

冻融条件下土壤侵蚀阻力影响因素

卢超¹, 马周加态¹, 李佳辉¹, 张宽地^{1,2}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌712100;

2.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌712100)

摘要:为揭示季节性冻融区土壤侵蚀阻力的变化机制,确定影响土壤侵蚀阻力主控因子,通过室内冻融模拟、水槽冲刷和土壤抗剪试验,对黄绵土(SM粉质壤土)、风沙土(WS砂壤土)和黑土(KS黏壤土)侵蚀阻力影响因素进行研究。结果表明:(1)随着冻融循环次数增加,细沟可蚀性值逐渐升高,而临界剪切力降低。经历10次冻融循环后,SM粉质壤土、WS砂壤土和KS黏壤土的细沟可蚀性分别增加76%,63%,11%,临界剪切力分别减小37%,13%,91%。(2)细沟可蚀性随土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角增大而减小,临界剪切力则呈相反趋势。与内摩擦角相比,黏聚力更适合用来表征土壤侵蚀阻力。采用黏聚力对SM粉质壤土、WS砂壤土和KS黏壤土的细沟可蚀性进行预测,决定系数(R^2)分别为0.42,0.78,0.50,平均为0.57;对临界剪切力的预测效果较差,决定系数(R^2)分别为0.16,0.14,0.18,平均仅为0.16。(3)根据皮尔逊相关分析结果,基于土壤的初始含水率、冻融循环次数、力学特性以及土壤参数等分别建立细沟可蚀性($R^2=0.85$)和临界剪切力($R^2=0.79$)预测模型表明,在季节性冻融区冻融循环作用对土壤侵蚀的影响巨大,结果可为各地区水土保持措施优化和土壤侵蚀防治提供参考。

关键词:冻融循环;土壤侵蚀;细沟可蚀性;临界剪切力;土壤性质

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2023)06-0025-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.004

The Factors Influencing Soil Erosion Resistance Under Freeze-thaw Conditions

LU Chao¹, MAZHOU Jiatai¹, LI Jiahui¹, ZHANG Kuandi^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to reveal the change mechanism of soil erosion resistance in seasonal freeze-thaw region and determine the main controlling factors affecting soil erosion resistance, the Loess soil (SM silty loam), Aeolian sandy soil (WS sandy loam) and Black soil (KS clay loam) were studied by indoor freeze-thaw simulation, flume erosion test and soil shear test. The results showed that: (1) With the increase of freeze-thaw cycles, the value of rill erodibility gradually increased, while the critical shear stress decreased. After ten freeze-thaw cycles, the rill erodibility of SM silty loam, WS sandy loam and KS clay loam increased by 76%, 63% and 11%, respectively, and the critical shear stress decreased by 37%, 13% and 91%, respectively. (2) Rill erodibility decreased with the increase of soil shear strength, cohesion and internal friction angle, while the critical shear stress showed the opposite trend. Compared with the internal friction angle, cohesion was more suitable to characterize soil erosion resistance. The rill erodibility of SM silty loam, WS sandy loam and KS clay loam was predicted by cohesion, and the determination coefficients R^2 were 0.42, 0.78 and 0.50, respectively, with an average of 0.57. The prediction effect on the critical shear stress was poor, and R^2 were 0.16, 0.14 and 0.18, respectively, with an average of only 0.16. (3) According to the results of Pearson correlation analysis, the prediction models of rill erodibility ($R^2=0.85$) and critical shear stress ($R^2=0.79$) were established based on initial soil moisture content, freeze-thaw cycles, mechanical properties and soil parameters, respectively. Studies have shown that the effects of freeze-thaw cycles on soil

收稿日期:2023-04-07

资助项目:国家自然科学基金项目(52179079,41877076);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(F2010121002-202311,F2010121002-202319);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022HHZX003)

第一作者:卢超(1995—),男,新疆伊犁人,硕士研究生,主要从事水土保持及土壤侵蚀研究。E-mail:2350031627@nwafu.edu.cn

通信作者:张宽地(1978—),男,宁夏隆德人,教授,博士,博士生导师,主要从事流域生态修复及水沙调控研究。E-mail:zhangkuandi428@126.com

erosion are enormous in areas with seasonal freeze-thaw region. The findings can serve as a reference for optimizing soil and water conservation practices and controlling soil erosion across different regions.

Keywords: freeze-thaw cycles; soil erosion; rill erodibility; critical shear stress; soil properties

水土流失被广泛认为是由人类活动和农业实践造成的环境问题,严重制约着世界各国的环境保护以及经济可持续发展^[1-2]。土壤侵蚀阻力(细沟可蚀性参数 K_r 和临界剪切力 τ_c)是 WEPP(water erosion prediction project)模型中的关键参数,其中,细沟可蚀性(K_r)表征对外界侵蚀破坏的敏感程度,是土壤自身抵抗外界侵蚀破坏的固有属性,临界剪切力(τ_c)是土壤抵抗坡面流侵蚀破坏的临界值,通常与土壤初始含水率、冻融循环次数及粒径级配等息息相关。因此,研究土壤侵蚀阻力并建立相应的土壤侵蚀预测模型是了解土壤侵蚀机理、指导优化水土保持措施的重要工具^[3]。

目前,关于土壤侵蚀阻力的研究多集中在非冻融条件下,且学者们^[4-6]大多认为与土壤的质地、土壤抗剪强度、容重以及初始含水率等密切相关。Zhang 等^[7]研究结果证实,土壤抵抗侵蚀破坏能力主要由土壤黏粒含量、中值粒径和黏聚力决定;Lado 等^[8]的研究得到相同结论,并将其归因于黏粒在土壤中的胶结作用;Gilley 等^[6]通过研究美国不同农业用地土壤侵蚀阻力,提出用黏粒含量、初始含水率、有机质等来表示临界剪切力。然而,也有研究^[9-10]发现,临界剪切力与土壤的理化性质之间不存在相关性。近年来,一些学者^[11-12]主张将土壤力学特性与土壤侵蚀阻力研究联系起来,认为土壤抗剪强度可以综合反映土壤对外界侵蚀动力的响应规律。已有研究^[13]发现,土壤发生侵蚀时,临界剪切力可以用土壤的力学性质指标来进行表征。此外,孙宝洋^[14]进一步研究提出,影响土壤细沟可蚀性的因素也会影响土壤临界剪切力。但是,关于土壤力学特性与土壤侵蚀阻力相结合的研究仍然较为匮乏,需要更进一步探索。

