

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.038

CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.038

田方霄,周金龙,郝宇东,等.冻融作用下高寒土细沟侵蚀过程与输沙能力经验模型[J].水土保持学报,2026,40(1):89-98,109.

TIAN Fangxiao, ZHOU Jinlong, HAO Yudong, et al. Empirical model of rill erosion processes and sediment transport capacity in alpine soil under freeze-thaw action[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):89-98,109.

冻融作用下高寒土细沟侵蚀过程与输沙能力经验模型

田方霄^{1,2},周金龙^{1,2},郝宇东^{1,2},赵鸿博^{1,2},万丹^{1,2}

(1.西藏农牧大学资源与环境学院,西藏林芝860000;2.西藏农牧大学高寒水土保持研究中心,西藏林芝860000)

摘要: [目的] 为探讨冻融作用对细沟侵蚀的影响机制。 [方法] 通过室内沟槽冲刷试验,分析不同流量(q)与坡度(S)组合下细沟输沙特征,同时构建输沙能力因子模型。 [结果] 1)冻融作用使细沟输沙能力最高可提升34.34%,且影响程度具有明显的坡度和流量依赖性;使临界坡长由未冻融前6.8~8.1 m缩短至5.3~6.4 m。 2)冻融前后输沙能力均与流量保持线性关系($T_c=Aq$),但与坡度关系发生改变,冻融前随坡度呈指数增长($T_c=-ae^{(-S/b)}+c$),冻融后转为幂函数增长($T_c=dS^f$);建立未冻融输沙能力因子模型为 $T_c=-0.0414+0.1101S+192.5q$,冻融后为 $T_c=-0.0398+0.1077S+213.2q$,模型均具有较高精度($R^2=0.96$),其系数变化表明,冻融后流量对输沙能力影响增强,坡度影响减弱。 [结论] 冻融作用通过改变土壤结构,增强细沟输沙能力并改变其坡度响应关系。模型比较表明,冻融作用及土壤体积质量、类型与试验工况均影响模型预测效果。研究成果为高寒区水土流失预测和治理工作提供重要理论依据。

关键词: 冻融作用;细沟侵蚀;输沙能力;预测模型

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)01-0089-10

Empirical Model of Rill Erosion Processes and Sediment Transport Capacity in Alpine Soil under Freeze-Thaw Action

TIAN Fangxiao^{1,2}, ZHOU Jinlong^{1,2}, HAO Yudong^{1,2}, ZHAO Hongbo^{1,2}, WAN Dan^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000,

China; 2.Alpine Soil and Water Conservation Research Center, Xizang Agriculture and

Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the mechanisms by which freeze-thaw action affects rill erosion. [Methods] Laboratory flume scouring experiments were conducted to analyze rill sediment transport characteristics under different combinations of flow rate (q) and slope gradient (S), and sediment transport capacity factor models were constructed. [Results] 1) Freeze-thaw action increased the sediment transport capacity of rills by up to 34.34%, with a pronounced dependence on slope gradient and flow rate. Additionally, it shortened the critical slope length from 6.8~8.1 m to 5.3~6.4 m. 2) The sediment transport capacity maintained a linear relationship with flow rate ($T_c=Aq$) both before and after freeze-thaw processes, while its relationship with slope changed. Before freeze-thaw, it increased exponentially with slope ($T_c=-ae^{(-S/b)}+c$), while after freeze-thaw, it followed a power-law growth ($T_c=dS^f$). The established models, $T_c=-0.0414+0.1101S+192.5q$ before freeze-thaw and $T_c=-0.0398+0.1077S+213.2q$ after freeze-thaw, exhibited high accuracy ($R^2=0.96$). The changes in these coefficients indicated that the influence of flow rate on sediment transport capacity increased while that of slope decreased after freeze-thaw. [Conclusions] Overall, freeze-thaw action alters soil structure, enhances the sediment transport capacity of rills, and modifies the slope response relationship. Model comparisons

收稿日期:2025-09-03

修回日期:2025-10-23

录用日期:2025-10-31

网络首发日期(www.cnki.net):2025-11-21

资助项目:国家自然科学基金项目(32241036);西藏农牧大学林学博士点(一期)项目(533325001);西藏农牧大学研究生创新计划项目(YJS-2024-37)

第一作者:田方霄(2000—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail:17642140675@163.com

通信作者:万丹(1981—),女,博士,教授,主要从事高原土壤侵蚀机理与生态修复研究。E-mail:wandan9250@126.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

indicate that freeze-thaw action, soil bulk density, soil type, and experimental settings all affect the prediction performance of the models. These findings provide important theoretical support for soil erosion prediction and control in alpine regions.

Keywords: freeze-thaw action; rill erosion; sediment transport capacity; prediction model

Received: 2025-09-03

Revised: 2025-10-23

Accepted: 2025-10-31

Online(www.cnki.net): 2025-11-21

土壤侵蚀是土壤颗粒被水流剥蚀、搬运和沉积的过程^[1-3],该过程可导致土壤退化、土地生产力下降,严重威胁区域生态环境安全和可持续发展^[4-6]。在坡面侵蚀中,细沟侵蚀作为最主要的表现形式^[7],贡献坡面侵蚀 70% 以上的产沙量^[8],同时为泥沙搬运提供通道。因此,量化细沟侵蚀输沙能力对预测侵蚀产沙量、优化水土保持措施具有重要意义。

目前,在非冻融区域,细沟输沙能力的预测主要依赖于水力参数的经验方程^[9-10]。ALONSO 等^[11]提出($T_c = aq^b S^c$)幂函数关系,建立单宽流量(q)和坡度(S)于输沙能力的定量关系;NEARING 等^[12]基于水流剪切力(τ)构建 $T_c = k\tau^{1.5}$ 输沙能力预测模型;张光辉等^[13]针对黄土高原细沟侵蚀优化得到 $T_c = 0.008 q^{1.2} S^{1.6}$ 。此类模型在常规条件下表现良好,但其预测精度在很大程度上依赖于相对稳定的土壤物理性质。然而,在季节性冻土广泛分布的高寒地区,土壤侵蚀过程表现出显著特殊性。冻融作用通过破坏土壤团聚体结构、增加孔隙度并削弱土壤抗剪强度,从而改变该地区土壤的侵蚀特性^[14]。具体表现为在相同水流与坡度条件下,冻融后的土壤更易被水流剥蚀,导致水流用于搬运土壤颗粒的能量增强,从而使细沟水流在更短坡长内达到其输沙能力。尽管已有研究在高寒土壤冲刷试验中构建输沙能力预测方程,如喻武等^[15]提出的 $T_c = 1\ 697.83 S^{0.491} q^{1.043}$,但其未充分考虑冻融作用对输沙过程的影响机制。由于现有模型未能纳入冻融作用对土壤性质及输沙过程的影响,其在高寒区应用的适用性受到限制。因此,构建适用于高寒地区的输沙能力预测模型,对准确评估该区域土壤侵蚀风险至关重要。

