关中地区塿土团聚体在薄层径流输移过程中的破碎特征

兰 敏，张永民，肖 波，刘智杰
（中煤西安设计工程有限责任公司，陕西 西安 710054）

摘 要：［目的］揭示塿土团聚体在薄层径流输移过程中的破碎特征，阐明团聚体初始粒径与输移距离对破碎程度及破碎产物粒径组成的影响，为团聚体侵蚀效应与坡面泥沙级配演变机制研究提供科学依据。［方法］以陕西省关中地区典型农地塿土为研究对象，采用全因子设计（8个粒级×3个输移距离，坡度10°，流量8 L/min）开展定床薄层径流输移模拟试验，以团聚体破碎系数（δ）表征剥蚀强度，并统计输移后各粒级质量分配以明晰破碎产物粒径分布。［结果］①试验条件下各粒级团聚体均发生不同程度破碎，δ值在0.06～0.91。②δ随初始粒级增大呈显著先降低后升高变化趋势，中间粒级（0.25～3 mm）破碎程度较低（δ值分别为0.21～0.29），而0.053～0.1 mm和＞5 mm粒级破碎程度相对更高（δ值分别为0.83，0.49）。③输移距离从1 m增至3 m时，δ整体增加，平均增幅为48.72%，表明薄层径流持续扰动会强化团聚体结构破坏。④各粒级团聚体破碎产物主要向次一级粒级与最细粒级（＜0.053 mm）汇集。［结论］塿土团聚体在薄层径流输移中存在显著的粒级选择性破碎，中间粒级抗性更强，而细小粒级与大粒级更易破碎并向“次一级粒级”与最细颗粒汇聚。

关键词：土壤团聚体；径流冲刷；粒径分布；团聚体破碎系数
文献标识码：A **文章编号：**1000-288X（2026）05-0044-10 **中图分类号：**S151.9^{+2}

文献参数：兰敏，张永民，肖波，等.关中地区塿土团聚体在薄层径流输移过程中的破碎特征[J].水土保持通报，2026，46（5）：44-53. Lan Min，Zhang Yongmin，Xiao Bo，et al. Fragmentation characteristics of Lou soil aggregates in Guanzhong region during thin-layer runoff transport [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（5）：44-53.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.015 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.05.015**

Fragmentation characteristics of Lou soil aggregates in Guanzhong region during thin-layer runoff transport

Lan Min，Zhang Yongmin，Xiao Bo，Liu Zhijie
（*China Coal Xi'an Design Engineering Co.，Ltd.，Xi'an，Shaanxi* 710054，*China*）

Abstract：［Objective］The fragmentation behavior of Lou soil aggregates during transport by thin-layer runoff was investigated in order to clarify the effects of initial aggregate size and transport distance on fragmentation intensity and fragment size distribution，and to provide a scientific basis for understanding aggregate erosion effects and hillslope sediment size distribution evolution.［Methods］Taking the typical agricultural soil（Lou soil）of the Guanzhong area in Shaanxi Province as the test soil，a full factorial experimental design（8 aggregate size classes× 3 transport distances）was adopted. Fixed-bed thin-layer runoff transport simulation experiments were conducted at a slope of 10° and a discharge of 8 L/min. Erosion intensity was characterized using the fragmentation coefficient（δ），and the post-transport mass distribution among size classes was determined to characterize the fragment size distribution.［Results］① Under the experimental conditions，δ ranged from 0.06 to 0.91，indicating that aggregates of all size classes underwent fragmentation to varying degrees. ② As the initial size of the aggregates

收稿日期：2025-11-20 **修回日期：**2026-04-16 **采用日期：**2026-04-30
资助项目：中煤西安设计工程有限责任公司科研项目“蒙陕矿区生态开发式治理技术研究”（20211CY001）
第一作者：兰敏（1981—），女（汉族），陕西省黄陵县人，硕士，高级工程师，主要从事矿区生态修复及水土保持工作。Email：463434728@qq.com。
通信作者：张永民（1981—），男（汉族），新疆维吾尔自治区库尔勒市人，本科，高级工程师，主要从事矿区生态修复及水土保持工作。Email：283444969@qq.com。