随着全球气候变暖,冻融循环作用对土壤侵蚀阻

力的影响逐渐引起学者们关注^[15-16]。冻融侵蚀破坏实际上是由于土壤中水分在昼融夜冻的自然条件下反复冻胀造成的,土壤表层中水分形态和体积的反复变化不可避免引起土壤理化特性改变^[17-18]。除含水率外,Henry^[19]还指出,冻融循环次数、土壤容重、冻融循环温度等也是引起土壤理化特性改变的主要因素。在初春解冻期,土壤黏聚力、抗剪强度、质地和结构等均随着冻融循环次数增加发生不同程度的降低,使得土壤颗粒更容易从基质上脱离,加剧土壤侵蚀^[16,20]。而细沟可蚀性和临界剪切力是体现土壤在侵蚀过程中抵抗外营力侵蚀破坏的综合指标,不仅是建立土壤侵蚀预测模型的关键参数,而且也是认识坡面水蚀破坏的基础。但目前关于冻融条件下土壤侵蚀阻力的研究较少涉及,急需进一步开展相关研究。

综上所述,通过开展室内冻融模拟试验、水槽冲刷试验及抗剪强度试验,旨在厘清冻融作用下土壤侵蚀阻力的变化机制,确定影响土壤侵蚀阻力的主控因子,探究冻融循环次数和初始含水率对土壤侵蚀阻力的影响,研究土壤侵蚀阻力与土壤力学特性的响应关系,确定影响土壤侵蚀阻力的主导因素,并建立相应的预测模型。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

试验于 2022 年 3 月 6 日至 7 月 12 日在西北农林科技大学水工大厅完成。使用的黄绵土(SM 粉质壤土)、风沙土(WS 砂壤土)和黑土(KS 黏壤土)分别采自陕西省神木市(110°31' E, 38°50' N)、新疆乌鲁木齐市(88°30' E, 43°30' N)和黑龙江省克山地区(125°50' E, 48°05' N)。3 种土壤分布广泛并且受人类活动影响巨大,3 种土壤粒径分布见表 1。

表 1 不同类型土壤对应的特征参数

土壤类型	简称	d_{50} /mm	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	SMC/%	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
粉质壤土	SM	0.095	19.36	66.22	14.42	4~20	1.36
砂壤土	WS	0.160	5.71	34.84	59.45	4~20	1.40
黏壤土	KS	0.014	40.60	48.70	10.70	15~35	1.20

注: d_{50} 为中值粒径(mm);SMC 为土壤含水率(%); ρ 为土壤密度(g/cm³)。

1.2 试验设计及土样制备

通过进行野外实地观测,分析各地区在中国气象数据网上的资料,同时结合前人设计的试验方案,采用水工低温循环模拟箱(DWS410-S,重庆颢源环境试验设备有限公司)模拟土壤昼融夜冻自然现象,3 种土壤处理冻融温差控制在 25 °C 左右(冻结温度为

-15~0 °C,融化温度为 0~10 °C,冻结与融化的时间分别为 12 h),其中 0 个冻融循环作为对照组未经历冻融破坏,旨在研究冻融循环次数、土壤参数、初始含水率、土壤力学特性对土壤侵蚀阻力的影响作用。试验土样容重皆按照表 1 容重配置,设置参数见表 2。所有试验均进行 3 次重复。

将筛分过的土壤放入烘箱以105℃进行烘干处理,以保证土含水率都为0。当土壤自然冷却后,将一定质量土壤放入泡沫箱(长50 cm,宽30 cm,深20 cm)中,根据设计的含水率用雾化器将水喷洒到土壤表面的同时进行拌匀处理。当土壤水分湿润到指定含水率后,为保证土壤中水分均匀分布和避免水分蒸发需进行密封处理,将密封后的土样放在室温下静置24 h。然后按照设计容重将配置好含水率的土壤装填在直径为10 cm,高度为5 cm的铝制土样

盒中,并采用多功能电动击实仪(LD140-II,南京通达交通工程仪器有限公司)进行夯实处理,用刮刀去除多余部分土壤,保证土壤表面与土样盒齐平。然后进行称重处理,并用保鲜膜将土样盒密封后放入水工低温循环模拟箱(DWS410-S,重庆颤源环境试验设备有限公司)进行冻融循环处理,以减少冻融过程中土壤水分蒸发。土样盒底部设有若干小孔以保证其透气性。装样前土样盒底部放置滤网以避免小孔被土壤堵塞。

表2 试验设计方案

因素	SM粉质壤土	WS砂壤土	KS黏壤土
冻融循环次数/次	0,1,5,10	0,1,5,10	0,1,5,10
初始含水率/%	4,8,12,16,20	4,8,12,16,20	15,20,25,30,35
坡度/(°)	8	8	8
流量/(L·min ⁻¹)	2,6,10,14,18	2,6,10,14,18	2,6,10,14,18
法向应力/kPa	50,100,150,200	50,100,150,200	50,100,150,200

1.3 室内水槽冲刷试验

(1)水力参数测量。试验过程中所需流量大小由蠕动泵控制,试验前采用称重法^[14]进行率定,重复3次,误差<5%视为流量稳定。冲刷试验装置由水箱、稳水装置、冲刷水槽和收集装置组成(图1)。水箱和稳水装置中间由带孔有机玻璃隔开,清水被泵入水箱,经过稳流装置后再溢流到冲刷水槽,保证消除径流紊流。冲刷水槽为矩形结构,尺寸为4.8 m×0.15 m×0.10 m(长×宽×深),距离水槽出口30 cm处设置土样室用于放置土样。水槽由有机玻璃制成的,其坡度可以在0~42%范围内进行调节。在不同水力条件下用高锰酸钾染色法测定水流表面流速^[21-22],在距水槽出口上游2 m处设置观测断面。在水槽左侧、中央和右侧分别采用示踪溶液(KMnO₄)测量表面流速,同时记录示踪溶液通过2 m距离花费的时间,最后计算表面流速测量值的平均值作为试验所需的表面流速。为观测试验过程中水流温度需将水温计置入稳水装置,记录下各组冲刷试验时的水温,通过计算雷诺数和弗罗德数来判别水流流型流态。将表面流速乘以0.7(过渡流)或0.8(湍流)获得平均流速^[21-22]。根据实测的基本水力参数计算水流切应力^[23-24],计算公式为:

$$h = \frac{q}{u} \quad (1)$$

式中: q 为单宽流量(m²/s); h 为平均水深(m); u 为平均流速(m/s)。

$$\tau = \gamma R J \quad (2)$$

式中: τ 为剪切应力(Pa); J 为水力坡度(°), $J = \sin \theta$, θ 为水槽坡度; R 为水力半径(m); γ 为水容重(kN/m³)。