青藏高原作为“亚洲水塔”,是我国重要的生态安全屏障^[16],其高寒环境塑造了独特的土壤侵蚀特

征。广泛分布的高寒土在冻融作用下土壤性质发生改变^[17-18],该过程加剧土壤结构的失稳和抗蚀性的降低。尽管现有研究^[19]已认识到冻融作用通过改变土壤结构、孔隙度和抗剪强度等方式影响侵蚀过程,但关于其对细沟输沙能力的影响仍缺乏系统试验支持与机理解释。此缺口制约高寒地区土壤侵蚀的准确预测与有效防控。基于此,本研究以高寒土为对象,开展室内沟槽冲刷试验,对比分析冻融前后土壤在不同坡度与流量组合条件下的输沙特征,探究冻融作用对细沟输沙能力的影响,在此基础上建立适用于高寒冻融地区的细沟输沙能力预测模型,以期为该区域土壤侵蚀防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与试验土壤

本试验在西藏农牧大学人工模拟降雨大厅进行。试验所用土壤取自色季拉山(29°21'~29°50'N, 94°28'~94°51'E)西坡,海拔 4 376 m。结合原状土壤实测体积质量数据和对色季拉山土壤物理性质的研究,本试验的土槽填土体积质量控制为 1.3 g/cm³。试验前,将土壤风干后测其机械组成,黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)质量分数分别为 2.4%、67.9%、29.7%,按照美国制划分标准^[15]确定其属于粉壤土。

表 1 为冻融前后土壤性质的变化。经冻融作用后,土壤体积质量降低 5.0%,孔隙度增加 0.5%,黏聚力下降 27.1%。砂粒含量减少,而粉粒和黏粒含量增加,表明冻融作用导致土壤团聚体破碎并降低颗粒间黏聚力,使土壤更易被剥蚀和搬运,冻融后土壤可蚀性(K 因子)约增加 6%。再者,由于不同土壤颗粒在降雨条件下的剥蚀和搬运速率存在差异,土壤可蚀性在降雨过程中呈动态变化特征^[20]。

表 1 冻融前后土壤性质对比

Table 1 Comparison of soil properties before and after freeze-thaw

组别	体积质量/ (g·cm ⁻³)	孔隙比/%	黏聚力/kPa	砂粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	黏粒质量 分数/%	$K/(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1})$
未冻融	1.30	56	2.69	29.7	67.9	2.4	0.30
冻融	1.23	57	1.96	22.6	74.3	3.1	0.32

1.2 试验装置

本研究设计室内模拟冲刷试验装置由供水器、

稳流槽、土槽 3 部分组成(图 1),其中土槽规格为 800 cm×10 cm×10 cm(长×宽×高)。

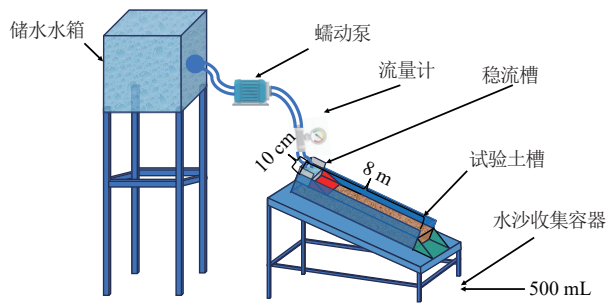


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.3 试验过程

将过 10 mm 筛的土壤分层填入土槽,每层压实至厚度 5 cm,共填装 2 层,总厚度 10 cm。填土过程中将表层扒平,确保上下层充分接触,并在土槽上、下部位采用环刀取样,检验土壤体积质量是否符合预设要求。为减弱边壁效应对侵蚀过程的影响,对靠近土槽边界的土壤进行重点压实,使土槽中部断面呈浅“U”形,以引导水流集中下泄。填装完成后对土槽充分饱和,静置自然沉降 24 h 以上。

随后,将土槽整体置于冷冻储存室($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)冻结不少于 24 h,待完全冻结后移至室温环境($15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)下解冻,至土槽完全融化后开始试验。试验前在储水箱中加入足量冰块以模拟高寒区融水径流温度,待冰完全融化并稳定后开始输水。所有试验均预先采用流量计进行标定,确保流量输出准确。水流经流量计后接入稳流槽,以均匀来流、减轻初始冲刷扰动。

试验时,将装置调整至目标坡度,调节至设定流量,待水流稳定后将稳流槽移至设定坡长位置开始冲刷,并于出水口处收集泥沙样品。水样静置 24 h 后,排出上层清液,剩余悬浊液经虹吸进一步去除清水,收集底部泥沙置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重,称量得到泥沙质量,据此计算水流含沙量。每组工况重复 3 次,累计完成 180 场有效试验。

1.4 试验坡度、流量与坡长设计

根据研究区夏季降雨的径流特征,试验设计 $1\text{ L}/\text{min}$ ($0.000\ 17\text{ m}^3/\text{s}$)、 $2\text{ L}/\text{min}$ ($0.000\ 33\text{ m}^3/\text{s}$) 和 $4\text{ L}/\text{min}$ ($0.000\ 67\text{ m}^3/\text{s}$) 3 个流量梯度,以覆盖该地区常见地表径流强度范围。坡度设置涵盖 8.75% (5°)、 17.63% (10°)、 26.80% (15°)、 36.40% (20°) 和 46.63% (25°) 5 个梯度,基本反映高寒地区典型坡面坡度变化范围。为系统捕捉细沟发育过程中输沙能力沿程变化特征,坡长设置为 0.5、1、2、3、4、5、6、7、8 m 共 9 个梯度。