increased, δ followed a distinct trend of initially decreasing and then increasing. Intermediate aggregates (0.25～3 mm) fragmented less (δ: 0.21～0.29), whereas higher fragmentation was observed in the 0.053～0.1 mm (δ: 0.83) and >5 mm (δ: 0.49) fractions. ③ Increasing the transport distance from 1 to 3 m resulted in an overall increase in fragmentation, with an average increase in δ of 48.72%. This indicated that continued disturbance by thin-layer runoff intensified aggregate structural damage. ④ Fragment redistribution was dominated by transfer to the immediately smaller size class and to the finest fraction (<0.053 mm). [Conclusion] Lou soil aggregates show pronounced size-dependent fragmentation during thin-layer runoff transport. Intermediate-sized aggregates (0.25～3 mm) show greater resistance, whereas both finer and coarser aggregates are more susceptible to fragmentation, with fragments tending to accumulate in the immediately smaller size class and the finest fraction.

Keywords: soil aggregates; runoff scouring; particle size distribution; aggregate fragmentation coefficient

水蚀是耕地退化和农业面源污染的重要驱动过程之一[1-3]。在降雨-径流作用下,土壤颗粒及其携带的养分/污染物发生选择性分离与输移,进而引起耕层质地粗化、肥力下降以及受纳水体营养盐负荷升高等环境风险[4-6]。土壤团聚体是土壤结构的基本组成单元,也是有机质等养分的重要赋存载体[7-9],其稳定性作为表征土壤结构抗扰动能力的重要指标,在很大程度上决定着土壤对径流剪切的抵抗能力,并直接影响产沙级配及吸附态物质的迁移输出[10-12]。因此,揭示团聚体在径流输移过程中的破碎行为及其引起的级配重构规律,是深化坡面水蚀机理认识并服务水土流失与面源污染过程模拟的重要基础。

土壤分离和泥沙输移是坡面水蚀过程最重要的两个子过程,其中输移阶段不仅决定产沙通量,还可能通过团聚体破碎改变泥沙粒径组成,从而影响后续沉积分选与携带物质输出。目前,关于不同流量、坡度、地表覆盖等条件下的坡面径流分离能力、输沙能力以及分离-输沙互馈研究已较为丰富,径流对颗粒(团聚体)选择性分离与输移机制也受到了广泛关注[13-17]。然而,在一些过程概化与模型参数化处理中,输移阶段常被作为相对简化的搬运过程处理,团聚体在输移中的破碎及粒径重构影响未被充分显式化,这一处理可能低估细粒生成及其相关输出贡献。事实上,团聚体在径流输移过程中会受到床面粗糙度、流体扰动以及颗粒-床面、颗粒-颗粒碰撞等作用而发生剥蚀、开裂及分解,进而改变粒径组成与细粒生成比例[18-21]。由于细粒(尤其粉黏粒级)往往具有更强的吸附与迁移能力,输移阶段的破碎过程可能增大细粒与吸附态养分及污染物的输出贡献,进而影响对面源污染形成机制及其过程模拟的解释精度。

国内外学者已对径流输移条件下的团聚体破碎现象开展了一定研究。早期研究中,Makkaveev[18]研究发现径流中颗粒/团聚体之间的碰撞会显著加速其自身破碎。Larionov等[19]在栗钙土研究中发现,大粒径团聚体在随径流运移初期可快速破碎,并随着输移距离增加呈现形态趋圆的变化特征。近年来,王军光[20]、余冰等[21]、Wang Junguang等[22]、张茜等[23]基于水槽冲刷试验,研究了中国南方红壤区和北方黑土区土壤团聚体在径流输移过程中的破碎特征,并以破碎产物>0.25 mm质量与初始团聚体质量之比为指标,量化了7～5 mm,5～3 mm,3～1 mm等粒径团聚体在径流输移过程中的破碎程度。总体来看,现有研究为认识径流输移阶段团聚体破碎奠定了重要基础,但仍存在以下两方面不足:①既有研究多聚焦毫米级团聚体,<1 mm粒级团聚体在径流输移中的破碎规律及其与大粒径团聚体间的差异响应仍有待进一步厘清;②现有研究对破碎产物的表征维度相对有限,多侧重某一阈值粒级以上的残留比例或单一指标,对输移破碎产物的粒径分配及由此引起的级配重构特征缺乏系统量化。这些不足限制了对坡面泥沙级配演变与颗粒级配响应机制的理解,也在一定程度上制约了坡面水蚀模型中泥沙输移-破碎-级配重构过程的参数化表达。

