

黄土台塬区红土崩解特性对泻溜侵蚀的影响

李哲¹, 王健¹, 蔡泽康¹, 封瑞坤¹, 李锋², 卜芳侠³, 王晓冲³

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.延安市水土保持监测分站, 陕西 延安 716000; 3.韩城市水土保持工作站, 陕西 韩城 714000)

摘要: [目的] 探析红土崩解特性和泻溜侵蚀发生的关系, 为坡面治理提供理论依据。[方法] 测量泻溜边坡坡度、坡积体休止角等基本参数, 试验测定红土团聚体特性及干湿交替条件下崩解过程, 分析泻溜侵蚀地区发生泻溜侵蚀的边坡条件、红土水稳性团聚体稳定性和崩解特性的变化情况。[结果] ① 边坡坡度和休止角是泻溜侵蚀发生的控制性因素之一。黄土台塬区泻溜边坡坡度 40° 以内很少发生泻溜, 大于 80° 大大减弱。红土与泻溜坡积体自然休止角范围为 25°~36°。② 红土团聚体绝大部分为非水稳性团聚体, 团聚体稳定性差, 因此遇水极易崩解而造成泻溜侵蚀的发生。红土团聚体干筛平均质量直径 MWD 与几何平均直径 GMD 分别为 2.16 mm, 1.37 mm, 湿筛平均质量直径 MWD 与几何平均直径 GMD 分别为 0.51 mm, 0.25 mm, 团聚体破坏率 PAD 为 57.66%, 分形维数 D 为 2.96, ASI 是转移矩阵法中表示团聚体总体稳定性的参数, 红土 ASI 为 1.75。③ 干湿交替通过减小红土崩解程度从而减弱泻溜侵蚀的发生。自然状态条件下红土崩解程度最大, 最大崩解指数为 81.79%, 平均崩解速率为 51.03 g/min; 干湿交替条件下红土崩解程度较自然状态减小; 不同干湿交替条件之间红土最大崩解指数不同但差异性不显著。④ 红土平均崩解速率与泻溜坡积体休止角、泻溜边坡坡度与 ASI 呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$)。[结论] 红土崩解特性与泻溜侵蚀的发生有密切联系, 干湿交替通过减小红土崩解程度从而减弱泻溜侵蚀的发生。

关键词: 红土; 泻溜; 休止角; 团聚体; 土壤崩解性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0001-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 李哲, 王健, 蔡泽康, 等. 黄土台塬区红土崩解特性对泻溜侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 1-9. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.001; Li Zhe, Wang Jian, Cai Zekang, et al. Effect of lateritic soil disintegration properties on slumping erosion in loess tableland area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 1-9.

Effect of Lateritic Soil Disintegration Properties on Slumping Erosion in Loess Tableland Area

Li Zhe¹, Wang Jian¹, Cai Zekang¹, Feng Ruikun¹, Li Feng², Bu Fangxia³, Wang Xiaochong³

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering,

Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Yan'an Soil and Water Conservation Monitoring Sub-station, Yan'an, Shaanxi 716000,

China; 3. Hancheng District Soil and Water Conservation Workstation, Hancheng, Shaanxi 714000, China)

Abstract: [Objective] The relationship between laterite disintegration characteristics and the occurrence of slumping erosion was investigated in order to provide a theoretical basis for slope management. [Methods] The basic parameters of slumping slopes such as slope gradient and angle of repose were measured; the characteristics of laterite agglomerates and the disintegration process under alternating wet and dry conditions were experimentally determined; and the conditions of the slope, stability of laterite water-stable agglomerates, and changes of the disintegration characteristics of the slumping erosion area were analyzed. [Results] ① Slope gradient and angle of repose were two factors that influenced the occurrence of slumping

收稿日期: 2024-04-15

修回日期: 2024-06-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“半干旱区物理结皮对土壤 CO₂ 释放的阻滞效用及机制”(42377332); “十四五”国家重点研发计划子课题“风水复合侵蚀动力学模拟与产输沙预测”(2022YFF130080105)

第一作者: 李哲(2002—), 女(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: lizhe13278@qq.com。

通信作者: 王健(1973—), 男(汉族), 陕西省商洛市人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与流域管理方面研究。Email: wangjian@nwsuaf.edu.cn。

erosion. Sloughing was unusual in loess plateau areas with slope gradients of 40° or less and was considerably weakened by gradients greater than 80° . The natural angle of repose between red soil and slumping slopes varied from 25° to 36° . ② Most of the laterite agglomerates easily disintegrated when exposed to water because they were non-hydrostable and had weak stability, resulting in sloughing and erosion. The average mass diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the laterite agglomerates were 2.16 mm and 1.37 mm for dry sieve and 0.51 mm and 0.25 mm for wet sieve, respectively. The percentage of agglomerate destruction (PAD) was 57.66%, with a fractal size D of 2.96. aggregate stability index (ASI) is a metric that represents the overall stability of agglomeration in the transfer matrix method, and the red clay ASI in this study was 1.75. ③ Dry-wet alternation reduced the rate of slumping erosion by reducing laterite disintegration. The highest disintegration index was 81.79%, and the average disintegration rate was 51.03 g/min. The disintegration degree of the laterite was lowered under the dry-wet alternation condition compared to under the natural state. The maximum disintegration index of the laterite varied between different dry-wet alternation circumstances but the difference was not statistically significant. ④ Laterite disintegration rates were favorably linked with the angle of repose, slope gradient, and ASI ($p < 0.01$) of the slumping erosion. [Conclusion] Laterite disintegration properties are directly related to slumping erosion, and dry-wet alternation reduces the rate of slumping erosion by reducing laterite disintegration.

