

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.013; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.013.

张智一, 王彬, 王文刚, 等. 冻融作用对 WEPP 模型细沟可蚀性参数的影响[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):54-62,70.

Zhang Zhiyi, Wang Bin, Wang Wengang, et al. Effect of freeze-thaw cycles on rill erodibility parameters in WEPP model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):54-62,70.

冻融作用对 WEPP 模型细沟可蚀性参数的影响

张智一¹, 王彬^{1,2}, 王文刚¹, 刘翼成¹, 周笑¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2.北京林业大学 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: [目的] 探究冻融循环作用对 WEPP 模型估算细沟可蚀性参数的影响规律, 为提高模型在季节性冻融区侵蚀预测的精度提供科学依据。[方法] 以东北典型黑土区农耕地土壤为研究对象, 设置不同放水流量(1, 2, 3 L/min)、冻融循环次数(0, 1, 3, 5, 10 次)及初始土壤含水量(质量含水量 16.5%, 24.8% 和 33.0%), 通过控制条件室内模拟冲刷试验, 研究冻融循环作用与初始土壤含水量共同作用对细沟剥蚀率和可蚀性变化的影响, 并基于实测临界剪切力评估 WEPP 模型细沟可蚀性参数在冻融循环作用下的可靠性。[结果] (1) 冻融循环次数和初始土壤含水量对黑土细沟剥蚀率具有显著影响($p < 0.01$)。随着冻融循环次数和初始土壤含水量的增加, 细沟剥蚀率逐渐增大, 且在 1 次冻融循环作用下增幅最大, 3~5 次冻融循环作用后趋于稳定。此外, 初始土壤含水量的升高加剧了冻融循环作用对剥蚀率的影响。(2) 黑土细沟平均可蚀性值为 3.6×10^{-3} s/m, 冻融循环作用使其增加 1.84 倍。未冻结条件下, WEPP 模型表现出较好的拟合效果; 而在冻融循环作用下, WEPP 模型对临界剪切力呈整体高估现象, 平均高估幅度为 58.59%。[结论] 冻融循环作用显著增加细沟剥蚀率和可蚀性, 且初始土壤含水量的升高加剧了这一影响, 此外, 冻融循环作用下 WEPP 模型估算可蚀性参数的不确定性增大。

关键词: 临界剪切力; 冻融循环作用; 初始土壤含水量; WEPP 模型; 细沟可蚀性

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0054-09

Effect of freeze-thaw cycles on rill erodibility parameters in WEPP model

Zhang Zhiyi¹, Wang Bin^{1,2}, Wang Wengang¹, Liu Yicheng¹, Zhou Xiao¹

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

2.National Forest Ecosystem Observation and Research Station of Jinyun Mountain,

Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing), Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the effects of freeze-thaw cycles on the rill erodibility parameters estimated by the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model, aiming to provide a scientific basis for improving the model's accuracy in predicting erosion in seasonal freeze-thaw regions. [Methods] Agricultural soil from a typical black soil region in Northeast China was selected as the research object. Different water discharge rates (1, 2, 3 L/min), number of freeze-thaw cycles (0, 1, 3, 5, 10 cycles), and initial soil moisture contents (16.5%, 24.8%, and 33.0% by mass) were set. Laboratory simulated scouring experiments under controlled conditions were conducted to investigate the combined effects of freeze-thaw cycles and initial soil moisture on rill erosion rates and erodibility variations. Additionally, the reliability of the WEPP model's rill erodibility parameters under freeze-thaw cycles was evaluated based on measured critical shear stress. [Results] (1) Both the number of freeze-thaw cycles and initial soil moisture content significantly influenced rill erosion rates ($p < 0.01$). As the number of freeze-thaw cycles and initial soil moisture content increased, the rill erosion rate

收稿日期: 2025-02-18

修回日期: 2025-05-15

接受日期: 2025-05-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“复杂界面冻融-融雪-渗流多场耦合驱动的黑土区沟道侵蚀动力机制”(42477338)

第一作者: 张智一(1999-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zzy_0373@163.com

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

<http://stbcyj.paperonice.org>

progressively increased, with the greatest increase observed after the first freeze-thaw cycle, followed by stabilization after 3~5 cycles. Moreover, an increase in initial soil moisture content intensified the effect of freeze-thaw cycles on the erosion rate. (2) The average rill erodibility of black soil was 3.6×10^{-3} s/m, which increased by 1.84 times under freeze-thaw cycles. Under unfrozen conditions, the WEPP model demonstrated satisfactory fitting performance. However, under freeze-thaw cycles, the model generally overestimated critical shear stress, with an average overestimation of 58.59%. **[Conclusion]** Freeze-thaw cycles significantly increase rill erosion rates and erodibility, with higher initial soil moisture content intensifying these effects. Furthermore, the WEPP model demonstrates increased uncertainty in estimating erodibility parameters under freeze-thaw cycles.

Keywords: critical shear stress; freeze-thaw cycles; initial soil moisture content; WEPP model; rill erodibility

土壤侵蚀作为全球性环境问题,不仅导致土地退化、农业减产,严重威胁生态环境安全,还对经济社会的可持续发展产生重大影响。土壤侵蚀模型在水土流失预测和防治中起着关键作用。自 20 世纪 80 年代以来,科学家们开发了以 WEPP(Water Erosion Prediction Project)为代表的物理过程模型,并在全球范围内得到了广泛认可和应用^[1]。WEPP 模型中,细沟侵蚀参数是描述坡面侵蚀及泥沙分离过程中的关键参数,主要包括细沟可蚀性和临界剪切力,用于表征侵蚀土壤的内在性质^[2]。然而,由于坡面侵蚀过程的复杂性,WEPP 模型中的细沟侵蚀参数多采用基于水动力原理的细沟最大潜在剥蚀率和径流剪切力的半经验线性回归方法进行估算^[3]。这些关系主要是源于模型研发区农耕地中等质地土壤的长期观测数据,具有较强的地域依赖性^[4]。因此,一定程度上增加了该模型在其他区域或不同土壤条件下适用的不确定性。尤其在冻融循环作用明显的高海拔或中高纬度地区,反复的冻结和融化过程通过影响土壤结构和力学稳定性等,显著影响土壤抗侵蚀能力,使这种不确定性更为明显^[5]。