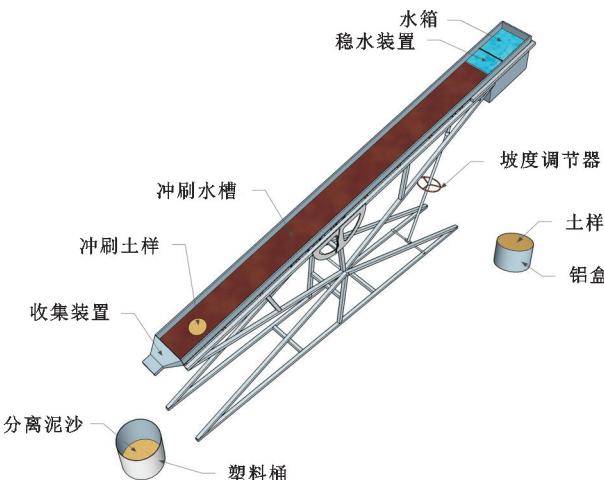


图1 室内冲刷水槽模型示意

(2)土壤分离能力测量。将土样放置于距离水槽出口30 cm的土样室中(图1),土样表面与槽床表面保持同一平面。在冲刷试验之前,将水槽坡度和流量调整到所需值,以便在设计水力条件下进行冲刷。调整试验时间,使其冲刷深度不超过2 cm,以减少边缘效应产生不均匀剥离的影响^[7,25]。采用径流桶将冲刷过程分离的泥沙收集起来,结束试验后将径流桶沉淀12 h,然后将清水排出只保留底部含沙混水,放入烘箱在105℃条件下烘干。土壤分离能力(D_c)采用烘干沉积物重量除以土样横截面积和冲刷时间得到,计算公式为^[23-24]:

$$D_c = \frac{W}{At} \quad (3)$$

式中: D_c 为土壤分离能力[kg/(s·m²)]; A 为土壤盒底的投影面积(m²); t 为土样受水流冲刷的时间(s); W 为冲刷过程中剥离泥沙的烘干质量(kg)。

(3)土壤侵蚀阻力计算。水蚀可蚀性参数(K_r)

和临界剪切力(τ_c)作为 WEPP 模型中的重要参数,是反映土壤抵抗坡面水流侵蚀能力的常用参数,故二者通常被称为土壤侵蚀阻力。一般采用土壤分离能力和径流剪切力的线性拟合关系间接来计算土壤细沟可蚀性和临界剪切力,计算公式为:

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad (4)$$

式中: D_c 为土壤分离能力 [$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]; τ 为水流剪切应力 (Pa); τ_c 为临界剪切应力 (Pa); K_r 为土壤可蚀性 (s/m)。当实测土壤分离能力与水流剪切应力相对应时,回归直线斜率为 K_r ,回归直线在 x 轴上截距为 τ_c ,表明当水流剪切力超过水力阈值时土壤发生分离。

1.4 室内抗剪强度试验

土壤抗剪强度采用应变控制直剪仪进行测量,试验操作步骤根据土工试验规程 (GB/T 50123—2019)^[16] 进行。将配置好的试验土样小心完整地放入直剪仪剪切盒,将量力环和百分表读数调至初始位置,试验所需剪切速度控制为 0.8 mm/min,1 组 4 个土样分别施加 50,100,150,200 kPa 法向应力进行剪切,用秒表记录时间,同时观察百分表表盘上的读数进行记录。当百分表的读数出现减小或不变说明土样形变超过 4 mm,即峰值出现,此时土样可视为已被剪断。如百分表读数持续增大始终未出现峰值,则将土样形变达到 6 mm 时视为已剪断。

根据莫尔—库仑理论,抗剪强度指标黏聚力(c)和内摩擦角(φ)计算公式为:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

式中: τ_f 为土壤抗剪强度 (kPa); φ 为土壤内摩擦角 ($^\circ$); σ 为施加的法向应力 (kPa); c 为土壤黏聚力 (kPa)。以土壤的抗剪强度为纵坐标,试验过程中的施加法向应力为横坐标绘制关系曲线,最佳拟合线角度即为土壤内摩擦角(φ);纵坐标上的截距为土壤黏聚力(c)。

由于一组抗剪强度指标(c 和 φ)为土样在 4 个不同法向应力(50,100,150,200 kPa)下进行直剪试验获得的,因此需要根据公式(6)对施加不同法向应力所得的土壤抗剪强度进行加权平均处理,最终得到加权平均抗剪强度^[16]:

$$\tau' = \frac{\sum_{i=1}^4 \tau_{fi} \sigma_i}{\sum_{i=1}^4 \sigma_i} \quad (6)$$

式中: τ' 为土壤的加权平均抗剪强度 (kPa); σ_i 为不同的法向应力 (kPa); τ_{fi} 为不同法向应力所分别对应的土壤抗剪强度 (kPa)。

1.5 数据统计与分析

采用 Origin 2022 软件作图,数据处理和统计分析借助 SPSS 26 软件进行,差异性检验采用最小显著

性差异法。为准确评估已建立的预测模型性能,采用决定系数、相对均方根误差和纳什效率系数等统计参数对回归结果进行评价^[26],计算公式为:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_m)(P_i - P_m)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2} \quad (7)$$

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2} \quad (8)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum (Q_i - P_i)^2}{\sum (Q_i - Q_m)^2} \quad (9)$$