Keywords: laterite; lagoon; angle of repose; agglomerate; soil disintegration properties

泻溜是黄土高原残塬沟壑区沟谷中由第四纪下部质地黏重的红色土层(简称红土)构成的泻溜坡面岩体,由于物理风化产生的风化物受重力作用向坡脚滚溜的一种侵蚀方式^[1],是黄土高原沟壑区与残塬沟壑区交接地带严重的土壤侵蚀形式之一。曾伯庆等^[2]研究表明泻溜发生的机理除红土岩性外,地面坡度、土壤水分、温度和风力等因素对侵蚀强度均有直接影响。王斌科^[3]研究指出,泻溜侵蚀会与面蚀、沟蚀相互叠加,往复不断、相互加剧的持续作用使得更多红土出露而遭受侵蚀,是一种不可逆转的恶性循环,严重威胁当地人民群众的生产生活,因此泻溜侵蚀受到许多研究人员的密切关注。

近年来,学者们对红土及泻溜侵蚀展开了许多研究。段斯译等^[4]研究了不同土地利用方式下第四纪古红土有机碳分布特征,赵枝艳等^[5]研究了古土壤饱和渗透性与孔隙分布特征。李育鸿^[6]研究结果表明,黄土残塬区红土泻溜坡面及坡积体水分物理性质与贮水特征与泻溜侵蚀有密切联系。柴亚凡等^[7]研究结果表明,随着降雨强度的增加,泻溜红土坡积体的产流量、产沙量、入渗速率逐渐增加,但稳渗速率增加的趋势不明显,稳定产流产沙所需时间逐渐缩短。

土壤或颗粒物质在自由堆积状态下保持稳定的最大坡度为土壤的休止角,即土壤或颗粒物质在不受外力作用下自然堆积所呈现的最陡坡度。Dong Haoyu 等^[8]研究表明,土壤休止角对边坡稳定性起着关键作用,与斜坡角度及土壤自身团聚体特性关系密切。学者们^[9-11]对不同土壤类型的团聚体稳定性

展开了大量研究。土壤团聚体是土壤结构组成基本单元,是土壤侵蚀过程中土壤分离、搬运、板结及压实等过程与作用的关键指标之一,团聚体的数量和分布状况反映了土壤结构的稳定性、持水性、通透性和抗侵蚀的能力^[12]。评价土壤团聚体稳定性常用的指标主要有大团聚体含量($R_{>0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GWD)、分形维数(D)、团聚体破坏率(PAD)和团聚体稳定性指数(ASI)等。通常认为,大团聚体含量 $R_{>0.25}$,平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GWD),ASI 越大,土壤团聚体分布状况与稳定性越好;分形维数(D)、团聚体破坏率(PAD)越小,土壤结构稳定性越好,抗蚀能力越强,土壤崩解性越弱^[13-15]。崩解是土壤侵蚀发生的先决条件,也是从土壤水理性质的角度评价土壤抗侵蚀性能以及侵蚀坡面固土能力的一项重要指标^[16]。土壤崩解指数和崩解速率能够综合反映土壤的稳定性和抗蚀力。影响土壤崩解的因素有很多。如张晨晖等^[17]研究表明,土壤崩解速率和最大崩解比与生物结皮生物量和厚度呈显著负相关;He Ling 等^[18]研究表明,土壤初始含水率和根重密度对崩解速率的影响存在交互效应,减少干湿循环次数并保持一定自然含水量有助于降低土壤崩解速率。

然而在过去的研究中,关于黄土台塬区泻溜侵蚀边坡条件和红土团聚体特性的相关信息较少,利用崩解能力来分析泻溜侵蚀发生状况的研究鲜有报道,因此探究泻溜边坡条件、红土团聚体特性、崩解特性等因素和泻溜侵蚀之间的关系尤为重要。基于此,本研

究旨在定量分析泻溜侵蚀发生的边坡条件、红土团聚体稳定性和崩解特性,为泻溜侵蚀和红土的相关研究提供数据支撑和理论依据,对研究黄土高原地区沟坡稳定性与泻溜侵蚀防治具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省杨凌示范区,地理坐标为 $107^{\circ}59' - 108^{\circ}09' E$, $34^{\circ}14' - 34^{\circ}24' N$,地势北高南低,西高东低,南北呈阶梯地形,海拔 $418.0 \sim 540.1$ m,气候类型属东亚暖温带半湿润气候区,年平均气温 12.9 $^{\circ}C$,年均日照时间 $2\ 163.8$ h,全年无霜期 221 d,年平均蒸发量 884 mm,年均降水量 637.6 mm,多集中在7—10月。试验所用土壤为杨凌地区沟谷坡面红土,红土粉沙粒含量 60% ,黏粒含量 38% ,静水分散性 18 min,最大吸水率 26% ,透水性 $0.006\ 824$ m/d,膨胀系数 18% ,孔隙率 $20.56\% \sim 25.99\%$ 。

1.2 采样点调查

供试红土于2023年4月采集于杨凌示范区“杨凌大道”泻溜侵蚀典型区域,采样深度范围约 $0 \sim 20$ cm,采用等距取样法阴坡选取5处、阳坡选取5处共10处不同泻溜坡积体作为采样点。每处采样点利用 200 cm^3 环刀取样8份,利用指南针、海拔计测量海拔和方位,利用坡度仪随机测量35个泻溜边坡坡度数据、35个泻溜坡积体休止角数据。在采集和运输红土土样的过程中尽量减少对土样的扰动,以免破坏团聚体,取回实验室后自然风干并去除杂质,以备后续试验使用。

采样点植物主要分布有白莲蒿(*Artemisia stechmanniana*)、金叶女贞(*Ligustrum × vicaryi*)、马兰(*Aster indicus*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、紫鹅绒(*Gynura aurantiaca*)等,阴坡植被覆盖度 8% 左右,阳坡植被覆盖度 19% 左右。采样点平均高程为 502.3 m,坡积体平均厚度约 90 cm,阴坡泻溜边坡平均坡度为 51.98° ,阳坡泻溜边坡平均坡度为 61.88° ,泻溜边坡平均坡度为 56.93° ,泻溜坡积体平均休止角为 31.07° 。

1.3 试验方法

1.3.1 干筛 按四分法均匀称取 300 g风干土样置于套筛顶部(孔径依次为 $5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25$ mm),以 45 次/min的频率上下均匀震荡 5 min,测定各粒级红土质量;平行测定3组取平均值。

1.3.2 湿筛 按四分法均匀称取 100 g风干土样置于铝盒,沿铝盒边缘缓慢加入去离子水至饱和,湿润 20 min。套筛固定于土壤团粒结构分析仪(上下振幅

3 cm,频率 50 次/min),将饱和土样转移至套筛顶部(孔径依次为 $5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25$ mm),在充分浸水的环境中湿筛 3 min,得到不同粒级的红土团聚体,烘干并称量;平行测定3组取平均值。