早期研究认为,细沟可蚀性与临界剪切力由土壤的内在理化性质所决定。对于特定类型的土壤而言,细沟可蚀性应为定值,故 WEPP 模型中将二者假定为常数^[6]。已有研究表明,东北黑土区冻融作用导致坡面和小流域年均土壤流失量分别增加了 80.8% 和 50%^[7]。目前,关于冻融循环作用下坡面侵蚀过程的研究逐渐成为热点。研究表明,冻融循环作用通过影响土壤孔隙度、容重、团聚体稳定性和抗剪强度等物理和力学性质,显著改变细沟可蚀性和临界剪切力^[8-9]。具体而言,冻融循环次数的增加通常会导致细沟可蚀性逐渐增大,而临界剪切力则呈现相反的趋势^[10]。此外,初始土壤含水量的影响较为复杂,尽管普遍认为土壤水分与细沟可蚀性呈正相关关系,但不同研究结果并不一致。例如,有研究发现水分张力越小,冻融作用后细沟可蚀性越高^[11];而另一

些研究则得出了相反结果^[12]。这种差异可能与土壤类型有关,相关研究发现随着初始土壤含水量的升高,不同质地土壤的细沟可蚀性变化趋势存在差异^[13]。Liu 等^[14]认为,在较低土壤含水量条件下细沟可蚀性无明显规律;而在较高土壤含水量条件下,随着冻融循环次数的增加,细沟可蚀性逐渐增大。同时,在初始土壤含水量为 20% 时,临界剪切力逐渐增大,并在经历 10 次冻融循环后达到峰值。尽管已有研究初步揭示了单一冻融循环次数或初始土壤含水量对细沟可蚀性和临界剪切力的影响,但两者相互作用对 WEPP 模型细沟可蚀性参数估算的影响仍不明晰。因此,研究初始土壤含水量与冻融循环相互作用对细沟侵蚀参数的影响,对坡面侵蚀预报模型的优化具有重要意义。

据统计,季节性冻融土壤约占我国国土面积的 53.5%^[15],在全国乃至世界范围内广泛分布。东北黑土区位于中高纬度地区,受气候影响,冬春季节土壤表层“昼融夜冻”现象明显,加剧该地区的坡面侵蚀现象^[16]。目前,WEPP 模型虽基于土壤热传导理论研发出冻土—融冻子模块,但对冻融循环作用下细沟可蚀性参数的刻画仍需进一步优化。本研究旨在探讨冻融循环作用对 WEPP 模型细沟可蚀性参数估算的影响。为此,本文以东北地区典型黑土为研究对象,通过室内控制条件冻融模拟和径流冲刷试验,明确冻融循环作用下细沟剥蚀率与细沟可蚀性的变化范围与特征,分析冻融循环次数和初始土壤含水量对细沟侵蚀的影响,并评价冻融循环作用下 WEPP 模型拟合临界剪切力的效果,以期为土壤侵蚀物理模型研发以及季节性冻融区土壤侵蚀预报提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省齐齐哈尔市克山农场(125°08'—125°37'E, 48°12'—48°23'N),地处漫岗

丘陵地带,平均坡度 $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$,海拔240~340 m。该地区属寒温带大陆性季风气候,年均气温 2.1°C ,年均降水量和蒸发量分别为500 mm和1 190 mm。无霜期122 d,日照时间短,气温日较差大。根据野外实测数据,春季融雪期土壤冻融循环(白天解冻,晚上冻结)7~12次,冻结和解冻的温度分别为 -15°C 和 8°C ^[17-18]。研究区土壤类型主要为黑钙土,少量为草甸土,属于东北典型黑土区。

1.2 试验装置与材料

室内模拟径流冲刷试验于2023年8月—2024年2月在中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层水土过程试验大厅进行。供试土壤取自黑龙江省克山农场0—20 cm耕层。供试土壤质地为粉质黏土,其中砂粒(50~2 000 μm)、粉粒(2~50 μm)、黏粒(<2 μm)的体积分数分别为19.62%,44.02%和36.36%,土壤有机质含量为47.06 g/kg,塑限为25.81%,液限为41.32%。试验装置包括细沟冲刷土槽和冻融循环控制设备。细沟冲刷土槽采用Shainberg等^[19]研究细沟土壤临界起动影响因素时所设计的“V”形土槽,尺寸为长50 cm、宽7.5 cm、高18 cm(图1)。土槽底部铺5 cm细砂,确保试验土的透水状况接近天然地表条件。细砂上部为8 cm测试土,采用边装填边压实的方法,分两层进行装填。各填装土层为4 cm,两土层接触面须夯实后打毛,以保证土层间良好的接触和均匀性。为模拟细沟集中径流并降低边壁的干扰,将土壤表面处理为深1 cm、边坡1:1的V形细沟;同时在土槽两端分别设置长度为25 cm的“V”字形引水槽,以使径流达到稳定状态,并以集中股流的形式通过土槽表面。为模拟实际情况,土槽的进水口处黏合一层细砂,形状与冲刷土槽一致,使得表面粗糙度接近土壤表面。试验通过流量计控制径流稳定在设计流量,并采用土壤冻融循环控制设备(WGDW-7 050型高低温交变湿热试验箱)控制土壤冻结温度为 -15°C ,消融温度为 8°C 。本研究中,将待测土壤依次经历时长为12 h的冻结过程和12 h的消融过程,定义为经历一次冻融循环作用。

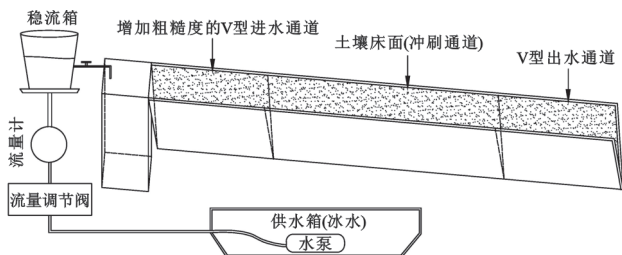


图1 细沟“V”型冲刷槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of V-shaped rill scour channel

1.3 研究方法

1.3.1 试验设计 根据研究区季节性“昼融夜冻”的特点,设计0,1,3,5,10次共5个土壤冻融循环次数。结合课题组实测的土壤田间持水量(33.0%),设置16.5%,24.8%和33.0%共3种初始土壤含水量。依据前期试验测定的细沟黑土颗粒起动流量和中国科学院海伦水土保持监测研究站的观测数据^[20],选取1,2,3 L/min作为设计的融雪径流冲刷量(多年平均降雪量40 mm、融雪径流系数取0.4),对应的上方汇水面积分别为25,50,75 m^2 。此外,黑土区耕地坡度大多介于 $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$,且坡面土壤侵蚀强度在坡耕地坡度超过 5° 时可达中度或重度侵蚀。因此,试验坡度取 5° 作为代表。每个处理设置2次重复试验。