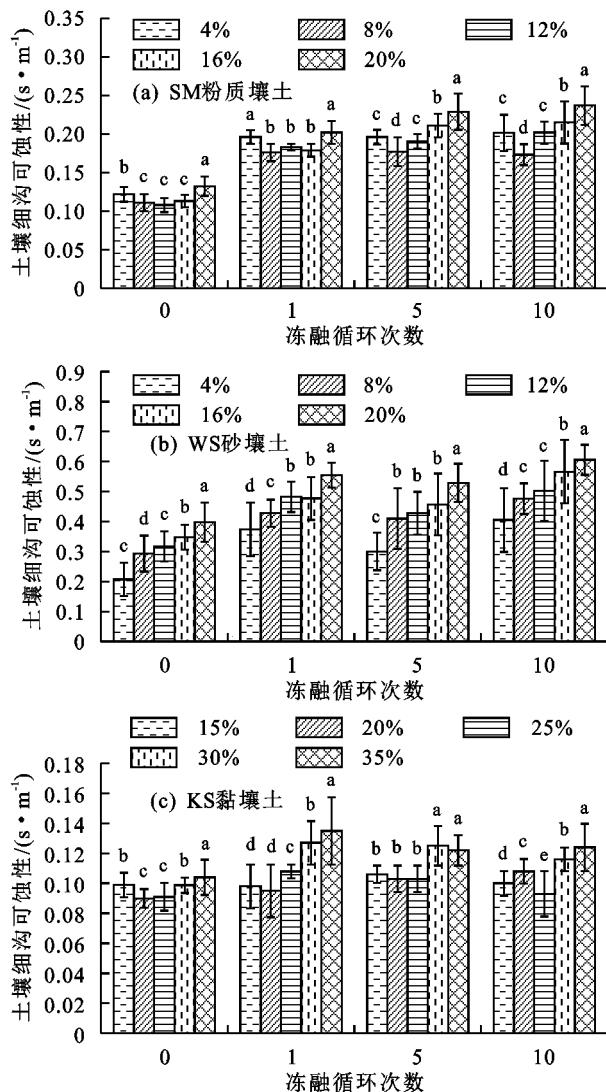
式中: R^2 为决定系数; RRMSE 为相对均方根误差; NSE 为模型的纳什效率系数; n 为样本数; P_i 为土壤侵蚀阻力预测值; P_m 为土壤侵蚀阻力平均预测值; Q_i 为土壤侵蚀阻力实测值; Q_m 为土壤侵蚀阻力平均实测值。

2 结果与分析

2.1 冻融循环次数和初始含水率对土壤侵蚀阻力的影响机制

由图 2 可知,3 种土壤不论初始含水率大小,其细沟可蚀性(K_r)在经历冻融循环后均有不同程度的增大。对照组 0 次冻融时,SM 粉质壤土和 KS 黏壤土的 K_r 随着含水率增大呈现先减小后增大趋势,WS 砂壤土与含水率呈正相关关系。此时 WS 砂壤土平均 K_r (0.313 s/m) > SM 粉质壤土 (0.117 s/m) > KS 黏壤土 (0.097 s/m)。10 次冻融循环后,同对照组相比,SM 粉质壤土、WS 砂壤土和 KS 黏壤土的平均 K_r 分别增大 76%,63%,11%。SM 粉质壤土 K_r 在 5 次冻融循环后趋于稳定;WS 砂壤土 K_r 随冻融循环次数增加而增大,且与含水率呈正相关关系;KS 黏壤土 K_r 在 1 次冻融循环后达到稳定,且含水率在 30% 和 35% 时显著增大。综上所述,3 种土壤 K_r 在不同含水率下的差异性分析表明,在冻融条件下进行 K_r 研究时有必要考虑含水率对不同土壤的影响作用。

由图 3 可知,SM 粉质壤土和 KS 黏壤土的临界剪切力(τ_c)总体上随冻融循环次数增加而减小,且随含水率增大呈现先增大后减小的规律,不同含水率下 τ_c 具有显著差异。其中 SM 粉质壤土在经历 1,5,10 次冻融循环后平均 τ_c 分别为 2.209,1.144,0.860 Pa,与对照组相比,在 1 次冻融循环后 τ_c 增大 61%,5 次和 10 次冻融循环后分别减小 32%,37%,而 KS 黏壤土在经历 1,5,10 次冻融循环后平均 τ_c 分别为 1.005,0.383,0.184 Pa,与对照组相比,分别减小 51%,81%,91%。WS 砂壤土 τ_c 除 1 次冻融循环后有所增大外,在 5 次和 10 次冻融循环后并无明显改变,平均 τ_c 分别为 3.839,2.750,2.332 Pa,且不同含水率下 τ_c 无显著差异。



注:图柱上方不同小写字母表示相同冻融条件下不同初始含水量间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图2 不同含水率下细沟可蚀性与冻融循环次数的关系

土壤抵抗侵蚀破坏能力与砂粒含量成反比,随黏粒含量的增加而增大^[7-8,27]。由于土壤中黏粒作为团聚体形成的重要胶结组分,决定着土壤抗剪强度^[8]。Zhang 等^[7]发现,土壤中值粒径越大,土壤颗粒越容易发生脱离,并认为是由于土壤分离能力与含沙量之间的正相关关系造成的;Geng 等^[27]研究发现,中值粒径越大的土壤更容易发生分离。本研究中,WS 砂壤土平均 K_r ($0.428 s/m$)最大,远高于 SM 粉质壤土($0.178 s/m$)和 KS 黏壤土($0.107 s/m$),与 Su 等^[10]研究结论相同,即风沙土的抗侵蚀能力最差。

随着冻融循环次数增大,3 种土壤 K_r 逐渐增大, τ_c 逐渐减小,并逐渐趋于稳定。是由于土壤未受到冻融侵蚀之前,土体内土壤颗粒、初始含水率、有机质及化学物质等具有强烈的胶结作用,使得土壤颗粒之间具有一定联结力^[8,28]。但经历 1 次冻融循环后,土壤中水分在冻胀及融化过程中改变土壤颗粒原本的排列方式和组

合,土壤结构改变不可避免地削弱土壤颗粒间凝聚作用,并且土壤结构在冻融过程中受到破坏后难以恢复到原始状态^[18,29]。因此,土壤 K_r 和 τ_c 经历 1 次冻融后出现剧烈变化,但随着冻融循环次数增加土壤内部颗粒逐渐达到一种新的动态平衡^[20]。