1.3.3 干湿交替试验 干湿交替即土壤反复经受干缩和湿胀的过程。为消除干燥和湿润过程对结果的影响,试验通过浸泡烘干模拟干湿交替过程,将装有试验红土的环刀(有底座)放入托盘,用胶头滴管向托盘加入蒸馏水,保持水层高度始终高于红土下表面 2 cm,持续浸泡湿化 8 h,使红土达到饱和状态;经湿化处理后,将托盘放入恒温 70 $^{\circ}C$ 的烘箱持续干燥 8 h。试验共设置8组,每组分别进行 $0 \sim 7$ 次干湿交替;每组试验进行3次重复。

1.3.4 崩解试验 试验前在容器中加入适量清水,置于天平后将天平归零。试验时从环刀取出红土土样并将其放置于崩解网,用金属丝悬挂好崩解网后,金属丝自然绷直并完全浸入水中,使红土缓缓浸入水中开始崩解,每隔 10 s记录天平读数, 30 s或更长时间天平读数几乎不发生变化时,停止计数,用秒表记录土样崩解所需时间以及土壤开始崩解和停止崩解时的天平读数,每次崩解结束后需及时换水。每组试验进行3次重复,共24组试验。

1.4 数据处理

1.4.1 筛分指标计算

(1) 大团聚体质量百分比。

$$R_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $M_{>0.25}$ 为 >0.25 mm团聚体重量; M_T 为未筛分前土壤总重。

(2) 土壤团聚体破坏率。

$$PAD = \frac{(D_{R>0.25} - W_{R>0.25})}{D_{R>0.25}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:PAD为团聚体破坏率(%); $D_{R>0.25}$ 为 >0.25 mm机械稳定性团聚体含量(%); $W_{R>0.25}$ 为 >0.25 mm水稳定性团聚体含量(%)[13]。

(3) 土壤平均质量直径和几何平均直径。

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (3)$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i\right)$$

式中: \bar{x}_i 为土壤各粒径平均直径(mm); w_i 为土壤各粒径质量百分比(%)[13]。

(4) 土壤分形维数。采用杨培岭等[19]的土壤颗粒分形模型:

$$D = 3 - \frac{\lg(W_i/W_0)}{\lg(\bar{d}_i - \bar{d}_{\max})} \quad (4)$$

式中: \bar{d}_{\max} 为最大粒级土壤的平均直径; W_i 为土壤直径小于 \bar{d}_i 的累积重量; W_0 是所有粒级土壤重量之和。

(5) 转移矩阵。基于转移矩阵法的研究^[14], 假设风干红土团聚体湿筛是能量输入过程, 湿筛后红土团聚体分布发生改变。红土水稳性团聚体的分布差异可指示侵蚀过程中红土表层单个团聚体的破坏程度。将红土干筛后粒径为 i 的团聚体百分含量作为输入矩阵 M_i , 湿筛后粒径为 i 的团聚体百分含量作为输出矩阵 N_i 。

$$\begin{aligned} M_i &= \{M_1, M_2, M_3 \cdots M_i\} \\ N_i &= \{N_1, N_2, N_3 \cdots N_i\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{cases} M_1 X_1 = N_1 \\ M_1(1-X_1)X_2 + M_2 X_2 = N_2 \\ M_1(1-X_1)(1-X_2)X_3 + M_2(1-X_2)X_3 + M_3 X_3 = N_3 \\ \vdots \\ M_1(1-X_1)(1-X_2)\cdots(1-X_{i-1})X_i + M_2(1-X_2)\cdots(1-X_{i-1})X_i + M_i X_i = N_i \end{cases} \quad (6)$$

根据矩阵原理, 上式可转换为:

$$\begin{pmatrix} x_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ (1-x_1)x_2 & x_2 & 0 & \cdots & 0 \\ (1-x_1)(1-x_2)x_3 & (1-x_2)x_3 & x_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ (1-x_1)(1-x_2)\cdots(1-x_{i-1})x_i & \cdots & \cdots & \cdots & x_i \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \cdots \\ M_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ \cdots \\ N_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

得到矩阵 X 如下:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ (1-x_1)x_2 & x_2 & 0 & \cdots & 0 \\ (1-x_1)(1-x_2)x_3 & (1-x_2)x_3 & x_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ (1-x_1)(1-x_2)\cdots(1-x_{i-1})x_i & \cdots & \cdots & \cdots & x_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

最终得到矩阵 $\mathbf{X}, \mathbf{M}, \mathbf{N}$ 之间的关系:

$$\mathbf{X}\mathbf{M} = \mathbf{N} \quad (9)$$

\mathbf{X} 是一个过渡矩阵, 通过分析湿筛能量输入过程中保存和破坏的概率来说明红土干筛与湿筛团聚体的关系; X_i 表示湿筛团聚体稳定性, X_i 值越高, 团聚体越稳定。因此, 针对整个土壤, ASI 定义为矩阵 \mathbf{X} 对角线之和, 表示团聚体总体稳定性。ASI 的计算公式如下:

$$\text{ASI} = X_1 + X_2 + X_3 + \cdots + X_i \quad (10)$$

1.4.2 崩解指标计算

(1) 崩解指数。为消除量纲的影响, 试验采用崩解指数 B_i 代表累计崩解量, 计算公式为^[20]:

$$B_i = \frac{M_i}{M} \times 100\% \quad (11)$$

式中: M_i 为 t 时刻累积崩解质量(g); M 为崩解红土总质量(g)。

(2) 崩解速率。崩解速率 v 为单位时间土壤在静水中的崩解量, 通常用来表征土壤崩解性能, 崩解

根据团聚体形成理论, 微团聚体通过无机胶体、黏粒和有机质胶结作用转化为大团聚体需较长时间。假设: ①降雨过程只有大团聚体才能分散形成微团聚体, 微团聚体不能结合为大团聚体; ②各粒级团聚体仅破碎为后续粒级; ③相同尺寸团聚体具有相同破裂几率。若团聚体筛径大小顺序为 $1, 2, 3 \cdots i$, 大于每个筛径的团聚体在筛分时保存在自己筛径范围内的几率为 $X_1, X_2, X_3 \cdots X_i$, 破裂进入下一筛径的几率则为 $1-X_1, 1-X_2, 1-X_3 \cdots 1-X_i$, 则 M_i 和 N_i 建立如下关系:

速率越小, 土壤越难崩解, 计算公式为^[20]:

$$v = \frac{M_1 - M_2}{\left(\frac{t_2 - t_1}{60}\right)} \times 100\% \quad (12)$$