塿土是陕西省关中地区及周边区域典型且分布最广的农业耕作土壤,耕地面积比例高且支撑关中地区粮食生产,对区域农业可持续与土壤质量维持具有重要意义[24]。同时,塿土受长期耕作与施肥(土粪堆垫等)等人为活动影响显著,具有黄土性母质,土体深厚及较高碳酸盐含量等特征。这些因素共同塑造了其团聚体的胶结类型与结构稳定性,使其在径流扰动下的解体与粒径重构过程可能不同于南方红壤、北方黑土等土壤区。识别塿土团聚体在薄层径流输移过程中的破碎和级配重构过程,对于完善坡面水蚀输移阶段机理认识及模型参数化具有现实意义。基于此,本研究以陕西省关中典型土壤塿土为对象,采用室内定床薄层径流输移模拟试验,构建全因子设计(8个初始粒级×3个输移距离),以团聚体破碎系数δ定量表征破碎程度,并统计输移后破碎产物的粒径分布组成,主要研究目的为:①破碎程度是

否表现出显著的粒级效应。②输移距离增加是否引起破碎程度的累积增强效应,以及该增强幅度的量化特征。③破碎产物粒径分配是否呈现明确的级配重构规律。研究结果可为揭示团聚体侵蚀效应与坡面泥沙级配演变机制提供依据,并为构建基于颗粒级配响应的坡面水蚀过程模型提供数据支撑,同时对坡面水土流失控制与流域面源污染治理具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

供试土壤取自陕西省杨凌农业高新技术产业示范区(107°59′—108°08′E,34°14′—34°20′N)典型农地(玉米地),该区属大陆性季风半湿润气候,多年平均气温12.9 ℃,多年平均降水量为635.1 mm,超过60%的降水集中在6—9月。研究区分布有7个土壤类型,以垆土为主(约占70%),母质为黄土性沉积物。本研究选取垆土为供试土壤,土样采集深度为0—20 cm,采样时间为2024年4月,室内试验于同年5—7月完成。供试土壤黏粒、粉粒、砂粒含量分别是28.2±0.04%,41.6±0.05%,30.2±0.04%,有机质含量为21.35±1.36 g/kg,pH值为8.16,$CaCO_3$含量为74.08 g/kg。土样团聚体粒径分布特征(干筛法)详见表1。

表1 供试土壤团聚体粒径分布特征

Table 1 Characteristics of particle size distribution of experimental soil aggregates

粒径/mm	>5	3~5	2~3	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	0.053~0.1	<0.053
占比/%	11.6	10.0	8.9	15.5	16.9	16.0	13.0	7.7	0.3

1.2 试验设计

本研究采用全因子设计,以初始团聚体粒级与输移距离为两因素:8个初始粒级×3个输移距离,共24个处理,每处理重复3次,共72场试验。试验坡度固定为10°,径流流量固定为8 L/min。①初始团聚体粒级设置。通过干筛法将初始团聚体划分为8个粒级:>5 mm,3~5 mm,2~3 mm,1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm,0.1~0.25 mm,0.053~0.1 mm。>0.25 mm粒级体系沿用标准筛系(5,3,2,1,0.5,0.25 mm),以保证分级结果与常规土壤结构评价及既有研究具有可比性。在此基础上增设0.1 mm与0.053 mm筛级,用于细化微团聚体(0.053~0.25 mm)内部粒级并统计输移破碎过程中<0.053 mm细粒的生成,从而提高对破碎产物粒径分配与级配重构的辨识度;同时,0.053 mm分级设置亦便于与有机碳粒径功能分组(矿物结合态有机碳/颗粒态有机碳)的操作性划分衔接,为后续侵蚀环境效应研究提供粒径基础。②坡度、流量与输移距离设置。试验采用定床薄层径流输移,以表征坡面薄层径流输移阶段的团聚体破碎过程。坡度设为10°,流量设为8 L/min,用于在定床条件下形成稳定连续的薄层径流,并保证团聚体颗粒稳定输移,不发生沉积。坡度与流量在本研究中作为控制条件固定设置,旨在在相对恒定的水动力条件下研究团聚体初始粒级与输移距离对破碎与产物分配的影响。本研究"团聚体输移距离"定义为团聚体从投放点至出水口收集位置沿槽底中心线的距离,设置为1,2,3 m以构建输移历程梯度。1,2,3 m段径流剪切力分别为3.93,3.89,3.95 Pa(p>0.05),表明不同距离处理间水动力条件基本一致。