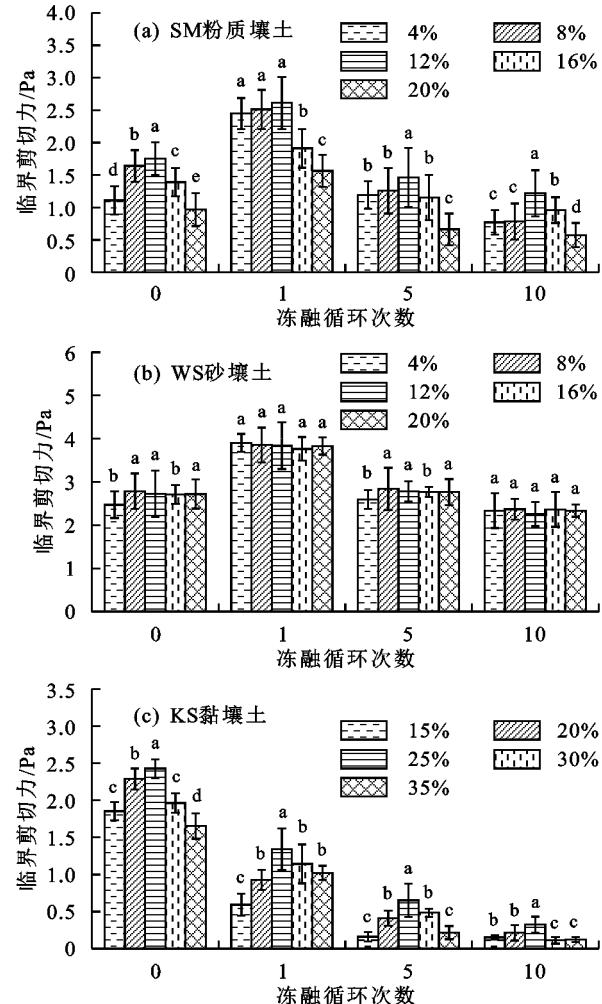


图3 不同含水率下土壤临界剪切力与冻融循环次数的关系

土壤含水率作为时变参数,早已被证明是影响土壤侵蚀的关键因素^[19,30]。有学者^[19]发现,细粒土的土壤分离能力随含水率增大呈先增后减趋势,粗粒土则呈单调增加。表明不同类型土壤对含水率的响应关系不同。当土壤含水率较高时,土壤逐渐软化,土壤颗粒之间的黏结不容易加强,分离作用占据主导地位,最终导致土壤分离能力快速增大^[30-31]。因此在高含水率下,SM 粉质壤土和 KS 黏壤土(K_r)更大而(τ_c)较小。对于 WS 砂壤土(风沙土)来说,其(K_r)随含水率逐渐增大,可能与土壤性质有关。风沙土中砂粒含量较多,土壤颗粒间孔隙大,有机质含量极低,黏结力几乎为零,不利于团聚体形成和稳定^[32],是导致不同含水率条件下 WS 砂壤土临界启动条件相似的原因。此外,随着土壤中水分含量的升高,土壤托举力逐渐增大,降低水蚀过程中水流剥离土壤颗粒所

需的能耗,导致土壤可蚀性 K_r 增大。

2.2 土壤力学特性对细沟可蚀性(K_r)的影响

由于土壤抗剪强度(τ_f)是在 4 个不同法向应力下进行直剪试验后得到的,因此,1 组抗剪强度指标对应 1 个加权平均抗剪强度(τ')。由图 4 可知,KS 黏壤土加权平均抗剪强度(τ')最大,SM 粉质壤土其次,WS 砂壤土最小;随着土壤(τ')增大,土壤(K_r)呈幂函数减小,用(τ')来预测(K_r),结果 R^2 为 0.88。

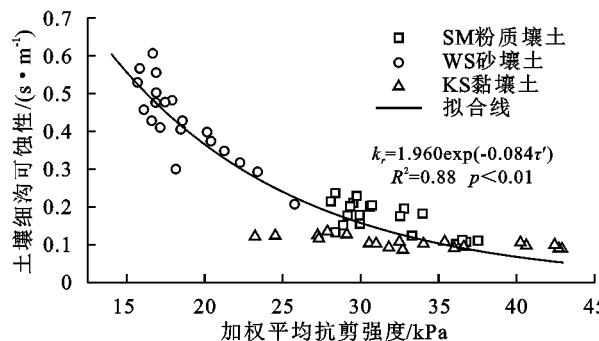


图 4 土壤细沟可蚀性与加权平均抗剪强度的关系

考虑到黏聚力(c)和内摩擦角(φ)是确定土壤抗剪强度(τ_f)的主要指标,为进一步研究不同质地土壤细沟可蚀性与 τ_f 间的响应关系,分别采用 c 和 φ 来预测土壤可蚀性(K_r),结果见表 3。随着土壤 c 和 φ 增大,土壤细沟可蚀性 K_r 逐渐降低,同时 c 对 WS 砂壤土预测效果最好($R^2=0.78$),其次是 KS 黏壤土($R^2=0.50$),SM 粉质壤土($R^2=0.22$)最差, φ 对 3 种土预测趋势与 c 相同。

随着土壤 τ' 增大土壤细沟可蚀性 K_r 持续降低(图 4)。Xie 等^[33]研究指出,因为土壤强度主要取决于颗粒之间的相互作用,而不是颗粒矿物本身强度,即 τ_f 的大小主要受 c 和 φ 影响,也是土体的主要破坏形式为剪切破坏的原因。黏聚力(c)作为黏性土特性指标,由土壤颗粒间分子引力形成的原始黏聚力和土壤中化合物胶结作用形成的固化黏聚力两部分组成。而内摩擦角(φ)反映土壤摩擦特性,包括土壤颗粒表面的摩擦力和土壤颗粒间的镶嵌力。在冻融作用下,土壤内部裂缝和体积反复膨胀收缩,不仅破坏土壤颗粒间的胶结作用,也削弱土壤颗粒间的摩擦力^[16]。土壤抗剪强度受 c 和 φ 影响也随之减小,不可避免地破坏土壤稳定结构。所以,土壤 K_r 与 τ_f 呈负相关关系。

由表 3 可知,与 c 相比, φ 对 K_r 的拟合精度较低,归因于冻融条件下土壤内摩擦角复杂的变化规律。各种土壤特性本身具有显著差异,而冻融作用又进一步加大差异,导致 φ 随冻融循环次数变化不确定性急剧增大。部分土壤团聚体经历冻融循环破碎会堵塞孔隙,同时引起土壤颗粒间的相对滑动,增大