式中: M_1 为 t_1 时刻天平读数(g); M_2 为 t_2 时刻天平读数(g); t_1, t_2 为崩解时间(s)。

2 结果与分析

2.1 泻溜边坡坡度与坡积体休止角分布特性

试验样区红土松散堆积体坡脚均处于自然平衡状态, 通常近似认为堆积体稳定坡脚为自然休止角。泻溜坡积体休止角呈现近似正态分布, 休止角浮动范围为 $21^\circ \sim 43^\circ$, 集中分布在 $25^\circ \sim 36^\circ$, 众数、中位数均为 31° 。泻溜边坡坡度与泻溜侵蚀关系密切, 泻溜边坡坡度呈现近似正态分布, 坡度低于 40° 的坡面侵蚀不明显, 大于 80° 的坡面侵蚀明显减弱, 阳坡泻溜侵蚀在 $50^\circ \sim 75^\circ$ 的坡面上最明显(见图 1)。阴坡泻溜

侵蚀主要发生在坡度大于 45°的坡面,尤其在 47°~60°的坡面上表现最明显。

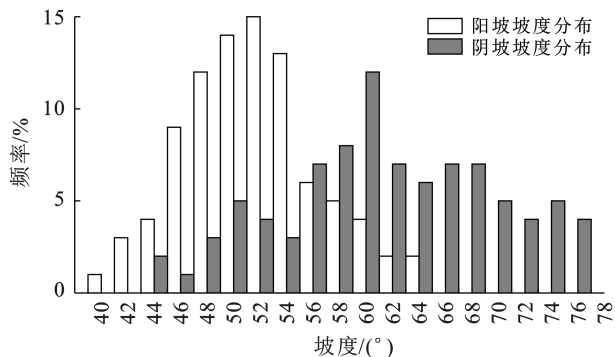
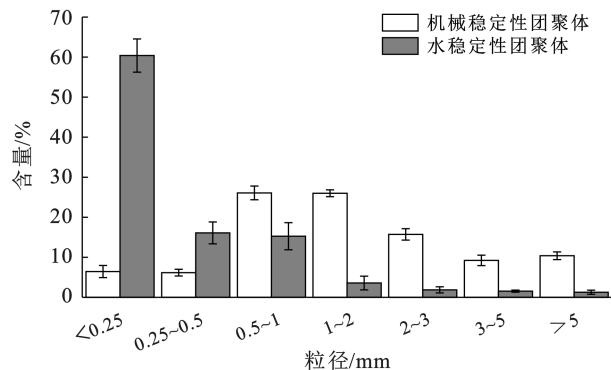


图 1 试验样区泻溜边坡坡度分布

Fig.1 Slope distribution of slumping slope at study area

2.2 红土团聚体特性

2.2.1 红土团聚体组成分析 干筛可获得原状红土的团聚体总体数量,包括非水稳性团聚体和水稳性团聚体^[21]。试验样区干筛团聚体 0.5~1 mm 和 1~2 mm 粒径比例最大,二者之和超过红土团聚体总量的 50%, <0.25 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径比例最小(见图 2)。湿筛团聚体 <0.25 mm 粒径占比最大,为红土团聚体总量的 60.39%,湿筛团聚体含量整体呈现出随粒径的增加而减小的趋势(见图 2)。通过红土团聚体组成分析可知,红土团聚体大部分为非水稳性团聚体,团聚作用弱,粒径大于 0.5 mm 的团聚体易被分散破坏转变为粒径小于 0.5 mm 的团聚体。



注:不同字母表示不同粒径百分比间差异显著($p < 0.05$)。

图 2 试验样区红土机械稳定性与水稳定性团聚体组成
Fig.2 Mechanical stability and water stability agglomerate composition of lateritic soil at study area

2.2.2 红土团聚体稳定性分析 试验样区干筛 $R_{D>0.25}$ 大于湿筛 $R_{W>0.25}$,说明红土湿筛后稳定性下降。湿筛后 PAD 平均值达 57.66%,说明红土团聚体破坏率大,抵抗侵蚀能力低。干筛 MWD 与 GMD 的平均值分别为 2.16 和 1.37 mm,湿筛 MWD 与 GMD 的平均值分别为 0.51 和 0.25 mm,干筛 GMD 和 MWD 大于湿筛,且二者差异极显著,说明红土团聚体平均粒径团聚度下降,稳定性变差。干筛分形维数 D 的平均值为 2.69,湿筛分形维数 D 的平均值为 2.96,且二者差异显著,说明红土水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量降低,抗蚀性下降。红土的 ASI 值较小,仅为 1.75,说明红土自身土壤结构不稳定(见表 1)。

表 1 试验样区红土干筛与湿筛团聚体稳定性指标

Table 1 Stability indexes of lateritic soil dry sieve and wet sieve agglomerate at study area

过筛方式	$R_{>0.25}$	PAD	MWD/mm	GMD/mm	D	ASI
干筛	93.56 ± 1.52^a	—	2.16 ± 0.12^a	1.37 ± 0.12^a	2.69 ± 0.03^b	—
湿筛	39.61 ± 4.14^b	57.66 ± 5.09	0.51 ± 0.10^b	0.25 ± 0.03^b	2.96 ± 0.01^a	1.75 ± 0.37

注: $R_{>0.25}$, PAD, MWD, GMD, D , ASI 分别为大团聚体含量、团聚体破坏率、团聚体平均质量直径、团聚体几何平均直径、分形维数和团聚体稳定性指数;不同字母表示干筛与湿筛间团聚体稳定性指标差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.3 红土崩解特性

试验样区崩解指数—时间曲线大致呈现 S 形;自然状态下崩解指数—时间曲线最陡,崩解完成所需时间最短;不同干湿交替条件下崩解指数—时间曲线均缓于自然状态(见图 3a)。对比红土最大崩解指数发现,随着干湿交替次数的增加,最大崩解指数差异不显著,但自然状态下最大崩解指数仍为最高。(见图 3b)。

自然状态与不同干湿交替条件下崩解速率—时间曲线变化趋势较相似;红土崩解速率在无附加外因的影响下,随着时间的推移先增加后减小最后趋于低水平稳定;红土崩解速率达到峰值所需的时间有所差异,随着干湿交替次数的增加,崩解速率达到峰值所需的时间大致呈现先增加后减少的趋势(见图 4a)。