试验分别在未冻土和冻融后土槽中进行,每种坡度-流量组合均重复 3 次,共计完成 180 场冲刷试

验。该设计能够有效揭示不同水力条件下冻融作用对细沟输沙能力的影响。

1.5 指标计算

1.5.1 泥沙含量 含沙量指水体单位体积中所含悬移质的泥沙重量,通过可调节水泵设定流量,给定不同流量与坡度,将稳流槽置于指定坡长处,待水流含沙量稳定后,在土槽出水口处接取 5 个泥沙样品,烘干后取其平均质量,随后再计算含沙量,计算公式^[21]:

$$C = \frac{m_s}{m_1/\rho + m_2/\rho_0} \quad (1)$$

式中: C 为水流含沙量, kg/m^3 ; m_s 为泥沙的质量, g ; m_1 为水质量, g ; ρ 为水密度, g/m^3 ; m_2 为土壤颗粒的质量, g ; ρ_0 为土壤颗粒密度,取 $2.65\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

1.5.2 输沙能力 水流的输沙能力可用含沙量达到饱和时细沟流携带的最大输沙量表示^[22],与最大含沙量成一定比例,即:

$$T_c = Aq \quad (2)$$

式中: T_c 为细沟水流的输沙能力, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; q 为单宽流量, m^2/s ; A 为各坡长下水流所含最大含沙量, kg/m^3 。

冻融作用导致输沙能力提升百分比计算公式为:

$$\Delta T_c = \frac{T_{cf} - T_c}{T_c} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ΔT_c 为冻融作用导致输沙能力提升百分比, $\%$; T_{cf} 为冻融后细沟输沙能力, kg/m^3 ; T_c 为未冻融条件下细沟输沙能力, kg/m^3 。

1.5.3 临界坡长的计算原理 细沟侵蚀中,已有研究^[23]表明水流含沙量与细沟沟长有较好的指数关系。

$$C = A(1 - e^{-BX}) \quad (4)$$

式中: C 为水流含沙量, kg/m^3 ; e 为自然对数; B 为细沟侵蚀衰减系数,通过各坡长下含沙量与最大含沙量拟合可得; X 为沟长, m 。

当最大含沙量与含沙量的极限值相差很小,取差值相差 $\leq 5\%$ 时,认为此时的沟长即为临界沟长。计算公式为:

$$\frac{A - \lim_{x \rightarrow \infty} c}{\lim_{x \rightarrow \infty} c} \leq 5\% \quad (5)$$

将公式(4)代入公式(5)中得:

$$\frac{A - \lim_{x \rightarrow \infty} A(1 - e^{-BX})}{\lim_{x \rightarrow \infty} A(1 - e^{-BX})} \leq 0.05 \quad (6)$$

化简,

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [(1 - e^{-BX})^{-1} - 1] \leq 0.05 \quad (7)$$

$$\ln(1 - e^{-BX}) \geq \ln 0.9524 \quad (8)$$

$$e^{-BX} \leq 0.0476 \quad (9)$$

取自然对数可得:

$$X \geq \frac{3.0445}{B} \quad (10)$$

为了方便计算,使

$$X = \frac{3.0445}{B} \quad (11)$$

当坡长 X 满足公式(11)条件,此时该坡长为临界坡长, m 。

1.5.4 检验指标

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \times 100\% \quad (12)$$

$$RE = \frac{O_i - P_i}{O_i} \times 100\% \quad (13)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

式中:RE为模型相对误差;MARE为模型相对误差绝对平均值;NSE为模型效率系数; \bar{O} 为实测的输沙能力平均值; n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 细沟水流含沙量变化特征

从最大含沙量的变化(图2、表2)来看,未冻融条件下,在1 L/min流量时,各坡度下的最大含沙量为74.53~208.19 kg/m³;随着流量增加至2、4 L/min,含沙量分别上升至115.11~221.17、130.82~237.58 kg/m³,表明增大流量显著增强水流的剥蚀与搬运能力。冻融条件下的含沙量整体更高,1 L/min时为98.41~209.70 kg/m³,2 L/min时为121.63~221.72 kg/m³,4 L/min时进一步增至143.67~245.93 kg/m³。相同水力条件下,冻融后细沟的水流含沙量均高于未冻融状态,说明冻融作用通过破坏土壤结构、降低抗剪强度,显著促进土壤颗粒的剥蚀与输移。

在细沟输沙过程中,水流动能主要用于剥蚀和搬运土壤颗粒。由图2可知,随着沟长增加,水流含沙量迅速上升,是由于水流进入沟道初始阶段水流动能集中用于剥蚀土壤颗粒,含沙量急剧增加。随着坡长进一步延伸,含沙量持续累积,用于剥蚀的动能逐渐减少,同时水流的搬运能力逐渐趋近于上限,最终含沙量趋于稳定。根据现有研究标准,当含沙量变化幅度稳定在极限值的5%以内时,可认为细沟水流达到输沙能力,此时对应的沟长定义为临界沟长^[24]。表1数据显示,未冻融条件下细沟的临界沟长为6.8~8.1 m,且在相同流量下,坡度越大,含沙量达到稳定所需的临界沟长越短。相比之下,冻融细沟的临界沟长明显缩短,为5.3~6.4 m,并同样表现出坡度增大、临界沟长减小趋势。此差异主要源于冻融作用对土壤结构的破坏,显著降低土壤的抗蚀

性,使水流能够在更短距离内达到其最大输沙能力。

综上,细沟在输沙过程中的含沙量变化与临界沟长受坡度、流量及冻融作用的共同影响。坡度和流量主要通过改变水流动能影响剥蚀与搬运效率,而冻融作用则通过改变土壤结构特性、削弱土壤抗蚀能力,从而显著增强细沟水流的输沙强度并缩短其达到输沙能力所需的临界沟长。

2.2 细沟水流输沙能力随流量变化特征

由图3可知,冻融前各坡度条件下细沟输沙能力均随流量增大呈线性增长趋势。随着坡度由5°增至25°,拟合线性方程的斜率依次为149.35、164.55、167.06、209.78、260.00,表明坡度越陡,流量对输沙能力的影响越强(表3)。经冻融作用后,输沙能力仍保持与流量的线性关系,对应坡度下的斜率分别为160.00(5°)、181.57(10°)、206.33(15°)、233.77(20°)和248.50(25°),坡度增大可强化流量对输沙能力的影响。

对比冻融前后斜率变化发现,在坡度<20°时,冻融后方程斜率均大于冻融前,说明冻融作用在该坡度范围内增强流量对输沙能力的影响程度;而在25°坡度下,冻融前斜率(260.00)高于冻融后(248.50),反映此时冻融前流量对输沙能力的影响更为显著。上述结果表明,坡度20°左右为冻融作用影响流量-输沙能力关系的转折点,反映出坡度与冻融作用在调控输沙响应方面存在交互效应。

