2001.
  - [7] Halvorson J J, Gatto L W, McCool D K. Overwinter changes to near-surface bulk density, penetration resistance and infiltration rates in compacted soil[J]. Journal of Terramechanics, 2003,40(1):1-24.
  - [8] 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(3):175-182.
  - [9] Wei X, Huang C, Wei N, et al. The impact of freeze-thaw cycles and soil moisture content at freezing on runoff and soil loss [J]. Land Degradation and Development, 2019,30(5):515-523.
  - [10] AnetaŽabenská, Miroslav Dumbrovský. Changes of Soil Aggregate Stability as a Result of the Effect of Freeze-thaw Cycles [J]. Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2015, 63 (4): 1211-1218.
  - [11] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1):1-8.
  - [12] Sahin U, Anapali O. Short communication. The effect of freeze-thaw cycles on soil aggregate stability in different salinity and sodicity conditions [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2007,5(3):431-434.
  - [13] Sahin U, Angin I, Kiziloglu F M. Effect of freezing and thawing processes on some physical properties of saline-sodic soils mixed with sewage sludge or fly ash [J]. Soil & Tillage Research, 2008,99(2):254-260.
  - [14] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J].水土保持学报,2009,23(6):186-189.
  - [15] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(17):105-112.
  - [16] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999,14(4):345-350.
  - [17] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.土地退化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J].农业工程学报,2009,25(2):56-61.
  - [18] 宋阳,刘连友,严平,等.土壤可蚀性研究评述[J].干旱区地理,2006,29(1):124-131.
  - [19] Léonard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength [J]. Catena, 2004,57(3):233-249.
  - [20] Moody, J A. Critical shear stress for erosion of cohesive soils subjected to temperatures typical of wildfires [J]. Journal of Geophysical Research, 2005,110(1):1-13.
  - [21] Hanson G J, Cook K R. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004,20(4):455-462.
  - [22] Nouwakpo S K, Huang C H, Bowling L, et al. Impact of vertical hydraulic gradient on rill erodibility and critical shear stress[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(6):1914-1921.
  - [23] Nouwakpo S K, Huang C H. A fluidized bed technique for estimating soil critical shear stress [J]. Soil Ence Society of America Journal, 2012,76(4):1192-1196.
  - [24] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.确定侵蚀细沟土壤临界抗剪应力的 REE 示踪方法[J].土壤学报,2004,41(1):28-34.
  - [25] 张晴雯,雷廷武,潘英华,等.细沟侵蚀可蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(试验)求解方法[J].中国科学院研究生院学报,2004,21(4):468-475.
  - [26] Thoman R W, Niezgoda S L. Determining erodibility, critical shear stress, and allowable discharge estimates for cohesive channels:Case study in the powder river basin of wyoming [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,134(12):1677-1687.
  - [27] Zhang G H, Liu G B, Tang K M, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China [J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008,51(3):883-890.
  - [28] Zhang G H, Tang M K, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under land uses in the Loess Plateau of China [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2009,34(9):1302-1309.
  - [29] Zhang X C, Liu W Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2005,131(3/4):127-142.
  - [30] Fu B J, Liu Y, Lu Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. Ecological Complexity, 2011,8(4):284-293.