对比红土平均崩解速率发现,红土自然状态下平均崩解速率最大(见图 4b)。

2.4 红土崩解特性与团聚体特性、泻溜边坡特性相关性分析

对试验样区红土自然状态下平均崩解速率,泻溜坡积体休止角、泻溜边坡坡度,水稳性大团聚体质量百分比,湿筛团聚体破坏率、ASI,湿筛红土平均质量直径、几何平均直径、土壤分形维数进行斯皮尔曼相关性分析(见图 5)。平均崩解速率与 PAD, D 为负相关关系,与坡积体休止角、边坡坡度、水稳性大团聚体质量百分比、平均质量直径、几何平均直径、ASI 为正相关关系,且与泻溜坡积体休止角、泻溜边坡坡度、ASI 呈现极显著正相关关系($p < 0.01$)。

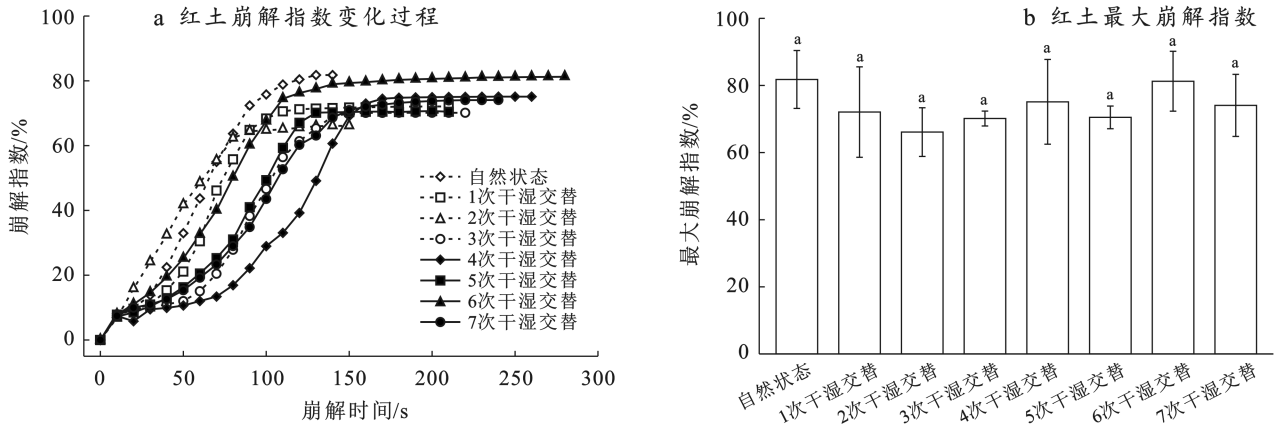
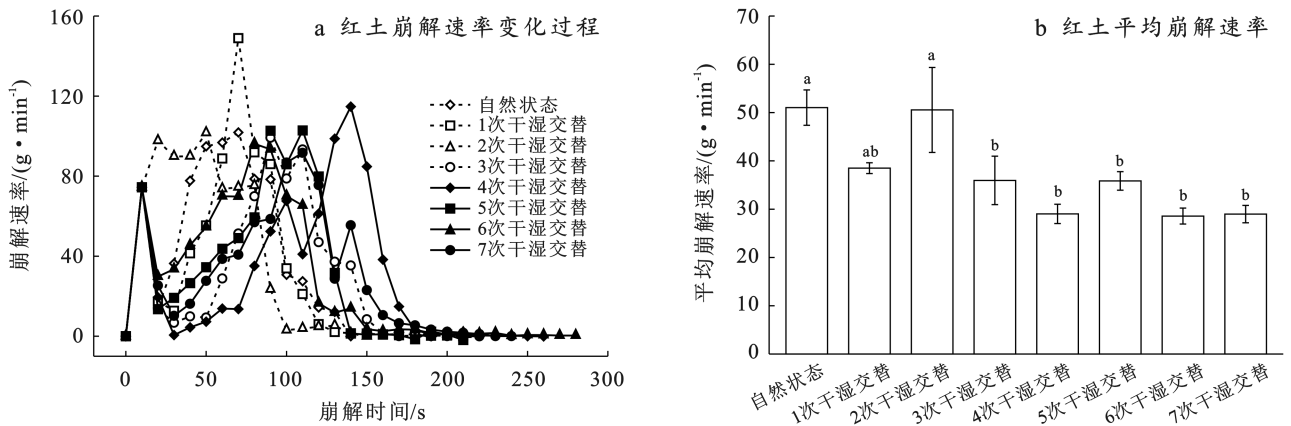


图 3 试验样区红土在不同干湿交替条件下的崩解指数

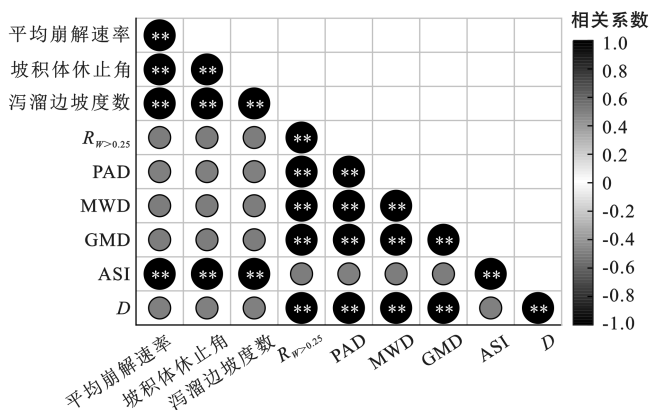
Fig.3 Disintegration index of different dry and wet alternating conditions of lateritic soil at study area



注:不同字母表示不同粒径百分比间差异显著($p < 0.05$)。

图 4 试验样区红土在不同干湿交替条件下的崩解速率

Fig.4 Disintegration rate of different dry and wet alternating conditions of lateritic soil at study area



注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关, ** 表示在 $p < 0.01$ 时显著相关。

图 5 试验样区红土平均崩解速率与红土性质相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between average disintegration rate of laterite and nature of laterite at study area