1.3 试验装置

试验在长4.0 m,宽0.2 m,深0.2 m的变坡钢制水槽中进行(中国科学院水利部水土保持研究所仪器设备厂制作)。该装置由冲刷槽、溢流槽、供水系统、液压油缸、尾门等组成。坡度通过液压油缸调节水槽倾角实现,试验前将冲刷槽调整至设定坡度并锁定,每场试验前用电子倾角仪核验坡度一致性。冲刷槽的侧面和底面均采用8 mm厚的透明有机玻璃构成,两侧用方形钢管进行固定以防止玻璃受力变形。为实现定床条件并模拟与试验土壤表面相近的下垫面粗糙度,参照定床水槽试验常用做法,先在槽底均匀涂覆黏结剂(油漆),再撒布一层供试土壤颗粒作为粗糙元并轻压固着,待完全固化后形成稳定粗糙床面[22,25-28]。该床面为非可蚀固定床面,试验过程中不参与供沙,出水口收集颗粒主要来源于投放团聚体的输移破碎产物。每场试验结束后对床面进行冲洗与检查;若发现局部脱落或磨损,则按相同方法补涂,固化稳定后再开展下一场试验。供水系统由储水桶、水泵、流量计、阀门、水管和溢流槽组成。试验采用自来水供水,试验过程中利用水泵从储水桶中抽用自来水,并保证供水系统有稳定水头。供水流量通过流量计监测、阀门调节大小,水流经水管流入溢流槽,溢流槽中间隔有穿孔的挡板,以保证水流稳定流入冲刷槽中。每次试验前要进行流量率定,保证实际流量等于设计流量(误差不超过5%)。

1.4　试验过程与测定方法

(1)初始团聚体制备。供试土壤风干过8 mm筛以除去草根、石粒等杂质。采用干筛法得到各粒级团聚体样品(>5 mm,3~5 mm,2~3 mm,1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm,0.1~0.25 mm,0.053~0.1 mm),并将其置于50 ℃的烘箱内烘干至恒重备用。本研究以干筛获得的结构性团聚体作为初始粒级,以获得可控的粒径谱并尽量保留原有结构。考虑到结构性团聚体胶结机制可能存在差异(如有机质-黏粒桥联等),为减弱快速润湿引起的额外结构破坏,试验前采用乙醇预湿处理[20-23]。