2.3 细沟水流输沙能力随坡度变化特征

由图4、表4数据可知,细沟输沙能力在冻融前后均随坡度增大而提升,但二者的增长模式呈显著差异。冻融前,输沙能力随坡度呈指数增长,拟合关系为 $T_c = ae^{(S/b)}$,表明坡度对输沙能力具有持续增强的促进作用;冻融后,输沙能力与坡度间转为幂函数关系,表达式为 $T_c = aS^b$,其增长速率随坡度增加逐渐减缓,反映出冻融作用削弱坡度对输沙能力的增强效应。

上述关系从指数型向幂函数型的转变,揭示冻融作用对坡度影响机制的根本改变。在未冻融条件下,土壤结构完整、抗剪强度较高,坡度增大直接且有效地转化为水流剪切力的提升,从而对输沙能力产生持续增强的驱动作用,表现为指数增长。然而,经冻融作用后,土壤团聚体结构被破坏、孔隙度增加、抗蚀性显著降低,使得即使在较小坡度下,土壤也易于被剥蚀和搬运。此时,坡度增大的影响效应减弱,水流输沙能力更早地趋近于由土壤性质所决定的上限,从而导致增长模式转为先快后缓的幂函数形式。实质上是冻融作用削弱坡度在侵蚀过程中的主导地位,使得土壤自身性质的改变成为控制输沙能力的关键因子。

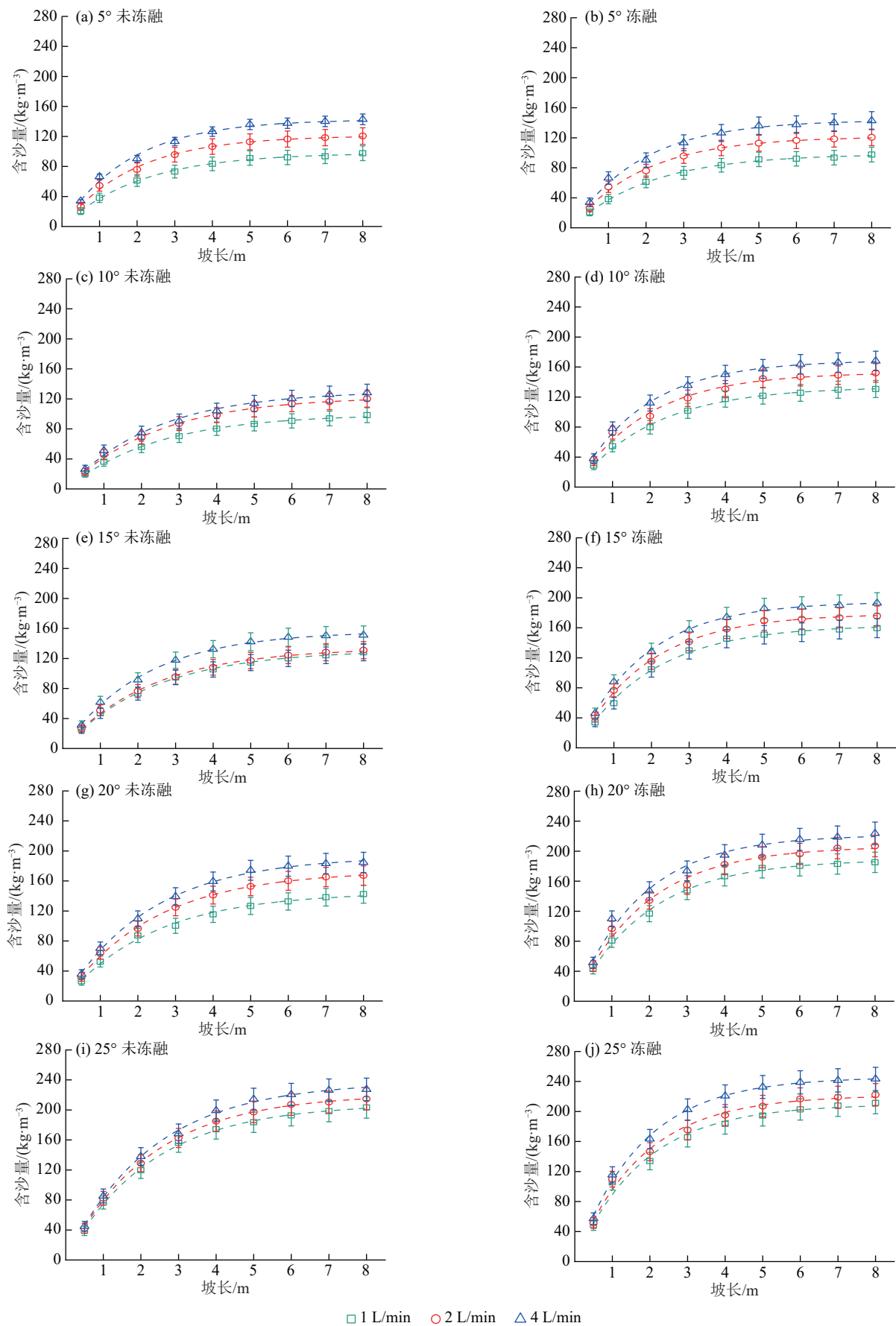


图 2 不同坡度下含沙量随坡长变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of sediment concentration with slope length under different slope gradients

表 2 估算临界坡长及输沙能力
Table 2 Estimation of critical slope length and sediment transport capacity

流量/ (L·min ⁻¹)	坡度/(°)	A/ (kg·m ⁻³)	T _c / (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	B ₁	X ₁ /m	A _f / (kg·m ⁻³)	T _{cf} / (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	B ₂	X ₂ /m
1	5	74.53	0.013	0.378	8.1	98.41	0.017	0.477	6.4
	10	99.58	0.017	0.418	7.3	133.78	0.022	0.485	6.3
	15	131.41	0.022	0.417	7.3	163.85	0.028	0.499	6.1
	20	145.06	0.025	0.422	7.2	188.97	0.032	0.517	5.9
	25	208.19	0.035	0.443	6.9	209.70	0.036	0.556	5.5
2	5	115.11	0.038	0.386	7.9	121.63	0.040	0.523	5.8
	10	123.15	0.041	0.414	7.4	152.85	0.050	0.526	5.8
	15	134.14	0.044	0.429	7.1	178.81	0.059	0.535	5.7
	20	173.53	0.057	0.423	7.2	206.59	0.068	0.532	5.7
	25	221.17	0.073	0.446	6.8	221.72	0.073	0.567	5.4
4	5	130.82	0.088	0.405	7.5	143.67	0.096	0.539	5.6
	10	147.23	0.099	0.424	7.2	169.01	0.113	0.557	5.5
	15	156.48	0.106	0.465	6.5	194.96	0.131	0.558	5.5
	20	193.05	0.129	0.433	7.0	221.97	0.149	0.564	5.4
	25	237.58	0.159	0.435	7.0	245.93	0.165	0.576	5.3