3 讨论

3.1 泻溜侵蚀与边坡坡度、坡积体休止角的关系

泻溜总是发生在高度风化的坡面,红土休止角对

泻溜边坡稳定性起关键作用,泻溜边坡坡度是泻溜侵蚀发生的控制性因素。本研究发现泻溜侵蚀边坡坡度集中分布在 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$,涂安千^[1]研究发现泻溜沟坡度集中分布在 $45^{\circ} \sim 70^{\circ}$,杨吉山等^[22]研究发现泻溜侵蚀多发生在 $55^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 土体高度风化的坡面,与前人研究较吻合。本研究结果表明泻溜侵蚀阴坡坡度分布范围小于阳坡,不同坡向的坡面泻溜侵蚀强度具有一定差别,这是由于阳坡温湿变化大于阴坡,土壤受风化作用侵蚀较阴坡强,因此阴坡坡度分布范围偏小。本研究也发现侵蚀边坡坡脚处多形成坡度 $25^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 的稳定坡积体,因此推测红土自然堆积角范围为 $25^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 。Dong Haoyu 等^[8]研究发现黄土休止角分布范围为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,说明红土抗剪强度大于黄土,然而事实上红土比黄土更易发生泻溜侵蚀,推测造成此现象的原因可能和红土裸露状况有关。红土黏粒含量高,未裸露在沟坡的红土黏性大,因此抗剪强度更大、抗侵蚀力更强;但由于红土水稳性大团聚体含量低、团聚体稳定性差,且裸露在外的红土频繁受干湿

交替、风力侵蚀等外界环境作用,抗蚀力大大下降,较黄土更易发生泻溜侵蚀。

3.2 泻溜侵蚀与红土团聚体稳定性的关系

土壤团粒结构体(粒径 >0.25 mm 的团聚体)的数量与土壤稳定性状况有关,能够反映土壤稳定性状况,是衡量土壤抗侵蚀能力的指标之一。平均重量直径和平均几何直径能够反映土壤团聚体大小分布状况,MWD 和 GMD 越大,团聚体平均粒径团聚度越高,稳定性越强。分形维数 D 能够客观反映土壤团聚体的结构特征、分布特征和稳定性, D 值越小,土壤质地越松散,土壤的结构与稳定性愈好。土壤水稳性团聚体破坏率反映土壤稳定性和抗蚀力,土壤水稳性团聚体破坏率越低,抗蚀性越强。ASI 可以表征团聚体稳定性,与 MWD 和 GMD 相似,ASI 值越高代表土壤结构越稳定,不同的是 ASI 还可以表征团聚体稳定性受扰动的动态变化过程^[23]。本研究结果显示红土湿筛大团聚体质量百分比远小于干筛大团聚体质量百分比,湿筛所得平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均显著低于干筛,反映了红土水稳性大团聚体含量低,稳定性差,抗蚀力低。湿筛分形维数 D 大于干筛,说明红土土壤组成主要是非水稳性团聚体,也说明从干筛到湿筛的转变过程中,红土结构变差,稳定性下降,抗侵蚀能力减弱。红土水稳性团聚体破坏率为 57.66%,陈琳等^[24]研究表明塬土 PAD 为 51.49%,姚俊红等^[25]研究表明黑土 PAD 大致为 27%,董天富等^[9]研究表明喀斯特地区黄壤 PAD 变化范围为 2.11%~8.21%、石灰土 PAD 变化范围为 3.44%~10.80%,均小于本研究结果,说明和其他土壤类型相比,红土稳定性和抗蚀力更低。红土 ASI 为 1.75,Chen Lin 等^[23]研究表明塬土 ASI 为 2.07~2.12,说明和塬土相比,红土水稳性团聚体更易发生扰动被破坏。综上结果表明,红土团聚体主要为非水稳性团聚体,和上述其他土壤类型相比稳定性更弱,易被分散与破坏,因此遇水极易崩解。

3.3 泻溜侵蚀与红土崩解特性的关系

红土崩解指数可表征红土试样整体崩解情况,红土最大崩解指数可表征崩解结束红土最终累积崩解质量。崩解速率反映土壤崩解的快慢,崩解速率越大,表示土壤在静水中分散、碎裂、塌落得越快,产生土壤侵蚀的概率越高^[26]。本研究发现红土崩解指数一时间曲线大致呈现 S 形,自然状态下崩解指数与崩解速率均大于干湿交替状态,该研究结果与王健等^[27]研究结果一致。这是由于随着干湿交替次数增加,红土紧实性增强,水分进入土体使土壤颗粒崩解的能力变弱,因此能够一定程度上减少泻溜侵蚀的发

生。但也有部分学者^[16,26]发现崩解指数一时间曲线大致呈现 L 形,可分为快速吸水阶段、高速崩解阶段、缓慢崩解阶段、完成崩解阶段 4 个阶段。红土崩解指数一时间曲线中自然状态与不同干湿交替次数条件下前 10 s 崩解指数相近且增长迅速,这是由于红土原状土取样时不可避免会对土壤表面造成一定扰动,产生一些松散颗粒,加之红土表层自带的松散颗粒,因此红土崩解指数在前 10 s 时近似且数值较大,但这并不影响后续自然状态与不同干湿交替条件之间红土崩解指数的差异。随着时间增加,浸水水位逐渐稳定,吸水面积渐渐稳定,红土崩解趋于稳定,因此崩解指数一时间曲线与崩解速率一时间整体上也呈现出越来越稳定的趋势,这与王念秦等^[28]的研究结论一致。本研究还发现随着干湿交替次数与崩解时间的增加,红土崩解指数与平均崩解速率变化趋势不明显,且 6 次干湿交替条件下崩解指数接近自然状态,推测造成此现象的原因可能有两个:①在高频次干湿交替处理下,红土内部性质遭到一定程度的破坏^[29],红土内部土壤在多次浸水条件下,会导致土样内部预固结应力释放,反而由原来的紧实状态变得松散,土壤内部裂纹数量和深度随之增加,因此造成崩解的增强^[30]。②红土黏粒含量较高,膨胀系数较大,因此土壤体积极易吸水易膨胀,表层失水损耗后底层水分补给很少,土壤体积迅速收缩^[1],干湿交替的不断进行使得红土发生相对位移,产生交错裂隙发生崩解。综上结果表明,干湿交替能够减弱红土崩解程度进而减少泻溜侵蚀的发生。

此外,本研究探究了红土崩解特性和团聚体特性、红土崩解特性和泻溜边坡特性之间的关系,斯皮尔曼相关性分析结果显示,红土平均崩解速率与 PAD, D 为负相关关系,与坡积体休止角、边坡坡度、 $R_{w>0.25}$,MWD,GMD,ASI 为正相关关系,与段青松等^[26]的研究结果一致,与泻溜坡积体休止角、泻溜边坡坡度数、ASI 呈现极显著正相关关系。上述结果表明,红土团聚体特性和泻溜边坡特性会对崩解产生一定影响,进而造成泻溜侵蚀的发生。