(2)输移试验及输移后颗粒收集、筛分与称重。试验开始前先开启供水系统并稳流约1 min,使水流在溢流槽穿孔挡板整流后稳定进入冲刷槽。本研究水槽物理长度为4.0 m,在各场次保持不变,输移距离梯度通过改变投放点至出水口的有效输移距离实现。为实现1,2,3 m输移距离,在槽内沿中心线设置3个固定投放点(至出水口距离分别为1,2,3 m),各场次均在对应投放点沿槽宽中心线缓慢投放,以保证投放位置与方式一致、减少横向偏差。每一场次试验中,称取约20 g(精确到0.01 g)对应粒级团聚体,置于盛有约50 ml乙醇(质量分数95%)的铝盒中浸泡30 min后,用装有乙醇(质量分数95%)的洗瓶将铝盒中的团聚体缓慢洗入主流区,开始输移试验。乙醇预湿的目的在于降低快速润湿导致的额外结构破坏,乙醇用量与操作在各场次保持一致,进入水槽后迅速被水流稀释。在每个试验日开始时采用高锰酸钾染色法测定径流流速(10次重复),用于核验稳流状态与水力参数一致性。与此同时,在水槽低端出水口处使用单团聚体湿筛仪(含桶和套筛)收集输移后的颗粒。套筛筛孔径由上至下分别为5,3,2,1,0.5,0.25,0.1和0.053 mm,试验过程中所需套筛个数根据供试土壤团聚体粒级确定。如进行0.25~5 mm土壤团聚体输移试验时,仅需将0.250,0.100和0.053 mm这3个筛子自上而下组成套筛。收集时将套筛置于盛水桶内轻微上下晃动约15 s,以促使颗粒按照粒级有效分离,保证结果准确度。而后,各筛层滞留颗粒分别洗入铝盒中,并用酒精燃烧法将样品烘干至恒重(精确至0.01 g)。通过<0.053 mm筛的组分为筛下悬浮/沉降物,收集桶内水样混合物进行全量过滤,将滤膜连同截留物烘干至恒重后称量,用于获得<0.053 mm颗粒的质量。试验过程中持续观察颗粒输移状态,若出现明显滞留/局部淤积影响输移历程判别,或出现异常床面供沙,则该场次作废并重做。为保证各场次试验床面粗糙度一致,每场次试验结束后用清水冲洗玻璃槽底与侧壁,清除槽内可能残留颗粒与附着物,并检查固定粗糙床是否出现局部脱落或明显磨损;若发现床面局部破坏,则对该部位重新涂覆黏结介质并撒布供试土壤进行补涂,待表面稳定后再开展下一场试验。

1.5　指标计算

本研究利用团聚体破碎系数表征输移过程对初始粒级团聚体的破碎程度,团聚体破碎系数值越大,表征输移过程对土壤团聚体的破碎程度越严重。计算公式为

$$\delta=(B_i-W_i)/B_i \tag{1}$$

式中:δ为团聚体破碎系数(无量纲);B_i为i粒级供试团聚体的质量(g)(i的取值分别为:>5 mm,3~5 mm,2~3 mm,1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm,0.1~0.25 mm,0.053~0.1 mm);W_i为经输移破碎后i粒级团聚体的质量(g)。

1.6　数据处理与作图

本研究采用Excel(2016版)、SPSS(IBM SPSS Statistics 26版)软件进行数据分析,采用单因素方差分析(ANOVA)进行显著性检验,采用Origin 2024b软件绘图。

2　结果与分析

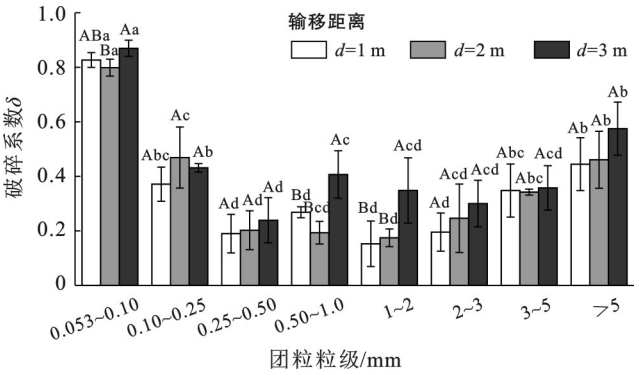
2.1　初始粒级与输移距离对团聚体破碎系数δ的影响

不同初始粒级土壤团聚体在各输移距离下的破碎系数δ值如图1所示。试验条件下δ值均小于1(范围:0.06~0.90),表明所有粒级团聚体在薄层径流输移过程中均发生了不同程度的破碎。总体上,δ值随初始粒级呈显著的非线性变化。由0.053~0.1 mm增至0.25~2 mm区间δ值明显降低,随后在>3 mm区间回升,表现为中等粒级最低、两端较高的特征(图1,表2)。其中,0.053~0.1 mm初始粒级的δ值最高(δ平均值:0.83),>5 mm次之(δ平均值:0.49);0.25~0.5 mm与1~2 mm初始粒级的δ值最低,δ平均值分别为0.21,0.23。说明在本试验条件下,0.053~0.1 mm粒级的团聚体在薄层径流输移过程中破碎程度最大,而0.25~0.5 mm与1~2 mm粒级团聚体的抗破碎能力相对更强。进一步分析输移距离对破碎系数δ的影响发现,各粒级δ值整体随输移距离增加而增大,且不同区间的增幅存在差异(图1)。输移距离从1 m增至2 m时,δ值的平均增幅为15.15%(表3);从2 m增至3 m时,δ值的平均增幅升至42.83%,约为前一距离区间的2.8倍(表3)。从不同粒级来看,0.5~3 mm初始粒级下δ值的距离效应