土壤 φ ,有时则截然相反。朱龙祥等^[34]经过试验发现,冻融作用一方面导致小颗粒在土体中的冰晶膨胀时受到挤压而凝聚成大颗粒进而减小土壤 φ ;另一方面,也可能使得土壤的大颗粒破碎增加下一级小颗粒的数量,有利于增加土壤颗粒间的比表面积和接触点数量,有效增大土壤 φ 。胡田飞等^[35]以青藏高原粉质黏土作为试验土样,并设置 12.8%,14.8%,16.8% 的含水率,发现 3 种试样土样 φ 随着冻融循环次数增加变化规律各不相同,并认为干密度和土壤中水分重分布共同作用下的结果。所以,内摩擦角(φ)在冻融条件下的复杂变化规律使得数据点离散度较高,而 c 相比对 K_r 的预测精度较低。

表 3 土壤细沟可蚀性与抗剪强度指标的关系

土壤类型	指标	回归方程	R^2
SM 粉质壤土	c	$K_r = -0.020c + 0.327$	0.42
	φ	$K_r = -0.029\varphi + 0.443$	0.38
WS 砂壤土	c	$K_r = -0.082c + 0.887$	0.78
	φ	$K_r = -0.108\varphi + 0.963$	0.51
KS 黏壤土	c	$K_r = -0.003c + 0.132$	0.50
	φ	$K_r = -0.009\varphi + 0.196$	0.46

2.3 土壤力学特性对临界剪切力(τ_c)的影响

水流临界剪切力(τ_c)是土壤抵抗坡面流侵蚀破坏的临界值,与 K_r 不同, τ_c 越大,表明土壤结构越稳定,越难以被分离。由于 3 种土壤趋势一致,因此,以 SM 粉质黏土为例。由图 5 可知,随着加权平均抗剪强度(τ')、黏聚力(c)和内摩擦角的增大,土壤 τ_c 总体上呈线性增大趋势,表明土壤抗剪强度(τ_f)增大有效降低土壤分离率。

采用多种函数来表征二者之间的关系,其中线性函数最优。与土壤力学特性对 K_r 预测精度相比,土壤力学特性对 τ_c 预测效果普遍较差(表 4),因为 K_r 与土壤耕作状况、土壤粒径级配、植被覆盖度及初始含水率等条件相关,是土壤自身固有的属性;而 τ_c 的大小受到外界因素干扰较大,如水流强度、坡度、冻融循环次数等,即影响 K_r 的因素未必影响土壤 τ_c ^[9]。相关性分析(表 5)证实此结论, K_r 与 τ_f 及其指标的相关性较高,而 τ_c 则与冻融循环次数和含水率相关性较为密切。

2.4 季节性冻融区土壤侵蚀阻力预测模型的建立

在季节性冻融区冻融循环作用影响剧烈,使得土壤理化性质发生显著变化,所以在土壤侵蚀阻力预测模型建立过程中应该充分考虑冻融作用影响。根据表 5 皮尔逊相关分析,选取对土壤 K_r 影响显著的初始含水率和冻融循环次数以及力学性质中的加权平均抗剪强度(τ')进行非线性回归拟合;选取对 τ_c 影响程度不同的加权平均抗剪强度、初始含水率和冻融循

环次数进行非线性回归拟合(表6),预测SM粉质壤土、WS砂壤土和KS黏壤土 K_r 的模型 R^2 分别为0.73,0.84,0.59,NSE与 R^2 相同,RRMSE误差分别

为0.11,0.09,0.30,KS黏壤土拟合精度最差;预测 τ_c 模型 R^2 分别为0.52,0.80,0.89,RRMSE分别为0.29,0.09,0.08,预测SM粉质壤土 τ_c 模型性能最差。

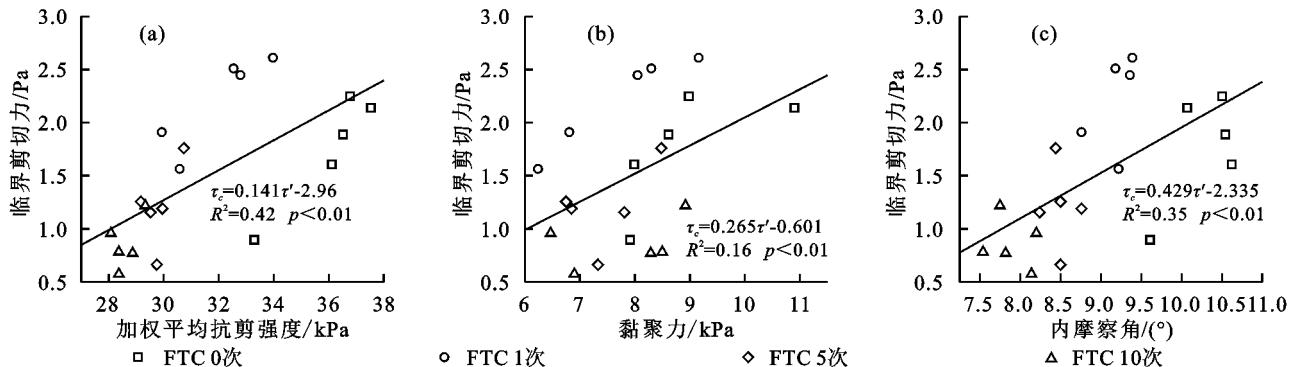


图5 临界剪切力与土壤抗剪强度及其指标间的关系

表4 临界剪切力(τ_c)与抗剪强度指标间的回归关系

土壤类型	指标	回归方程	R^2
SM 粉质壤土	τ'	$\tau_c = 0.141\tau' - 2.960$	0.42
	c	$\tau_c = 0.265c - 0.601$	0.16
	φ	$\tau_c = 0.429\varphi - 2.335$	0.35
	τ'	$\tau_c = 0.067\tau' - 0.787$	0.26
WS 砂壤土	c	$\tau_c = 0.025c - 0.762$	0.14
	φ	$\tau_c = 0.246\varphi - 1.123$	0.13
	τ'	$\tau_c = 0.040\tau' - 0.432$	0.27
KS 黏壤土	c	$\tau_c = 0.068c - 0.338$	0.18
	φ	$\tau_c = 0.237\varphi - 1.349$	0.20