4 结论

(1) 坡面坡度是泻溜侵蚀发生的控制性因素之一,黄土台塬区泻溜边坡坡度 40° 以内很少发生泻溜,大于 80° 大大减弱。土壤休止角对边坡稳定性起着关键作用,红土与泻溜坡积体自然休止角范围为 $25^\circ\sim 36^\circ$ 。

(2) 红土团聚体组成大部分为非水稳性团聚体,团聚作用较弱,易被分散与破坏,因此遇水极易崩解。

红土团聚体干筛平均质量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)平均值分别为 2.16 和 1.37 mm,湿筛平均质量直径 MWD 与几何平均直径 GMD 平均值分别为 0.51 和 0.25 mm,团聚体破坏率 PAD 平均值为 57.66%,分形维数 D 平均值为 2.96,ASI 平均值为 1.75。

(3) 干湿交替通过减弱红土崩解程度而减少泻溜侵蚀的发生。自然状态条件下红土崩解程度最大,最大崩解指数为 81.79%、平均崩解速率为 51.03 g/min,发生泻溜侵蚀的概率较大;干湿交替条件下红土崩解程度较自然状态减小,能够降低泻溜侵蚀的发生概率;不同干湿交替条件之间红土最大崩解指数不同但差异性不显著。此外,红土平均崩解速率与泻溜坡积体休止角、泻溜边坡度数与 ASI 呈现极显著正相关关系($p < 0.01$)。

参考文献 (References)

- [1] 涂安千.“红土”陡坡的泻溜侵蚀及其防治[J].水土保持通报,1981,1(4):29-34.
Tu Anqian. Sluggish erosion of “red soil” steep slope and its prevention and control [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1981,1(4):29-34.
- [2] 曾伯庆,马文中,张治国,等.三趾马红土泻溜侵蚀规律研究[J].中国水土保持,1991(7):21-25.
Zeng Boqing, Ma Wenzhong, Zhang Zhiguo, et al. Study on erosion of slumping in sanzhim a red clay area [J]. Soil and Water Conservation in China, 1991(7):21-25.
- [3] 王斌科.海东黄土区的泻溜侵蚀[J].中国水土保持,1990(5):25-26.
Wang Binke. Lagoonal slip erosion in loess area of Haidong [J]. Soil and Water Conservation in China, 1990(5):25-26.
- [4] 段斯译,孙仲秀,王秋兵,等.不同土地利用方式下第四纪古红土有机碳分布特征研究[J].土壤通报,2021,52(5):1078-1084.
Duan Siyi, Sun Zhongxiu, Wang Qiubing, et al. Characteristics of soil organic carbon distribution of quaternary red soils under different land use patterns [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021,52(5):1078-1084.
- [5] 赵枝艳,张常亮,沈伟,等.黄土—古土壤饱和渗透性与孔隙分布特征关系研究[J].水文地质工程地质,2024,51(1):47-56.
Zhao Zhiyan, Zhang Changliang, Shen Wei, et al. Research on the relationship between saturated permeability and pore distribution characteristics of loess-paleosol [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024,51(1):47-56.
- [6] 李育鸿.黄土残塬区泻溜侵蚀土体水分物理性质研究[J].人民黄河,2018,40(8):96-98.
Li Yuhong. Research on hydro-physical properties of slumping erosion in remained loess area [J]. Yellow River, 2018,40(8):96-98.
- [7] 柴亚凡,周波,吕文强,等.人工模拟降雨条件下泻溜红土坡积体的侵蚀过程和入渗特征[J].中国水土保持科学,2019,17(1):10-15.
Chai Yafan, Zhou Bo, Lu Wenqiang, et al. Erosion process and infiltration features of red soil slumping slope sediment under artificial simulated rainfall condition [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(1):10-15.
- [8] Dong Haoyu, Wang Jiading, Zhang Dengfei, et al. Microscopic mechanism angle of repose in friable loess and its relationship with slope angle [J]. Frontiers in Earth Science, 2022,9:1381.
- [9] 董天富,邓志豪,杨静,等.喀斯特退耕地不同植被恢复阶段土壤团聚体稳定性特征[J].水土保持研究,2024,31(2):33-42.
Dong Tianfu, Deng Zhihao, Yang Jing, et al. Characteristics of stability of soil aggregates at different vegetation restoration stages in karst reclaimed land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):33-42.
- [10] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J].水土保持通报,2021,41(3):8-14.
Yang Zhenqi, Guo Jianying, Qin Fucang, et al. Soil aggregate stability and erodibility in different vegetation types of exposed feldspathic sandstone region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):8-14.
- [11] 李娟,韩霁昌,陈超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):248-253.
Li Juan, Han Jichang, Chen Chao, et al. Effects of land use types on soil aggregate characteristics in hilly-gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(1):248-253.
- [12] Pulleman M M, Six J, Van Breemen N, et al. Soil organic matter distribution and microaggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity [J]. European Journal of Soil Science, 2005,56(4):453-467.
- [13] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6):265-270.
Jiang Min, Liu Yi, Liu Chuang, et al. Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou

- Reservoir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(6):265-270.
- [14] 石辉.转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性[J].水土保持通报,2006,26(3):91-95.
Shi Hui. Using transition matrix to evaluate stability of soil aggregates [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006,26(3):91-95.
- [15] 张二芳,郝旺林,马奇美.黄土丘陵区生物结皮覆盖对土壤团聚体分布特征及稳定性影响[J].土壤通报,2023,54(3):606-613.
Zhang Erfang, Hao Wanglin, Ma Qimei. Effect of biological crust mulching on distribution characteristics and stability of soil aggregates in loess hilly region [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023,54(3):606-613.
- [16] 秦富仓,董晓宇,郭月峰,等.砒砂岩区不同植被类型土壤崩解特征及其影响因素研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2022,43(5):61-70.
Qin Fucang, Dong Xiaoyu, Guo Yuefeng, et al. Study on soil disintegration characteristics and influencing factors of different vegetation types in pisha sandstone area [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022,43(5):61-70.
- [17] 张晨晖,肖波,李胜龙,等.东北黑土区农田生物结皮的特征及其对表层土壤崩解的影响[J].应用生态学报,2022,33(7):1773-1782.
Zhang Chenghui, Xiao Bo, Li Shenglong, et al. Characteristics of biocrusts in croplands and their effects on surface soil disintegration in the black soil region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(7):1773-1782
- [18] He Ling, Deng Yusong, Tang Qiuyue, et al. Effects of the *Dicranopteris linearis* root system and initial moisture content on the soil disintegration characteristics of gully erosion [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(12):3548-3567.
- [19] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [20] 朱龙祥,范昊明,马仁明.冻融循环和土壤含水率对棕壤崩解特性的影响[J].土壤学报,2023,60(1):77-88.
Zhu Longxiang, Fan Haoming, Ma Renming. Effects of freeze-thaw cycles and soil water contents on disintegration characteristics of brown earth [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023,60(1):77-88.
- [21] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
Zhou Hu, Lü Yizhong, Yang Zhichen, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007,40(9):1973-1979.
- [22] 杨吉山,姚文艺,王玲玲.黄土沟道重力侵蚀规律及机理研究[J].人民黄河,2014,36(6):93-96.
Yang Jishan, Yao Wenyi, Wang Lingling. Study on the regularity and mechanism of gravity erosion in the loess gully [J]. *Yellow River*, 2014,36(6):93-96.
- [23] Chen Lin, Xu Feifei, Li Jiande, et al. Aggregate stability in rainfall-induced soil physical crusts on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022,86(3):528-539.
- [24] 陈琳,王健,宋鹏帅,等.黄土坡面结皮对土壤水稳性团聚体的稳定性和可蚀性的影响[J].中国农学通报,2020,36(18):87-92.
Chen Lin, Wang Jian, Song Pengshuai, et al. Loess slope crust: Effects on the stability and erodibility of soil water-stable aggregates [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020,36(18):87-92.
- [25] 姚俊红,武俊男,王呈玉,等.长期不同施氮量下黑土团聚体稳定性及有机碳含量的变化[J].农业环境科学学报,2024,43(1):102-110.
Yao Junhong, Wu Junnan, Wang Chengyu, et al. Changes in aggregates stability and organic carbon content of black soil following the use of different long-term nitrogen application rates [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024,43(1):102-110.
- [26] 段青松,保锐琴,黄广杰,等.澜沧江黄登水电站库周土壤的崩解特性[J].水土保持通报,2023,43(4):195-202.
Duan Qingsong, Bao Ruiqin, Huang Guangjie, et al. Soil disintegration characteristics around Huangdeng hydropower station reservoir on Lancang River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(4):195-202.
- [27] 王健,马璠,张鹏辉,等.干湿交替对黄土崩解速度的影响[J].土壤学报,2015,52(6):1273-1279.
Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015,52(6):1273-1279.
- [28] 王念秦,魏精瑞.陕西关中地区离石黄土崩解速率实验研究[J].工程地质学报,2015,23(5):954-958.
Wang Nianqin, Wei Jingrui. Experimental study on disintegration rate of Lishi loess in Guanzhong Region of Shaanxi Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015,23(5):954-958.

- [19] 王渝淞. 坝上地区生物结皮防治风蚀扬尘的试验研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
Wang Yusong. Experimental study on prevention and control of wind erosion and dust emission by biological soil crust in Bashang area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [20] 张泽宇, 马波, 李占斌, 等. 冻融交替作用对黄土高原三种典型土壤可蚀性影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 813-818.
Zhang Zeyu, Ma Bo, Li Zhanbin, et al. Influence of freeze-thaw alternation on the erodibility of three typical soils in the Loess Plateau [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(5): 813-818.
- [21] 肖俊波. 季节性冻融对土壤可蚀性影响的试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Xiao Junbo. Experimental study on the effects of seasonal freeze-thaw on soil erodibility [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [22] Yan Yuchun, Wu Lianhai, Xin Xiaoping, et al. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe in Northern China [J]. Geoderma, 2015, 249: 79-86.
- [23] 胡伟, 刘晓冰, 张兴义. 土壤结皮特性对风力侵蚀的影响[J]. 土壤与作物, 2023, 12(1): 88-95.
Hu Wei, Liu Xiaobing, Zhang Xingyi. Soil crust properties and their effects on wind erosion [J]. Soils and Crops, 2023, 12(1): 88-95.
- [24] 郭迎香. 冻融作用下黄土高原北部土壤物理结皮对沙黄土风蚀的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Guo Yingxiang. Effect of soil physical crust on wind erosion of sandy loess in northern Loess Plateau under freezing and thawing [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [25] 屈永昌. 冻融循环对土壤结皮抗冲击侵蚀能力影响的实验研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2019.
Qu Yongchang. Experimental investigations on the effect from freeze-thaw cycle to the anti-erosion ability of soil crust [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2019.
- [26] 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.
Ni Wankui, Shi Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922-927.
- [27] 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.
Wei Xia, Ding Yongjian, Li Xungui. Review and prospect of Freeze-thaw-induced erosion research [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(2): 271-275.
- [28] 杨会民, 王静爱, 邹学勇, 等. 风水复合侵蚀研究进展与展望[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 962-971.
Yang Huimin, Wang Jing'ai, Zou Xueyong, et al. Progress and prospect of research on wind-water complex erosion [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 962-971.
- [29] Wang L, Shi Z H, Wu G L, et al. Freeze/thaw and soil moisture effects on wind erosion [J]. Geomorphology, 2014, 207: 141-148.
- [30] Goossens D. Effect of soil crusting on the emission and transport of wind-eroded sediment: Field measurements on loamy sandy soil [J]. Geomorphology, 2004, 58(1/2/3/4): 145-160.

(上接第9页)

- [29] 宋鹏帅, 王健, 陈琳, 等. 干湿交替作用对关中地区塿土临界剪切力的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1731-1740.
Song Pengshuai, Wang Jian, Chen Lin, et al. Effect of dry-wet alternation on critical shear stress of Lou soil in the Guanzhong Area [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1731-1740.
- [30] 张素, 郑学用, 熊东红, 等. 干湿交替对干热河谷冲沟发育区不同土壤崩解性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 111-115.
Zhang Su, Zheng Xueyong, Xiong Donghong, et al. The influence of dry-wet alternation on the disintegration of different types of soil in gully development region of dry-hot valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 111-115.