1.3.2 试验方法

(1) 试验土样制备。取适量的自然风干土过10 mm筛,去除石砾等杂质。根据野外实测农耕地表层0—20 cm土壤容重(1.28 g/cm^3),按照设计容重计算所需土壤重量,并分层填充V型试验槽。对于不同设计初始土壤含水量的土样,计算所需水量后,使用小型喷雾器均匀喷洒至土壤表面至全部入渗。各土样达到设计含水量后,用保鲜膜包裹V型槽,静置12 h以确保试验槽内土壤水分均匀分布。随后,将土槽放置于冻融循环控制器中,按设计冻融循环次数进行样品制备。对应冻融循环次数完成后,进行模拟径流冲刷试验。

(2) 模拟径流冲刷试验。试验用水来自冰水混合供水箱,水温恒定在 0°C ,以模拟自然条件下由积雪融化产生的融雪水温度。径流坡面与稳流箱保持同一水平面,并紧密相连,以保证径流均匀流出。每次冲刷开始前,进行流量的率定和校准。根据前期试验观测结果,各试验条件下细沟在经历10 min冲刷后,其剥蚀速率均呈现稳定状态且细沟形态发育趋于完整,表明此时系统已达到动态平衡。因此,本试验将单次冲刷时长统一设定为10 min。试验过程中,每隔30 s采集一次径流泥沙样品。试验结束后,静置样品后移除径流上层清液,然后将其放入 105°C 的烘箱中烘干12 h,达到恒重后,称取样品泥沙质量,并计算剥蚀率。

1.3.3 细沟侵蚀参数计算及模型评价方法

(1) 细沟可蚀性与临界剪切力拟合值。细沟土壤剥蚀描述径流驱动作用下的土壤分离与搬运过程。鉴于细沟径流的输沙率受控于输沙能力,WEPP模型的细沟土壤剥蚀率方程为:

$$D_r = K_r \times (\tau - \tau_c) \times \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \quad (1)$$

式中: D_r 为细沟剥蚀率[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; K_r 为细沟可蚀性(s/m); τ_c 为临界剪切力(Pa); τ 为径流剪切力

(Pa); G 为水流输沙量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; T_c 为水流输沙能力 [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]. 给定运动能量的集中水流, 当径流输沙量为 0 值 ($G=0$), 即细沟径流以清水状态对细沟冲刷时, 径流剥蚀能力被认为将达到其最大值或是其潜在的最大剥离能力 $D_{r(\max)}$, 此时有:

$$D_{r(\max)} = K_r \times (\tau - \tau_c) \quad (2)$$

当获得不同控制条件下的细沟剥蚀率以及径流剪切力后, 可通过式(2)计算细沟可蚀性与土壤临界剪切力获得拟合值。细沟径流剪切力可通过式(3)获得。

(2) 临界剪切力实测值。逐渐增大冲刷径流量, 当观测到侵蚀发生且土壤颗粒开始持续分离时, 记录此时的临界流量。基于该流量结合式(3—4)进行参数拟合, 即可获得细沟临界剪切力的实测值:

$$\tau = \gamma \times r \times S \quad (3)$$

$$r = \frac{1}{2} \times \left(\frac{2^{5/3} n \times Q}{\pi \times S^{1/2}} \right)^{3/8} \quad (4)$$

式中: γ 为水的重度 (N/m^3); r 为水力半径 (m); n 为曼宁粗糙系数; Q 为流量 (m^3/s); S 为试验坡度的正弦值 (m/m)。水力半径可通过曼宁公式来获取^[19]。细沟剥蚀率 D_r 通过烘干泥沙质量计算。

采用 Microsoft Excel 2019 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) 比较不同土壤含水量以及不同冻融循环次数间的差异, 并利用 Origin 2019 进行制图。

2 结果与分析

2.1 冻融循环作用下的细沟剥蚀过程

试验条件下, 产流初期细沟剥蚀率普遍较高, 并呈现迅速递减后趋于稳定的趋势(图 2)。径流冲刷初期, 较高的土壤剥蚀率与表层松散土壤颗粒的易分散性密切相关, 尤其在径流冲刷 2 min 内较为明显^[21]。此外, 冲刷初期土壤表层含水量快速饱和, 即其含水量由塑限快速达到液限, 导致表层土壤有效应力迅速降低造成可蚀性快速增大。流量对细沟剥蚀过程存在显著影响。流量为 1 L/min 时, 冻融循环作用对细沟剥蚀过程的影响较小, 具体表现为冻土与未冻土间的剥蚀率差异不显著。而在 2 L/min 和 3 L/min 时, 冻融循环作用后的细沟剥蚀率普遍高于未冻土, 并且随着冻融循环次数的增加, 剥蚀率的波动性明显增大。结果表明, 2 L/min 和 3 L/min 流量条件下, 冻融循环作用使细沟剥蚀率平均提高 67.92%。此外, 径流冲刷初始阶段 (<4 min), 剥蚀率的递减趋势比未冻融组更为迅速。这种波动产

生的原因主要是由于径流冲刷初期, 径流除进行下切侵蚀外, 还会进行侧向侵蚀。随着冲刷历时的延长, 沟壁下部掏蚀加剧, 受到重力的影响, 土壤表面出现跌坎, 从而增加侵蚀量。冻融循环作用通过促进表层土壤含水量的提升和降低黏聚力, 使表层土壤抗蚀能力降低。因此, 在较高流量条件下, 冻融循环作用显著加剧细沟剥蚀率的波动性^[22]。