注:A、T_c、B₁、X₁分别为未冻融条件下实测最大含沙量、细沟输沙能力、衰减系数、细沟输沙临界沟长;A_f、T_{cf}、B₂、X₂分别为冻融条件下实测最大含沙量、细沟输沙能力、衰减系数、细沟输沙临界沟长。

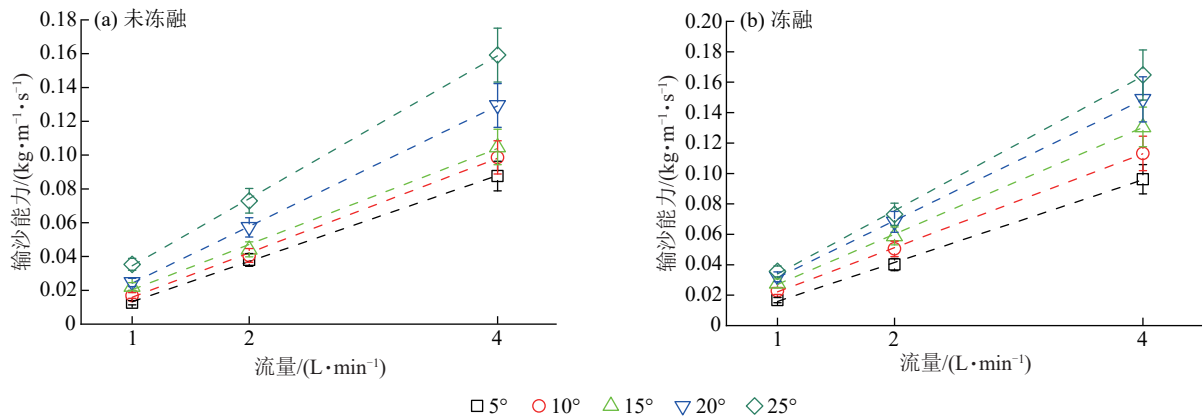


图 3 输沙能力随流量变化趋势

Fig. 3 Variation trend of sediment transport capacity with discharge

表 3 不同坡度下细沟输沙能力经验方程

Table 3 Empirical equations of rill sediment transport capacity under different slope gradients

组别	坡度/(°)	回归方程	R ²	p
未冻融	5	T _c =149.35q-0.012	0.99	0.01
	10	T _c =164.55q-0.012	0.99	0.01
	15	T _c =167.06q-0.008	0.99	0.01
	20	T _c =209.78q-0.011	0.99	0.01
	25	T _c =260.00q-0.008	0.99	0.01
冻融	5	T _c =160.00q-0.011	0.99	0.01
	10	T _c =181.57q-0.009	0.99	0.01
	15	T _c =206.33q-0.008	0.99	0.01
	20	T _c =233.77q-0.008	0.99	0.01
	25	T _c =248.50q-0.010	0.99	0.01

2.4 冻融作用对输沙能力的影响

冻融作用改变细沟的输沙特性,使土壤颗粒更

易被剥蚀,从而影响水流输沙能力。试验数据(图 5)显示,在不同流量与坡度组合下,冻融作用可使输沙能力最高提升 34.34%。此影响呈明显的流量和坡度依赖性。随着流量从 1 L/min 增加到 4 L/min,冻融作用对输沙能力的提升幅度从 24.41%±12.27% 逐渐降低到 13.54%±6.93%,表明高流量条件下冻融作用的相对影响减小;在坡度方面,提升幅度随坡度变化呈现先增后减的趋势,从 5° 时的 15.84%±11.58% 增加到 15° 时的 27.53%±4.08%,随后在 20° 和 25° 时分别降至 21.43%±6.47% 和 1.50%±1.44%。该变化表明,15° 是冻融作用影响细沟侵蚀输沙的关键转折点,超过该坡度后其影响逐渐减弱。冻融作用对细沟输沙能力的提升在低流量、中等坡度(10°~20°)条件下较为明显。

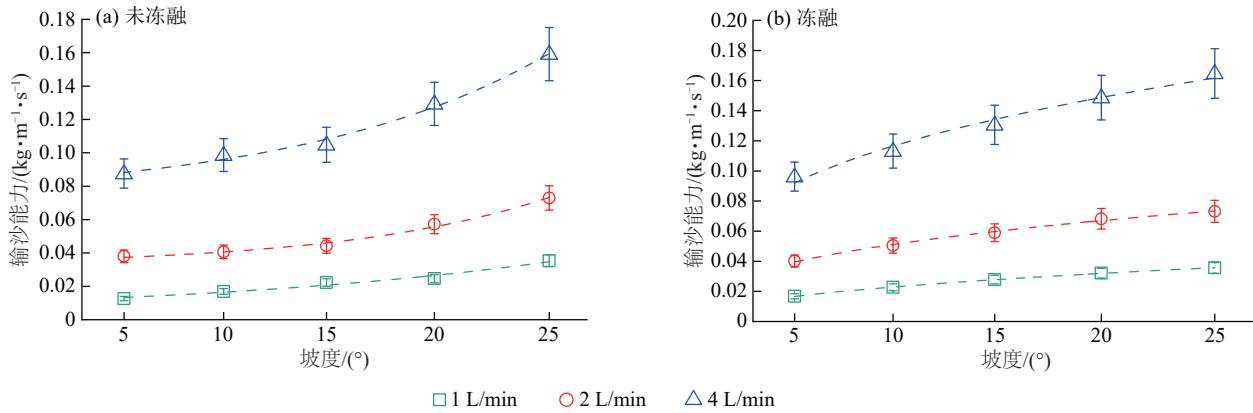


图 4 输沙能力随坡度变化趋势

Fig. 4 Variation trend of sediment transport capacity with slope gradient

表 4 不同流量下细沟输沙能力经验方程

Table 4 Empirical equations of rill sediment transport capacity under different discharges