冻融条件下土壤侵蚀阻力预测模型具有很大的局限性,均只适用于某一特定类型土壤,难以进行推广。2.1小结分析发现,土壤中值粒径和砂粒含量越

大,土壤越容易被水流分离,而土壤中黏粒作为团聚体形成的重要胶结材料,加强土壤的抗剪强度^[8]。因此,有必要在考虑土壤粒径级配影响的前提下建立适用于不同地区土壤的土壤侵蚀阻力预测模型。

参考孙宝洋^[14]研究中2种不同季节性冻融区土壤数据(陕西榆林,YL粉砂壤土;内蒙古包头,BT粉质壤土),其试验条件均与本试验相同,且均为扰动土。采用5种土数据进行皮尔逊相关性分析(表7),选取对 K_r 显著影响的加权平均抗剪强度、土壤粒径参数、初始含水率以及冻融循环次数进行非线性回归(公式10);选取对土壤 τ_c 显著影响的加权平均抗剪强度、冻融循环次数、砂粒含量和初始含水率进行非线性回归(公式11)。

表5 冻融条件下土壤侵蚀阻力和抗剪强度指标间的相关性分析

土壤类型	指标	τ'	c	φ	FTCs	SMC
SM 粉质壤土	$K_r/(s \cdot m^{-1})$	-0.864 **	-0.570 **	-0.805 **	0.664 **	0.227 **
	τ_c/Pa	0.453 **	0.302	0.421	-0.627 **	-0.257 **
WS 砂壤土	$K_r/(s \cdot m^{-1})$	-0.848 **	-0.890 **	-0.733 **	0.543 *	0.656 **
	τ_c/Pa	0.021 **	0.047	-0.060	-0.614 **	-0.028 *
KS 黏壤土	$K_r/(s \cdot m^{-1})$	-0.733 **	-0.728 *	-0.710 **	0.182 **	0.645 **
	τ_c/Pa	0.314 *	0.295	0.325	-0.817 **	-0.018 **

注意: * 表示 $p \leq 0.05$; ** 表示 $p \leq 0.01$; *** 表示 $p \leq 0.001$ 。

表6 冻融条件下3种土壤的侵蚀阻力预测模型

土壤类型	指标	回归方程	R^2	RRMSE	NSE
SM 粉质壤土	$K_r/(s \cdot m^{-1})$	$K_r = 423.68\tau'^{-2.266} e^{0.388SMC - 0.006FTCs}$	0.73	0.11	0.73
	τ_c/Pa	$\tau_c = 3163.37\tau'^{-2.030} e^{-2.517SMC - 0.121FTCs}$	0.52	0.29	0.52
WS 砂壤土	$K_r/(s \cdot m^{-1})$	$K_r = 6.529\tau'^{-1.028} e^{1.714SMC - 0.011FTCs}$	0.84	0.09	0.84
	τ_c/Pa	$\tau_c = 333.40\tau'^{1.414} e^{-1.496SMC - 0.069FTCs}$	0.80	0.09	0.79
KS 黏壤土	$K_r/(s \cdot m^{-1})$	$K_r = 1.356\tau'^{-0.690} e^{0.466SMC - 0.003FTCs}$	0.59	0.30	0.59
	τ_c/Pa	$\tau_c = 1.981e^{-0.044SMC - 0.514FTCs}$	0.89	0.08	0.87

经历冻融循环后的细沟可蚀性(K_r)预测模型:

$$K_r = 20.85\tau'^{0.33} Clay^{0.40} Silt^{2.89} Sand^{2.10} e^{1.96SMC + 0.05FTCs} \quad (10)$$

式中:模型性能评估指标 $R^2 = 0.85$; RRMSE = 0.27;

$NSE = 0.84$ 。

经历冻融循环后的临界剪切力(τ_c)预测模型:

$$\tau_c = 558.32\tau'^{1.62} Sand^{-0.03} e^{-1.85SMC - 0.10FTCs} \quad (11)$$

式中:模型性能评估指标 $R^2 = 0.79$; RRMSE = 0.33,

NSE=0.79。

综合考虑预测公式(10)和公式(11)的模型性能评估指标 R^2 、NSE、RRMSE,同时图6表明,除WS砂壤土预测点较为分散外,2个预测模型对不同地区

冻融条件下土壤 K_r 和 τ_c 的预测结果较合理。此外,建议在以后工作中根据土壤粒径级配对土壤进行分类,在此基础上进行建模以进一步提高土壤侵蚀模型的预测精度。

表7 冻融条件下土壤侵蚀阻力影响因素的相关性分析

指标	τ'	Clay	Silt	Sand	FTCs	SMC
$K_r/(s \cdot m^{-1})$	-0.325**	-0.608**	-0.303**	0.589**	0.244*	0.344**
τ_c/Pa	0.585**	0.659	-0.482	-0.738**	-0.355**	-0.241**

注意: * $P \leq 0.05$ ** $P \leq 0.01$ *** $P \leq 0.001$

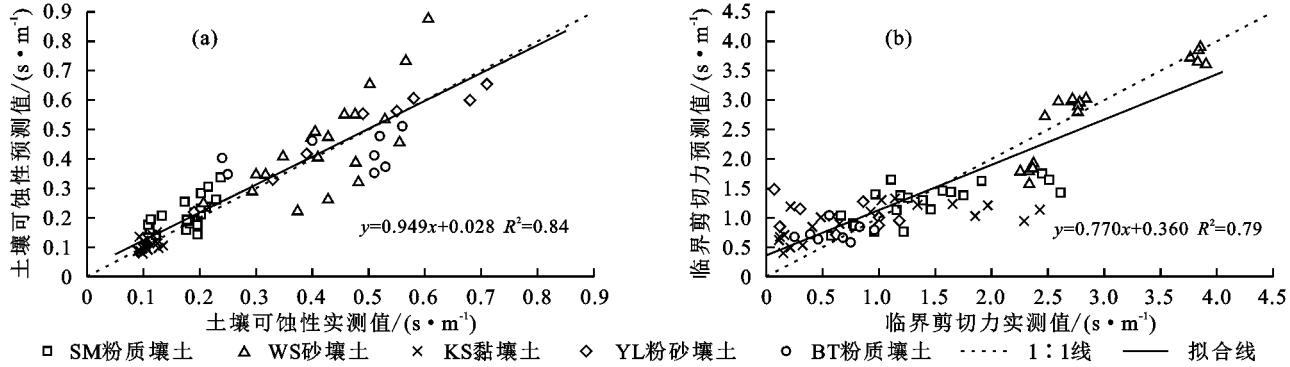


图6 预测值和实测值对比

3 结论

(1)3种土壤细沟可蚀性均随冻融循环次数增加而逐渐增大并趋于稳定,而临界剪切力则相反。

(2)随初始含水率升高,SM粉质壤土细沟可蚀性总体上呈先减后增趋势,WS砂壤土则单调增加,KS黏壤土在高含水率下显著增大。SM粉质壤土和KS黏壤土临界剪切力随初始含水率升高先增大后减小,WS砂壤土则变化不明显。