2.2 冻融循环作用与初始土壤含水量对细沟剥蚀率的影响

冻融循环次数对细沟平均剥蚀率变化有显著影响 ($p < 0.05$) (图 3A)。冻融循环作用下的平均细沟剥蚀率总体高于未冻土。未冻土的平均剥蚀率为 $4.99 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 经过冻融作用后, 其剥蚀率增加 1.63 倍。同时, 随着冻融循环次数的增加, 剥蚀率整体呈现先上升后逐渐稳定的趋势。对于不同初始土壤含水量条件, 剥蚀率在经历 1 次冻融循环作用后明显上升, 且在 3~5 次冻融循环后逐渐趋于稳定。冻融循环次数为 1, 3, 5, 10 次时的平均剥蚀率分别是未冻土的 1.45, 1.65, 1.71, 1.72 倍。研究发现, 冻融循环作用对细沟剥蚀率的影响受初始土壤含水量的调节。不同初始土壤含水量下, 细沟剥蚀率随冻融循环次数变化的趋势具有显著差异 ($p < 0.05$), 增幅依次为 $33.0\% > 24.8\% > 16.5\%$ 。此现象的原因在于, 初始土壤含水量愈高, 冻融循环作用致使土壤孔隙水发生相变时对土壤内部结构的作用力越大, 从而导致团聚体破碎, 并显著增加细沟可蚀性^[23]。

对于未受冻融作用影响的土壤, 不同初始土壤含水量下的细沟剥蚀率无显著差异。然而, 受冻融作用影响后则呈现显著差异 ($p < 0.05$) (图 3B)。对于未冻土, 细沟剥蚀率随着初始土壤含水量的增加略有升高, 从 $4.71 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增至 $5.42 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 增幅为 15.07%。与未冻土不同, 冻土随初始土壤含水量的增加, 平均剥蚀率显著增高。具体而言, 在冻融循环次数为 1~10 次时, 当初始土壤含水量从 16.5% 增加到 24.8%, 细沟剥蚀率分别上升 11.11%, 10.58%, 12.28%, 16.52%; 当初始土壤含水量从 24.8% 增加到 33.0%, 细沟剥蚀率进一步上升, 分别为 25.73%, 31.80%, 29.76%, 31.93%。对比相对增长率可见, 在 33.0% 初始土壤含水量时冻土剥蚀率的增加幅度更大, 这进一步验证了初始土壤含水量与冻融循环作用对细沟剥蚀率的相互作用影响。综上所述, 冻融循环作用与初始土壤含水量的耦合作用显著影响细沟剥蚀率。冻融循环作用对土壤的破坏效应在初期较强, 并随着冻融循环次数的增加逐渐减弱。而初始土壤含水量则在冻融循环过程中起到“放大效应”, 加剧土壤侵蚀过程。

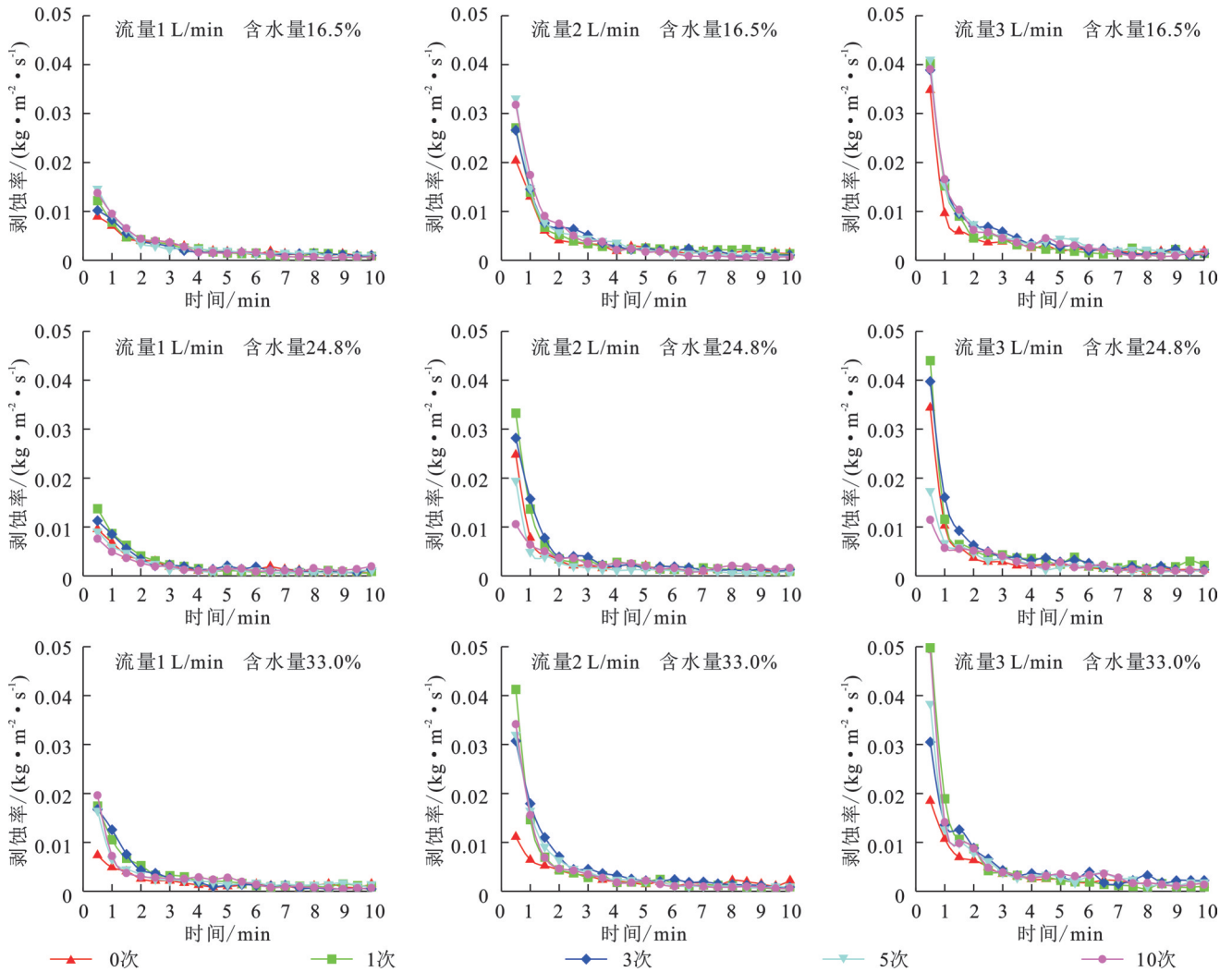


图2 不同冻融次数与初始土壤含水量下的细沟剥蚀率变化过程

Fig. 2 Variation process of rill erosion rate under different numbers of freeze-thaw cycles and initial soil moisture contents