组别	流量/(L·min ⁻¹)	回归方程	R ²	p
未冻融	1	$T_c=0.0087e^{(S/35.1555)}+0.0022$	0.99	0.01
	2	$T_c=0.0032e^{(S/18.1602)}+0.0323$	0.99	0.01
	4	$T_c=0.0108e^{(S/22.3190)}+0.0723$	0.99	0.01
冻融	1	$T_c=0.0062S^{0.4566}$	0.99	0.01
	2	$T_c=0.0177S^{0.3710}$	0.99	0.01
	4	$T_c=0.0444S^{0.3367}$	0.98	0.01

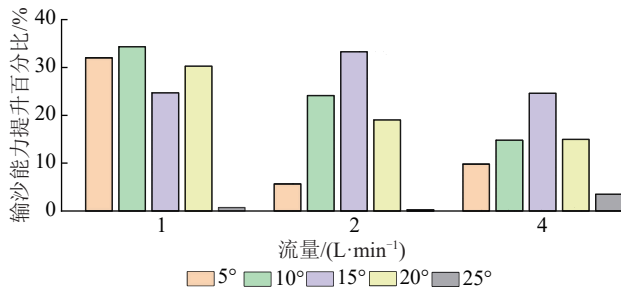


图 5 冻融作用导致输沙能力提升

Fig. 5 Enhancement of sediment transport capacity caused by freeze-thaw action

2.5 输沙能力因子模型

综上所述,冻融前后细沟水流输沙能力均与坡度和流量呈显著关系,且受二者交互影响。因此,为进一步研究二者对细沟水流输沙能力的影响,本文建立输沙能力与坡度及流量组合下的因子模型为:

未冻融因子模型 $T_c = -0.0414 + 0.1101S + 192.5q$ $R^2 = 0.96$

冻融因子模型 $T_c = -0.0398 + 0.1077S + 213.2q$ $R^2 = 0.96$

本研究采用流量和坡度作为关键因子,通过二元线性方程对高寒土冻融前后的细沟侵蚀输沙能力进行预测。与以往研究^[25]普遍采用的二元幂函数模型不同,本研究选择与LEI模型一致的线性结构,此差异主要源于试验条件、土壤质地及体积质量等参数的不同。

3 讨论

3.1 模型适用性探讨

为验证本文构建输沙能力因子模型的合理性与适用性,选取以往研究中的模型进行对比分析。由于所选对比模型均基于未冻融条件,因此,最终采用本文构建的未冻融输沙能力因子模型与其他模型进行比较。误差分析结果(表5)表明,YU模型的预测值与实测值最为接近,因为研究土壤均为高寒土,且试验工况设置一致,但其研究采用的是低体积质量土壤,而本试验采用高体积质量土壤,导致输沙能力随坡度变化的规律存在明显差异(图6),在YU模型^[15]研究中,输沙能力随坡度增加呈先快速上升后趋于平缓的特征,转折点出现在15°左右。相比之下,本研究发现,高体积质量土壤条件下的输沙能力变化呈不同的特征,在低坡度(<15°)阶段,由于土壤抗剪强度较高,水流动能不足以有效剥蚀土壤颗粒,输沙能力增长缓慢;当坡度超过15°后,水流动能增强显著提高土壤剥蚀效率,输沙能力呈快速上升趋势;理论上当坡度继续增大至25°以上时,输沙能力增长逐渐放缓,但由于试验条件限制,该阶段未能进行实测验证。

造成此类差异的根本原因在于土壤体积质量对侵蚀过程的双重影响机制。低体积质量土壤因其疏松结构更易被水流分散,在坡度增加初期即可表现出较强的输沙能力;而高体积质量土壤由于颗粒间黏结力强,

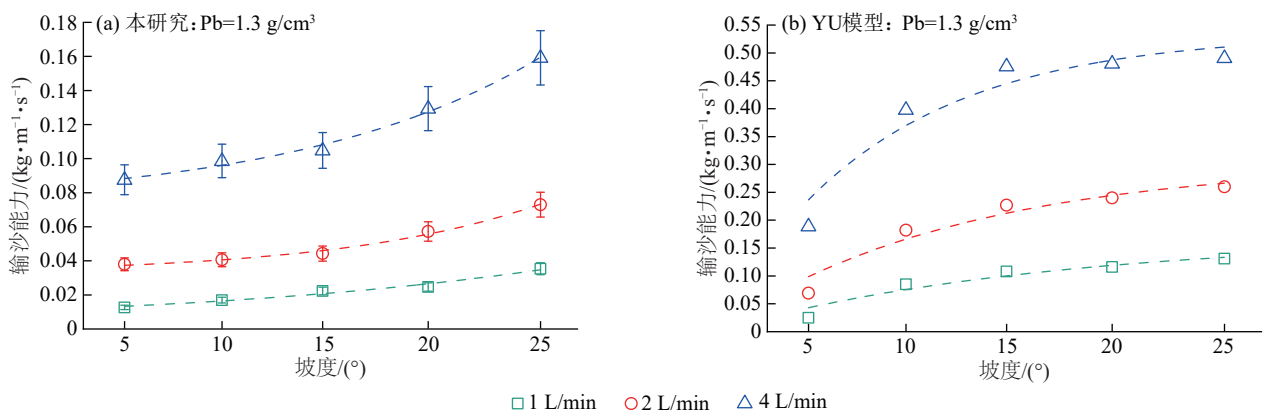
需要更大的水流剪切力才能启动侵蚀过程。表明在构建细沟侵蚀输沙能力预测模型时,必须充分考虑土壤体积质量等物理性质的关键影响,并根据不同土壤条

件选择适当的模型结构。本研究采用的二元线性模型在高体积质量土壤条件下表现出良好的适用性,为高寒地区侵蚀预测提供新的理论依据。

表 5 各输沙能力因子模型误差评价

Table 5 Error evaluation of sediment transport capacity factor models

模型	方程	试验用土	填土体积质量/(g·cm ⁻³)	RE/%	MARE/%	R ²	NSE
ANSWERS	$T_c=146 S q^{0.5}(q \leq 0.046)$ $T_c=1460 S q^2(q > 0.046)$	农田土	1.2	-2.6~2.7	13.54	0.59	-35.2
LEI	$T_c=-0.3109+0.01718 S+0.12703 q$	黄土	1.2	-6.0~8.5	2.08	0.88	-3.1
GAO	$T_c=2746.18 S 0.617 q 1.054$	崩积体	1.4	-5.3~-2.0	4.02	0.94	-4.4
YU	$T_c=1697.83 S 0.491 q 1.043$	高寒土	1.1	-4.0~-1.8	3.05	0.96	-2.2
本研究	$T_c=-0.0414+0.1101 S+192.5 q$	高寒土	1.3	-0.25~0.37	0.04	0.96	0.96