更为显著，尤其0.5～1 mm和1～2 mm团聚体在输移距离从2 m至3 m时增幅超过110%，表明这些粒级范围团聚体对输移历程延长更为敏感（表3）。

2.2 团聚体破碎产物的粒径转移路径与细粒生成特征

各初始粒级团聚体在不同输移距离下的破碎产物粒径分配如图2—4所示。为避免原粒级保留比例对粒径组成判读造成干扰，本节对破碎部分进行归一化处理，即以破碎量（$B_i - W_i$）为分母统计破碎产物在各粒级间的百分比分配。总体上，破碎产物呈现清晰的粒径下移与端点汇聚特征，即最细粒级（<0.053 mm）与次一级粒级共同构成主要的粒径转移路径，而其余中间粒级的比例普遍较低且差异多不显著（$p>0.05$）。



注：不同的小写字母表示同一输移距离下不同团聚体粒级间破碎系数存在显著性差异（$p<0.05$），不同的大写字母表示同一团聚体粒级在不同输移距离下的破碎系数存在显著性差异（$p<0.05$）。

图1 不同初始粒级团聚体在不同输移距离下的破碎系数

Fig.1 Fragmentation coefficient of soil aggregates of different initial size classes at different transport distances

表2 试验条件下各初始粒级团聚体的平均破碎系数（δ）

Table 2 Average fragmentation coefficient (δ) of soil aggregates of different initial size classes under experimental conditions

粒径	0.053～0.1 mm	0.1～0.25 mm	0.25～0.5 mm	0.5～1 mm	1～2 mm	2～3 mm	3～5 mm	>5 mm
δ	0.83^{a}	0.42^{c}	0.21^{d}	0.29^{cd}	0.23^{d}	0.25^{cd}	0.35^{cd}	0.49^{b}

注：各粒级团聚体的δ值为3个输移距离（1,2,3 m）结果的平均值；不同的小写字母表示不同团聚体粒级间破碎系数存在显著性差异（$p<0.05$）。

表3 输移距离为1~3 m间土壤团聚体破碎系数增长率特征

Table 3 Characteristics of aggregate fragmentation coefficient increase rate for transport distances from 1 m to 3 m