2.3 冻融循环作用与初始土壤含水量对细沟可蚀性的影响

为准确评估细沟可蚀性 K_r 与临界剪切力 τ_c 的变化范围,本研究仅采用跌坎发生前的试验数据进行分析(表1)。线性拟合结果显示,经历冻融循环作用后的土壤 K_r 值为 $0.29\sim 0.50\times 10^{-2}$ s/m(平均 0.40×10^{-2} s/m),高于未冻土的 K_r 值 $0.21\sim 0.23\times 10^{-2}$ s/m(平均 0.22×10^{-2} s/m),增幅达38.10%~117.39%。相关分析表明,冻融循环次数与 K_r 呈极显著正相关($r=0.642, p<0.01$),初始土壤含水量与 K_r 呈显著正相关($r=0.495, p<0.05$)(图4)。不同初始土壤含水量条件下,随着冻融循环次数的增加, K_r 呈现出不断增大并逐渐稳定的趋势。具体而言,经历1, 3, 5, 10次冻融循环后, K_r 平均增幅分别为58.46%, 16.50%, 5.83%, 1.57%。分析可知1次冻融循环作用时 K_r 的变化最为显著($p<0.05$),表明首次冻融循环对于 K_r 的影响最为明显;而随着冻融循环次数的增加,其对 K_r 的影响逐渐减弱。对于未冻土,不同初始土壤含

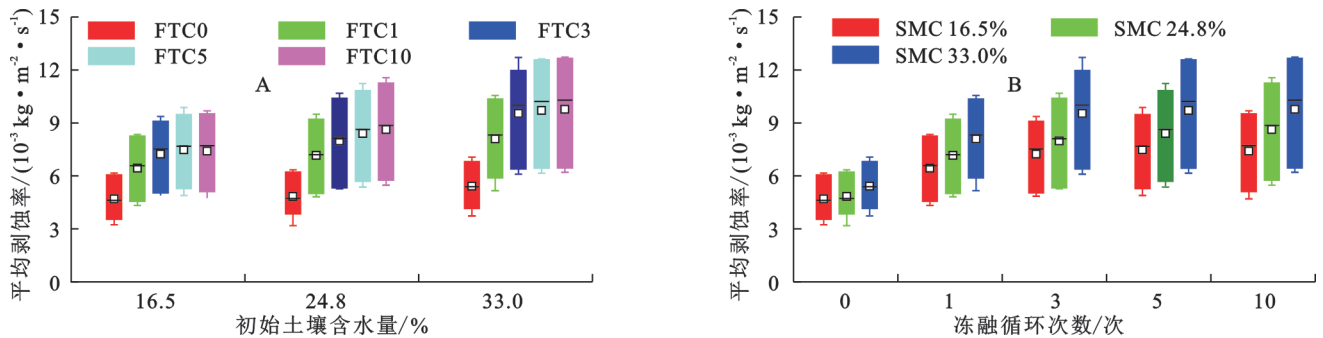
水量下的 K_r 无显著差异($p>0.05$)。但在相同冻融循环次数作用下, K_r 随初始土壤含水量的升高而增大,平均增幅分别为18.72%和19.01%。此外,初始土壤含水量的升高使得冻融循环作用下 K_r 增加的程度更加显著。单因素方差分析显示,不同初始土壤含水量下 K_r 随冻融循环次数增加的变化趋势有显著差异($p<0.05$)。经历10次冻融循环作用,初始土壤含水量为33.0%时的 K_r 平均增长率(104.35%)高于24.8%和16.5%。综上所述,冻融循环作用和初始土壤含水量对细沟可蚀性 K_r 具有显著影响,冻融循环次数的增加会导致 K_r 增大,而初始土壤含水量的升高则加剧冻融循环作用对细沟可蚀性的影响。

2.4 不同冻融循环次数对细沟侵蚀临界剪切力的影响

试验数据表明,初始土壤含水量相同时,冻融循环次数增加导致细沟的实测临界剪切力(τ_{cm})呈减小趋势(图5)。经过10次冻融循环作用后,初始土壤含水量为16.5%, 24.8%, 33.0%时的 τ_{cm} 分别从0.866,

0.807, 0.767 Pa 下降至 0.754, 0.676, 0.622 Pa。且随着初始土壤含水量的升高, τ_{cm} 的降幅从 14.85% 增至 23.31%。不同初始土壤含水量下, τ_{cm} 的变化趋势无明显差异 ($p > 0.05$)。然而, 基于 WEPP 模型拟合的临界剪切力 τ_c 呈现与 τ_{cm} 相反的趋势。即 τ_c 随冻融循环次数的增加整体呈增大趋势, 且在冻融循环作用下, 拟合结果均高于实测的 τ_{cm} 。在 16.5%, 24.8% 和 33.0% 初始土壤含水量条件下, 拟合 τ_c 从 0.857, 0.810, 0.783 Pa 分别增至 1.111, 1.167, 1.212 Pa。冻融循环作用下, 拟合 τ_c 相对实测 τ_{cm} 的高估范围为 18.81%~93.03% (平均 58.59%); 相比之下, 未冻土的高估范围为 0.41%~2.05% (平均 1.17%)。冻融

循环作用导致 τ_c 相对 τ_{cm} 的高估范围较未冻土增长 17.76%~90.98%, 且随着冻融循环次数的增加, 拟合结果的高估幅度逐渐增大。具体而言, 1, 3, 5, 10 次冻融循环后, 拟合结果比未冻土的高估范围分别增加 38.62%, 54.19%, 67.20% 和 69.66%。这一结果表明, 冻融循环作用下 WEPP 模型整体高估临界剪切力, 且随着冻融循环次数的增加, 拟合效果变差。有研究发现, 冻融循环次数的增加使得土壤孔隙数量增多、孔隙连通性增强和面积孔隙率增加^[24]。冻融循环作用通过破坏土壤颗粒间的黏结力, 降低土壤抗侵蚀能力, 进而造成实测临界剪切力 τ_{cm} 逐渐减小。



注: FTC 表示冻融循环次数, SMC 表示初始土壤含水量; 同一冻融循环次数或初始土壤含水量水平下不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

图 3 冻融循环次数与初始土壤含水量对细沟平均剥蚀率的影响

Fig. 3 Effects of number of freeze-thaw cycles and initial soil moisture content on average rill erosion rate

表 1 细沟可蚀性参数和临界剪切力拟合分析

Table 1 Fitting analysis of rill erodibility parameters and critical shear stress