(3)影响细沟可蚀性与临界剪切力的主要因素与密切程度与二者均不同。3种土壤细沟可蚀性均与加权平均抗剪强度、黏聚力和内摩擦角相关性较高,平均相关系数分别为-0.815,-0.727,-0.749;而临界剪切力与冻融循环次数和初始含水率间的相关性较高,平均相关系数分别为-0.686,-0.101。

(4)根据相关性分析结果,分别选取与加权平均抗剪强度、粒径含量、冻融循环次数、砂粒含量和初始含水率相关性较高的影响因素,建立土壤细沟可蚀性($R^2=0.85$)和土壤临界剪切力的预测模型($R^2=0.79$)。

参考文献:

- [1] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under water discharges [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27(3):748-757.
- [2] Prosdocimi M, Cerdà A, Tarolli P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review[J]. Catena, 2016, 141:1-21.
- [3] 翟子宁,苏备.土壤可蚀性研究进展[J].土壤通报,2016, 47(1):253-256.
- [4] Knapen A, Poesen J, De Baets S. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2):425-440.
- [5] Sheridan G J, So H B, Loch R J, et al. Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties [J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38(2): 265-284.
- [6] Gilley J E, Elliot W J, Lafren J M, et al. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling[J]. Journal of Hydrology, 1993, 142: 251-271.
- [7] 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 ASABE, 2008, 51(3):883-890.
- [8] Lado M, Ben-Hur M, Shainberg I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6):1992-1999.
- [9] Geng R, Zhang G H, Ma Q H, et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China[J]. Catena, 2017, 152:18-28.
- [10] Su Z L, Zhang G H, Yi T, et al. Soil detachment capacity by overland flow for soils of the Beijing region [J]. Soil Science, 2014, 179(9):446-453.
- [11] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J].农业工程学报,2013,29(10): 153-159.
- [12] 陈安强,张丹,范建容,等.元谋干热河谷沟壁崩塌的力学机制与模拟试验[J].中国水土保持科学,2012,10(3):29-35.

- [13] 洪大林,缪国斌,邓东升,等.粘性原状土起动切应力与物理力学指标的关系[J].水科学进展,2006,17(6):774-779.
- [14] 孙宝洋.季节性冻融对黄土高原风水蚀交错区土壤可蚀性作用机理研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [15] 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.
- [16] 左小锋,王磊,郑粉莉,等.冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):30-35,42.
- [17] 王力,李喜安,洪勃,等.黏粒含量对黄土抗剪强度影响试验[J].煤田地质与勘探,2019,47(3):179-185.
- [18] Zhang H Y, Li M, Wells R R, et al. Effect of soil water content on soil detachment capacity for coarse- and fine-grained soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(3):697-706.
- [19] 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.
- [20] 郑鄖,马巍,邵慧.冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J].岩土力学,2015,36(5):1282-1287,1294.
- [21] Wang D D, Wang Z L, Shen N, et al. Modeling soil detachment capacity by rill flow using hydraulic parameters[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535:473-479.
- [22] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(6):653-657.
- [23] Zhang G, Tang K, Ren Z, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the Asabe, 2013, 56(3):927-934.
- [24] Yu Y C, Zhang G H, Geng R, et al. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the Loess Plateau of China[J]. Bio-
- systems Engineering, 2014, 122:139-148.
- [25] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff[J]. Plant and Soil, 2007, 294(1):169-183.
- [26] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3):282-290.
- [27] Geng R, Zhang G H, Li Z W, et al. Spatial variation in soil resistance to flowing water erosion along a regional transect in the Loess Plateau[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(15):2049-2058.
- [28] 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.
- [29] 郑鄖,马巍,邵慧.冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J].冰川冻土,2015,37(1):132-137.
- [30] Bissonnais Y L, Singer M J. Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6):1898-1903.
- [31] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China [J]. Catena, 2010, 81(3):240-248.
- [32] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, South China[J]. Natural Hazards, 2015, 79(1):455-478.
- [33] Xie S B, Qu J J, Lai Y M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(4):999-1009.
- [34] 朱龙祥,范昊明,郭成久,等.冻融作用对原状棕壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):55-60,67.
- [35] 胡田飞,刘建坤,房建宏,等.冻融循环下含水率对粉质黏土力学性质影响试验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):123-130.

(上接第24页)

- [21] 毛冉冉,程年生,卢叶盛.二维加糙明渠流理论床面的确定方法[J].泥沙研究,2022,47(6):9-14.
- [22] Nezu I. Turbulence intensities in open channel flows [J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 1977, 1977(261):67-76.
- [23] 李斌.不同粗糙床面的水力特性研究[D].武汉:长江科学院,2021.
- [24] 钟亮,廖尚超,张建梅,等.密排粗糙床面明渠水流的紊动特性[J].泥沙研究,2020,45(3):8-14.
- [25] 钟强,王兴奎,苗蔚,等.高分辨率粒子示踪测速技术在

- 光滑明渠紊流黏性底层测量中的应用[J].水利学报,2014,45(5):513-520.
- [26] 路明,霍自民,范志高,等.人工加糙对明渠紊动特性影响的试验研究[J].水利水电技术,2008,39(9):44-46.
- [27] 张红光,路明,范志高,等.明渠渠底糙率突变对紊流摩阻流速及壁面切应力影响的试验分析[J].水利水电技术,2007,38(1):89-92.
- [28] Joel Sundstrom L R, Cervantes M J. Characteristics of the wall shear stress in pulsating wall-bounded turbulent flows [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 96:257-265.