注:YU模型数据引自文献[15],因原文未给出重复测定数据,图中未显示误差棒。

图 6 本文与 Yu 模型输沙能力随坡度变化趋势

Fig. 6 Comparison of variation trend of sediment transport capacity with slope gradient between this study and Yu model

GAO模型^[26]同样适用于高寒土输沙能力预测。虽然 GAO 模型研究的崩积体土壤体积质量与本试验接近,但其采用的流量条件远高于本试验。较高流量带来的水流动能增强,使得即使在高体积质量条件下,土壤也能被有效剥蚀搬运。LEI模型因其采用的黄土与本研究高寒土在黏粒和粉粒含量上较为接近(分别为 80% 和 70%),且试验坡度和流量条件基本一致,因此,也表现出较好的预测效果(R²=0.88)。相比之下,ANSWERS模型^[27]的预测效果最不理想,表明该国外模型在藏东南高寒土坡面细沟输沙能力预测中的适用性仍需进一步验证。

3.2 冻融作用对细沟输沙能力的影响

冻融作用是高海拔寒区土壤侵蚀过程中的关键驱动因素^[28-29]。其冻胀效应直接破坏土壤结构,表现为颗粒破碎、孔隙度增大及抗剪强度降低^[30],最终显著提升土壤可蚀性^[31]。本研究数据显示,冻融作用使土壤体积质量降低 5.0%,孔隙度增加 0.5%,黏聚力下降 27.1%;同时引起砂粒含量减少,粉粒与黏粒比例上升。该结构变化导致土壤团聚体稳定性减弱、颗粒间黏结力丧失,从而更易被水流剥离与输移,土壤可蚀性(K 因子)约提高 6%。在细

沟侵蚀下,冻融作用并不直接改变水流的固有输沙能力,而是通过降低土壤抗蚀性,促使相同水力条件下水流更快达到其输沙能力上限,在观测中表现为输沙能力的数值上升。进一步研究发现,冻融对输沙能力的提升效应随流量增大而减弱,其提升幅度由 24.41%±12.27% 降至 13.54%±6.93%。此现象反映在不同水能条件下冻融作用的差异化影响,低流量时,冻融引起的结构弱化主导侵蚀过程,增强效应显著;高流量时,水流自身动力已足以有效剥离和输移土壤,冻融的附加作用因而被部分“掩盖”^[32-33]。

冻融细沟中,输沙能力随坡度变化趋势与未冻融细沟具有差异。细沟未经冻融前,输沙能力随着坡度的增加不断增强,而冻融细沟中,输沙能力在坡度增加初期急剧上升,而超过 15°后,输沙能力上升缓慢。未冻融细沟随坡度的变化趋势在上文已经进行阐述,而经冻融作用后,土壤结构破坏,更易被冲刷,随坡度的变化趋势与低体积质量高寒土输沙能力随坡度变化趋势相似,也印证高寒土细沟输沙能力的一般性规律。在上文中发现,随着坡度提升,冻融作用对输沙能力的提升呈先上升后降低趋势,15°时为冻融

作用对输沙能力提升的峰值(27.53%±4.08%),表明15°左右坡度为冻融作用对细沟侵蚀影响的关键阈值,但由于本次试验未进行15°坡度左右坡度的细化试验,临界阈值还需进行更精细化的试验分析。坡度为25°时,冻融作用对输沙能力的提升仅为1.50%±1.44%,也验证在高水流动能条件下,冻融作用对土壤的破坏效应被高水流动能作用掩盖。

结合青藏高原高寒地区相关地形调查资料,该区域典型坡面坡度多集中于10°~25°,其中15°左右坡度为最具代表性的坡级之一^[34]。本研究发现,15°坡度转折点现象,恰好覆盖并适用于该区域最主要的坡度范围。意味着在占区域主体面积的坡面上,冻融作用均显著增强流量对输沙能力的影响(表现为冻融后拟合方程斜率增大)。尽管25°以上坡度在实际地形中占比相对较小,但本研究结果仍可为该类陡坡区域的侵蚀风险评估提供参考。因此,本研究建立的模型及发现的转折点规律,对高寒地区大部分实际坡面的土壤侵蚀模拟与防治具有直接指导价值。

本研究建立的冻融前后输沙能力预测模型均为二元线性结构,但模型系数存在差异。在未冻融模型中,坡度(S)和流量(q)的系数分别为0.110 1、192.5;而冻融后,2个系数分别变为0.107 7、213.2,表明冻融前后细沟输沙能力均主要受流量影响(q 系数始终大于 S 系数);而冻融作用使坡度对输沙能力的影响减弱(S 系数下降),同时增强流量对输沙能力的影响(q 系数上升)。该发现表明,在高寒区土壤侵蚀预测中,模型须根据实际情况调整参数,在冻融条件下,各水力因子对细沟输沙的影响被改变,导致未冻融区模型不匹配高海拔寒区。

4 结论

1)冻融作用使细沟输沙能力提升0.25%~34.34%,其影响程度呈明显的坡度和流量依赖性。表现为随流量从1 L/min增至4 L/min,提升幅度由24.41%±12.27%递减至13.54%±6.93%;随坡度变化存在15°的临界值,提升幅度呈单峰变化,5°、15°、25°分别为15.84%±11.58%、27.53%±4.08%、1.50%±1.44%。冻融作用同时缩短临界沟长,使未冻融条件下的6.8~8.1 m缩短至5.3~6.4 m,且坡度越大临界沟长越短。

2)冻融前后细沟输沙能力均与流量保持线性关系,但与坡度的关系发生改变,冻融前呈指数增长,冻融后转为幂函数增长。建立的输沙能力预测模型均具有较高精度($R^2=0.96$),未冻融模型为 $T_c=-0.041 4+0.110 1S+192.5q$,冻融模型为 $T_c=-0.039 8+0.107 7S+$

213.2 q 。参数变化显示冻融后流量影响增强(系数192.5→213.2),坡度影响减弱(系数0.110 1→0.107 7)。

3)试验表明填土体积质量、土壤类型和模型构建工况条件共同影响模型预测效果。冻融作用通过改变土壤结构,使高体积质量高寒土的细沟侵蚀输沙规律趋近于未冻融时低体积质量高寒土的细沟侵蚀输沙特征。高寒区工程实践中,需根据冻融状态调整模型参数,尤其要注意15°坡度阈值和流量变化对冻融效应的影响。