初始土壤含水量	冻融循环次数	回归方程	$K_r / (10^{-2} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1})$	τ_c (Pa)	R^2
16.5%	0	$y = 0.0021x - 0.0018$	0.21	0.857	0.95
	1	$y = 0.0029x - 0.0028$	0.29	0.966	0.97
	3	$y = 0.0033x - 0.0034$	0.33	1.030	0.93
	5	$y = 0.0035x - 0.0038$	0.35	1.086	0.94
	10	$y = 0.0036x - 0.004$	0.36	1.111	0.97
24.8%	0	$y = 0.0021x - 0.0017$	0.21	0.810	0.93
	1	$y = 0.0034x - 0.0036$	0.34	1.059	0.94
	3	$y = 0.0039x - 0.0044$	0.39	1.128	0.95
	5	$y = 0.0042x - 0.0049$	0.42	1.167	0.98
	10	$y = 0.0043x - 0.005$	0.43	1.163	0.99
33.0%	0	$y = 0.0023x - 0.0018$	0.23	0.783	0.94
	1	$y = 0.004x - 0.0045$	0.40	1.125	0.96
	3	$y = 0.0048x - 0.0057$	0.48	1.188	0.94
	5	$y = 0.005x - 0.0061$	0.50	1.212	0.97
	10	$y = 0.005x - 0.006$	0.50	1.200	0.99

注: y 表示细沟平均剥蚀率, x 表示细沟径流剪切力。

3 讨论

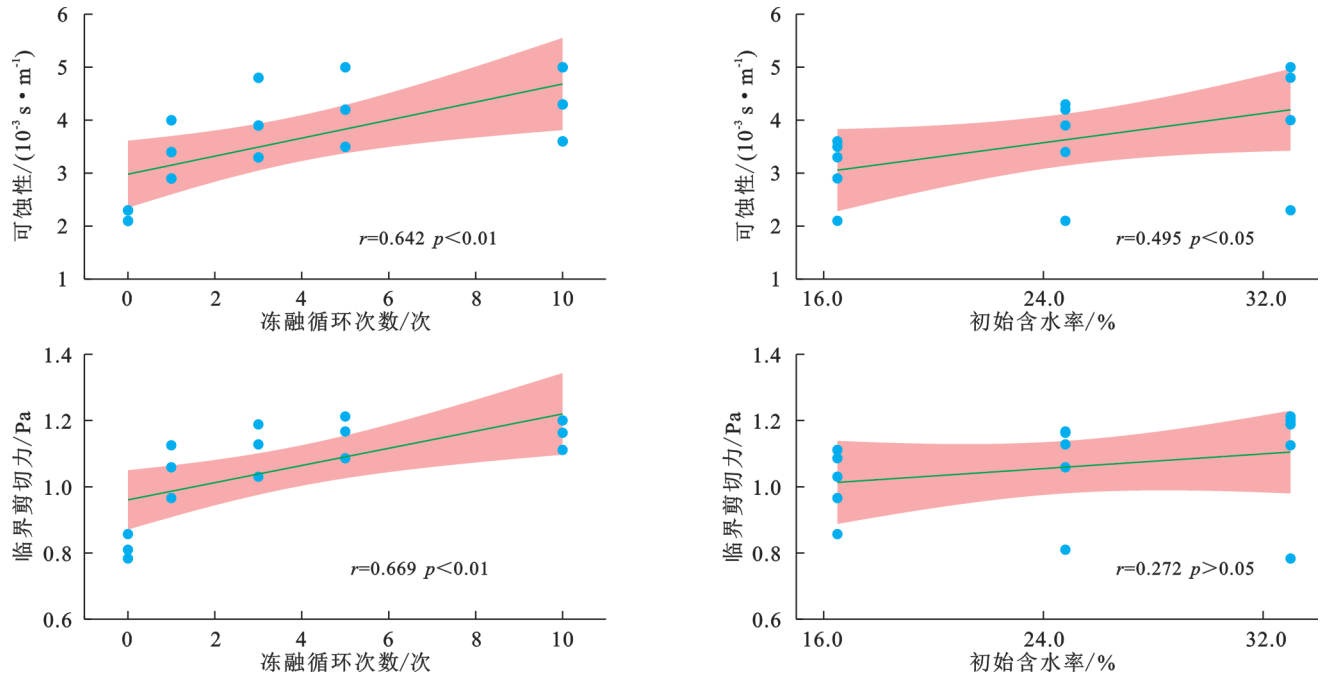
3.1 细沟剥蚀率对冻融循环作用和初始土壤含水量的响应

本研究表明, 冻融循环作用显著增加细沟剥蚀

率, 并且表现出明显的阈值效应。具体而言, 在第 1 次冻融循环作用后, 细沟剥蚀率增幅最大; 而在经过 3~5 次冻融循环作用后, 细沟剥蚀率趋于稳定。这一现象产生的原因可以从冻融循环对土壤微结构的影响进行解释。已有研究表明, 冻融循环作用

通过改变土壤微孔隙结构、颗粒组成和团聚体稳定性等特征,增加细沟可蚀性,从而加剧土壤侵蚀过程^[9]。冻融循环作用的本质是土壤水分在温度变化下发生相变,水的体积膨胀造成团聚体破碎,降低土壤抗侵蚀能力。王文刚等^[24]研究发现,第1次冻融作用对土壤团聚体的破坏最为剧烈,而随着冻融循环次数的增加,团聚体破碎程度逐渐减小,并在第7次后趋于稳定。这一结果与本研究细沟剥蚀率的变

化趋势相符,表明冻融循环作用下细沟剥蚀率的增幅在多次冻融作用后会逐渐趋于稳定,体现了土壤结构的可恢复性。进一步分析表明,冻融循环作用将大团聚体转化为细小颗粒,而微团聚体等细小颗粒孔隙内水分含量低,难以形成足以破坏土壤结构的冻胀作用力^[25]。同时,微团聚体具有较强的抗挤压力和抗收缩能力,有助于土壤结构趋于新的稳态,导致冻融循环的破坏作用逐渐弱化。



注: $p < 0.01$ 表示在 0.01 水平上(双尾)极显著相关; $p < 0.05$ 表示在 0.05 水平上(双尾)显著相关。

图 4 不同冻融循环次数与初始土壤含水量影响下的细沟可蚀性与临界剪切力相关关系

Fig. 4 Correlation between rill erodibility and critical shear stress under different numbers of freeze-thaw cycles and initial soil moisture contents

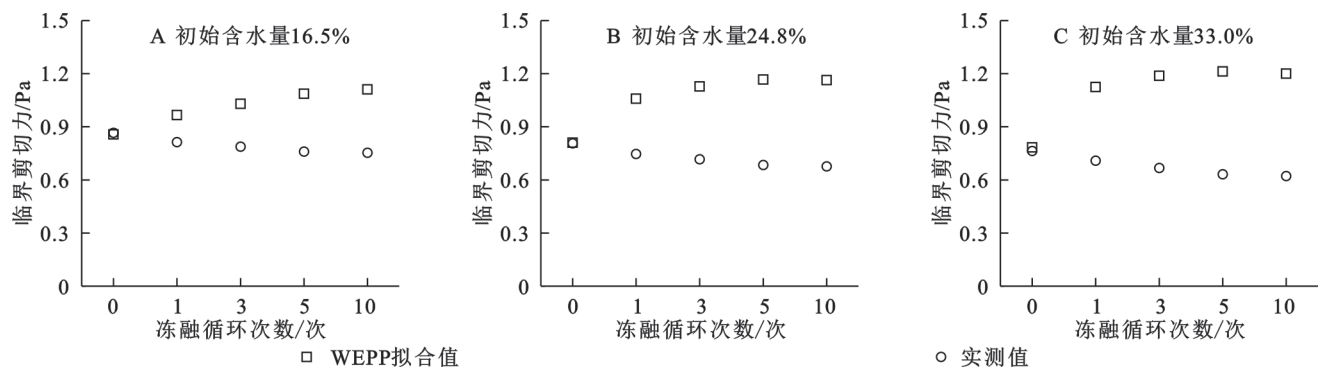


图 5 不同冻融循环次数下临界剪切力拟合值与实测值变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of fitted and measured values of critical shear stress under different numbers of freeze-thaw cycles

冻融循环作用对细沟剥蚀率的影响并非单一因素驱动,初始土壤含水量在这一过程中发挥出“放大效应”。该现象与 Van Klaveren 等^[11]的研究结论一致,其研究表明初始土壤含水量越高,冻融循环作用后细沟剥蚀率越高,且细沟可蚀性与初始土壤含水量的关系类似于剥蚀率和初始土壤含水量的关系。

原因在于较高的初始土壤含水量可提供更多的土壤孔隙水,冻结过程中会产生更大的孔隙水压力,从而对土壤颗粒产生更强的挤压作用,导致土壤物理和力学性能的破坏^[8]。相关研究指出,冻融循环作用使得较高初始土壤含水量条件下的土壤孔隙度增大,土壤结构更为疏松,更易发生侵蚀^[5]。此外,也有研

究发现,随着冻融循环次数增加,土壤弹性模量和抗剪强度呈现衰减劣化趋势,且初始土壤含水量越高其力学指标衰减越明显^[23]。这表明初始土壤含水量的升高不仅加剧了冻融循环对土壤结构的破坏,也增强了细沟剥蚀率的增加。综上所述,冻融循环作用显著影响土壤结构的强度,进而增加细沟剥蚀率。初始土壤含水量的升高会加剧这一作用,通过增强冻融循环作用对土壤的物理和力学性质的破坏程度,进一步放大侵蚀效应。此研究结果可为了解冻融作用对土壤侵蚀的影响机制提供新的视角,并为未来的土壤保护措施提供理论依据。

3.2 冻融循环作用下的细沟可蚀性参数不确定性

为评估 WEPP 模型细沟可蚀性参数在冻融循环作用下的可靠程度,首先需要探讨细沟可蚀性拟合值结果的合理性。本研究中,细沟可蚀性估算的范围为 $(2.1\sim 5.0)\times 10^{-3}$ s/m,平均值为 3.6×10^{-3} s/m。已有研究表明,土壤质地、黏粒含量和有机质含量对细沟可蚀性具有重要影响^[13]。一般来说,土壤中的黏粒含量和有机质含量越高,细沟可蚀性越小^[26]。例如,Gilley 等^[27]计算兰开斯特地区细沟可蚀性为 5.3×10^{-3} s/m(黏粒含量 39.8%),这一结果与本研究的细沟可蚀性相近(黏粒含量 36.4%)。然而,相较于 Liu 等^[14]通过 WEPP 模型获得的相同研究区细沟可蚀性(黏粒含量 39.4%),本研究的细沟可蚀性相对低一个数量级。这表明除土壤质地外,其他因素也对细沟可蚀性产生影响。王晨洋等^[28]研究表明,在控制其他条件不变的情况下,流量的增大可以导致细沟可蚀性的增加。此外,一些学者也指出,当试验设计的流量范围较小时,得到的径流剪切力和土壤剥蚀率的回归斜率即细沟可蚀性越小^[29]。这些结果表明,利用 WEPP 模型计算细沟可蚀性时,设定的冲刷流量范围会影响细沟可蚀性的估算。本研究中,单宽流量范围 $(2.2\times 10^{-4}\sim 6.7\times 10^{-4}$ m³/s)与 Gilley 等^[27]的流量范围 $(2.5\times 10^{-4}\sim 1.27\times 10^{-3}$ m³/s)较为接近,而远小于 Liu 等^[14]的流量范围 $(1.25\times 10^{-3}\sim 5\times 10^{-3}$ m³/s)。进一步表明,本研究中对于细沟可蚀性范围的量化较为合理。

尽管早期研究认为细沟可蚀性是由土壤的内理化性质决定的,且对于特定类型的土壤来说应为定值。但随着研究的深入,越来越多的研究表明,细沟可蚀性参数受近地表水文条件、坡度等因素的影响^[30]。本研究进一步表明,冻融循环作用会对细沟可蚀性参数的估算产生不确定性。随着冻融循环次数增加,细沟可蚀性表现出逐渐增大的趋势(表 1)。这一现象与孙宝洋^[10]和卢超^[13]等的研究结果一致。冻融循环作用