参考文献:

- [1] 杨浩宇,马岚,陈仕媛.北方土石山区冻融与水力复合作用对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2024,38(5):92-101. YANG H Y, MA L, CHEN S Y. Effects of freeze-thaw and hydraulic compound action on soil erosion in northern rocky mountainous area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 92-101.
- [2] 邢行.饱和与非饱和黄绵土细沟侵蚀特征对比研究[D].重庆:西南大学,2019. XING X. Comparative study on rill erosion characteristics of saturated and unsaturated loessial soil [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [3] 冯志珍,郑粉莉,易祎.薄层黑土微生物生物量碳氮对土壤侵蚀-沉积的响应[J].土壤学报,2017,54(6):1332-1344. FENG Z Z, ZHENG F L, YI Y. Responses of microbial biomass carbon and nitrogen to erosion and deposition in black soil thin in depth [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1332-1344.
- [4] 王明智.基于DEM提取地表易侵蚀区:以长春市农安县为例[J].测绘与空间地理信息,2025,48(增刊1):89-91. WANG M Z. Extraction of surface erodible areas based on DEM: A case study of Nongan County, Changchun City [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2025, 48(S1): 89-91.
- [5] 顾朝军,李仁华,姚赫,等.丹江口库区及上游流域土壤侵蚀和养分流失变化[J].人民长江,2025,56(增刊1):1-4. GU C J, LI R H, YAO H, et al. Changes of soil erosion and nutrient loss in Danjiangkou reservoir area and its upper reaches [J]. Yangtze River, 2025, 56(S1): 1-4.
- [6] 熊微微,杨浪浪,岳兴盛.2000—2022年滇中地区土壤侵蚀时空变化研究[J].中国水土保持,2024(7):59-63. XIONG W W, YANG L L, YUE X S. Temporal and spatial changes of soil erosion in central Yunnan region from 2000 to 2022 [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(7): 59-63.
- [7] 李丽.耕作侵蚀和水蚀作用下紫色土坡地土壤有机碳及其组分动态变化研究[D].四川绵阳:西南科技大学,2021. LI L. Dynamic changes of soil organic carbon and its components on sloping land of purple soil under tillage ero-

- sion and water erosion [D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [8] 金鑫, 刘浩楠, 宋颖, 等. 细沟向浅沟发育过程中沟道几何形态特征变化规律研究 [J]. 中国农村水利水电, 2022(12): 8-16.
JIN X, LIU H N, SONG Y, et al. Changes of the channel geometric characteristics during the development of rills to shallow ditches [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(12): 8-16.
- [9] 高双, 贾燕锋, 范昊明, 等. 冻融作用下东北黑土区不同土地利用类型土壤抗冲性研究 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 69-73.
GAO S, JIA Y F, FAN H M, et al. Effect of freezing and thawing on soil anti-scourability under different land use types in the black soil region of northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6): 69-73.
- [10] 申楠. 黄土地区细沟水流分离输沙过程研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
SHEN N. Study on sediment transport process of rill flow separation in loess area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [11] ALONSO C V, NEIBLING W H, FOSTER G R. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling [J]. Transactions of the Asae, 1981, 24(5): 1211-1220.
- [12] NEARING M A, NORTON L D, BULGAKOV D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills [J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865-876.
- [13] ZHANG G H, LIU Y M, HAN Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1291-1297.
- [14] 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1269-1274.
WANG Y, LIU J S, WANG Q Y. The Effects of freeze-thaw processes on soil aggregates and organic carbon [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1269-1274.
- [15] 喻武, 任德智, 张鹏, 等. 藏东南高寒土坡面细沟水流输沙能力变化特征 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 76-82.
YU W, REN D Z, ZHANG P, et al. Variation characteristics of sediment transport capacity of rill flow in alpine soil in southeast Tibet [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 76-82.
- [16] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极 [J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924-931.
YAO T D, CHEN F H, CUI P, et al. From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 924-931.
- [17] 左志强, 李政男, 刘佳诺, 等. 青藏高原冰碛土在冻融循环下强度劣化特性及其微观机制 [J/OL]. 吉林大学学报 (地球科学版), 1-15 [2025-10-31]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20240149>.
- ZUO Z Q, LI Z N, LIU J N, et al. Strength deterioration characteristics and microscopic mechanism of the Tibetan Plateau moraine under freeze-thaw cycle [J/OL]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 1-15. [2025-10-31]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20240149>.
- [18] LI N, CUO L, ZHANG Y X, et al. Diurnal soil freeze-thaw cycles and the factors determining their changes in warming climate in the upper Brahmaputra basin of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2024, 129(20): e2023JD040369.
- [19] 彭大力, 张斌, 吴林蓬, 等. 龙川江流域近 20 年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 29-37.
PENG D L, ZHANG B, WU L P, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River basin in recent 20 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 29-37.
- [20] 牛耀彬. 降雨和上方来水条件下工程堆积体土壤侵蚀特征研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
NIU Y B. Study on soil erosion characteristics of engineering accumulation body under rainfall and water inflow from above [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [21] 张鹏. 藏东南高寒土坡面细沟侵蚀过程研究 [D]. 拉萨: 西藏大学, 2020.
ZHANG P. Study on rill erosion process of alpine soil slope in southeastern Tibet [D]. Lhasa: Tibet University, 2020.
- [22] 丁琳桥. 紫色土细沟侵蚀输沙能力研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2016.
DING L Q. Study on sediment transport capacity of rill erosion in purple soil [D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [23] 王莎, 王占礼, 袁殷, 等. 黄土坡面细沟水流输沙能力变化特征 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 104-107.
WANG S, WANG Z L, YUAN Y, et al. Sediment transport capacity of rill flow on loess hillslope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 104-107.
- [24] 韩珍, 陈晓燕, 李彦海, 等. 近饱和与非饱和土壤细沟水流输沙能力的对比研究 [J]. 山地学报, 2020, 38(6): 841-850.
HAN Z, CHEN X Y, LI Y H, et al. Comparison of sediment transport capacity along rills of partially saturated and non-saturated soils [J]. Mountain Research, 2020, 38(6): 841-850.
- [25] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LEI T W, ZHANG Q W, YAN L J. Physical model of rill erosion [M]. Beijing: Science Press, 2009.

(下转第 109 页)