通过孔隙水相变,影响土壤结构稳定性和力学性能,进而增大细沟可蚀性^[9]。实测的临界剪切力随冻融循环次数的增加呈减小趋势,这一变化表明冻融循环作用通过改变土壤颗粒间的黏结作用,进而降低土壤抗侵蚀能力^[5]。此外,本研究还发现,冻融循环作用导致基于 WEPP 模型对临界剪切力的拟合结果平均高估 58.59%,且随着冻融循环次数和初始土壤含水量的增加,拟合结果逐渐变差(图 5)。这一现象尚未在相关的研究中得到报道,但 Ari^[30]和王晨洋^[28]等的研究表明,在特定近地表水文条件下,WEPP 模型对细沟临界剪切力的估算也出现不适用的情况,并进行相应修正。该现象可能与冻融循环作用下细沟剥蚀率与径流剪切力的关系逐渐由线性向非线性转变有关^[14]。综上所述,冻融循环作用导致细沟可蚀性参数的不确定性增大,且这一影响随着冻融循环次数和初始土壤含水量的变化而加剧。为准确量化这一影响,仍需进一步研究并提出适用于冻融循环作用的细沟可蚀性评估方法。这些发现可为未来在冻融作用下细沟侵蚀过程的建模和预测提供重要参考。

4 结论

(1) 冻融循环作用和初始土壤含水量显著影响细沟剥蚀率($p<0.05$)。细沟剥蚀率随着冻融循环次数和初始土壤含水量的增加而增大,尤其在首次冻融循环作用时增幅最大;而经过 3~5 次冻融循环作用后,细沟剥蚀率逐渐趋于稳定。初始土壤含水量的升高加剧冻融循环作用对细沟剥蚀率的影响。

(2) 黑土细沟可蚀性的平均值为 3.6×10^{-3} s/m,在不同冻融循环作用下,其平均值为 4.0×10^{-3} s/m,是未冻融条件下的 1.84 倍。冻融循环作用可显著提高黑土细沟可蚀性。

(3) 未冻融条件下,临界剪切力的拟合值与实测值较为接近;然而,在冻融循环作用影响下,临界剪切力的拟合值普遍高于实测值,且随着冻融循环次数及初始土壤含水量的增加,拟合值的高估幅度逐渐增大,增幅为 18.81%~93.03%,平均高估 58.59%。这一结果表明冻融循环作用下,基于 WEPP 模型的临界剪切力估算存在不同程度的高估现象。

参考文献 (References):

- [1] Flanagan D C, Gilley J E, Franti T G. Water erosion prediction project (WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements [J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(5):1603-1612.
- [2] Elliot W J, Flanagan D C. Estimating WEPP cropland erodibility values from soil properties [J]. Journal of the

- Asabe, 2023, 66(2):329-351.
- [3] 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.
- [4] Laflen J M, Elliot W J, Simanton J R, et al. WEPP: soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(1):39-44.
- [5] Wang G P, Zhang K L, Zhang Z D. Responses of physical properties of typical Mollisols to freeze-thaw cycles under simulated conditions[J]. *Geoderma*, 2024, 449:117020.
- [6] 魏慧, 赵文武, 王晶. 土壤可蚀性研究述评[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8):2749-2759.
- Wei H, Zhao W W, Wang J. Research progress on soil erodibility [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8):2749-2759.
- [7] 刘笑妍, 张卓栋, 张科利, 等. 不同尺度下冻融作用对东北黑土区产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5):45-50.
- Liu X Y, Zhang Z D, Zhang K L, et al. Effects of freezing and thawing on runoff and sediment yield in the black soil region of Northeast China at different scales[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5):45-50.
- [8] Zhou P C, Guo M M, Zhang X Y, et al. Quantifying the effect of freeze-thaw on the soil erodibility of gully heads of typical gullies in the Mollisols region of Northeast China[J]. *Catena*, 2023, 228:107180.
- [9] 张茜, 马仁明, 贾燕锋, 等. 冻融对典型黑土团聚体输移破碎特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(5):1275-1282.
- Zhang X, Ma R M, Jia Y F, et al. Effect of freeze-thaw cycles on aggregate breakdown of typical black soil during transportation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(5):1275-1282.
- [10] 孙宝洋, 吴志广, 李占斌, 等. 冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11):57-65.
- Sun B Y, Wu Z G, Li Z B, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11):57-65.
- [11] Van Klaveren R W, McCool D K. Freeze-thaw and water tension effects on soil detachment[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(4):1327-1338.
- [12] 魏宁, 魏霞, Huang Chihua. 交替冻融对土壤临界剪切力和土壤细沟可蚀性的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3):19-24.
- Wei N, Wei X, Huang C H. Influence of freeze-thaw effects on soil critical shear stress and soil rill erodibility [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3):19-24.
- [13] 卢超, 马周加杰, 李佳辉, 等. 冻融条件下土壤侵蚀阻力影响因素[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6):25-33.
- Lu C, Ma Z, Li J H, et al. The factors influencing soil erosion resistance under freeze-thaw conditions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6):25-33.
- [14] 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.
- [15] 汪菲, 唐少容, 王红雨. 季冻区土体水分迁移研究综述 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(S1):51-55, 70.
- Wang F, Tang S R, Wang H Y. Review on soil mobility in seasonally frozen area [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(S1):51-55, 70.
- [16] 赵娅君, 郑粉莉, 安小兵, 等. 典型黑土区坡耕地融雪、风力、降雨复合侵蚀效应[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(9):2421-2428.
- Zhao Y J, Zheng F L, An X B, et al. Compound erosion effect of snowmelt, wind, and rainfall on sloping farmlands of Chinese typical Mollisol region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(9):2421-2428.
- [17] 王一菲, 郑粉莉, 周秀杰, 等. 黑土农田冻结-融化期土壤剖面温度变化特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3):57-64.
- Wang Y F, Zheng F L, Zhou X J, et al. Soil profile temperature variation in farmlands during freeze-thaw period in mollisol region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3):57-64.
- [18] Wang L, Zuo X F, Zheng F L, et al. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region [J]. *Catena*, 2020, 193:104615.
- [19] Shainberg I, Laflen J M, Bradford J M, et al. Hydraulic flow and water quality characteristics in rill erosion [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4):1007-1012.
- [20] 王平, 李浩, 陈强, 等. 典型黑土区不同尺度观测场地融雪径流 [J]. *水土保持通报*, 2014, 34(5):244-247, 253.
- Wang P, Li H, Chen Q, et al. Different scale observation sites of snow melt runoff in typical black soil area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(5):244-247, 253.
- [21] 苟俊菲, 甘凤玲, 刘春红. 紫色土坡面细沟形态变化及其对产流产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5):61-68, 75.
- Gou J F, Gan F L, Liu C H. Variation of rill morphology and its effect on runoff and sediment yield on purple soil slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5):61-68, 75.