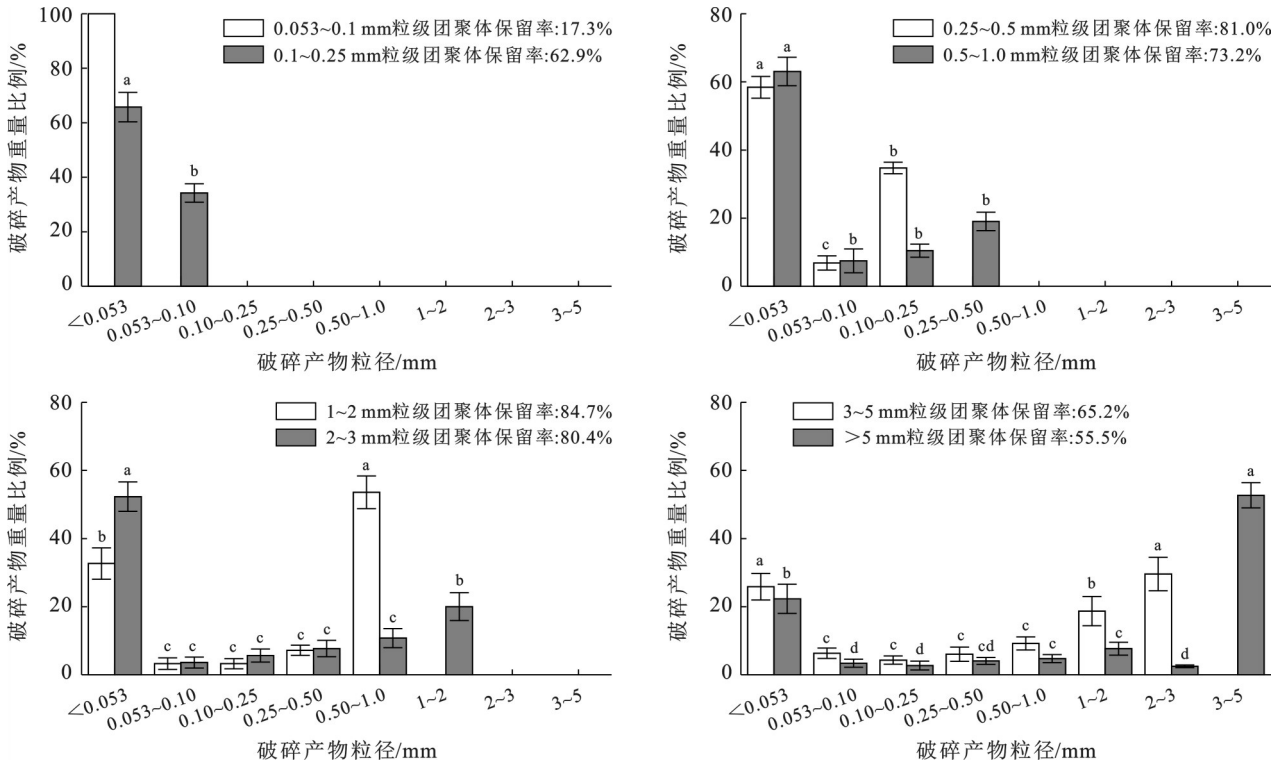
单位：%

输移距离/m	土壤团聚体破碎系数								
	0.053～0.1 mm	0.1～0.25 mm	0.25～0.5 mm	0.5～1 mm	1～2 mm	2～3 mm	3～5 mm	>5 mm	平均值
1～2	−3.38	25.32	8.02	−26.89	72.47	35.38	3.95	6.29	15.15
2～3	9.08	−4.02	22.80	121.04	110.53	51.46	4.11	27.63	42.83
1～3	5.28	18.50	29.3	51.66	166.44	71.56	9.78	37.16	48.72

在输移距离为1 m的条件下，有超过4/5的0.053～0.1 mm粒级团聚体在输移过程中破碎为<0.053 mm颗粒（图2）；0.1～0.25 mm团聚体在输移过程中有约2/3保持原粒级，破碎产物主要分配于<0.053 mm（65.77%）与0.053～0.1 mm（34.23%）两个粒级。随着初始粒级增至0.25～0.5 mm与0.5～1 mm，<0.053 mm仍为首要去向（分别为58.42%与63.06%），同时出现一定比例的次一级粒级贡献，如0.25～0.5 mm主要转移至0.1～0.25 mm，0.5～1 mm主要转移至0.25～0.5 mm。对于1～2 mm团聚体，其破碎产物在1 m输移距离下以次一级粒级0.5～1 mm为主（53.59%），<0.053 mm次之（32.68%），显示该粒级破碎更倾向于阶段性下移而非直接细化至最细粒。进入更粗粒级（≥2 mm）后，破碎产物除仍有一定比例进入<0.053 mm外，更显著地向次一级粒级集中。其中，2～3 mm以1～2 mm（20.00%）为主要“下移端”，3～5 mm以2～3 mm（29.60%）为主要“下移端”，而>5 mm则以3～5 mm为最主要破碎产物（52.70%）。综合来看，薄层径流输移条件下的团聚体破碎并非简单整体细化，而是同时存在直接细化至<0.053 mm的端点路径与逐级下移至次一级粒级的阶梯路径，两类路径的相对贡献随初始粒级而发生变化。

当输移距离由1 m增至2 m和3 m时，破碎去向的基本格局保持不变，即团聚体多数破碎为次一级粒级和最小粒级颗粒（图3—4）。对<1 mm的细粒级团聚体而言，<0.053 mm粒级的破碎产物始终保持主体地位，如初始粒级为0.1～0.25 mm团聚体其破碎产物中<0.053 mm的比例由65.77%升至73.35%～74.25%，说明输移历程延长使得破碎产物进一步向细粒端点汇聚。对1～2 mm团聚体而言，破碎产物由“次一级主导”逐步转向“最细粒主导”，即<0.053 mm的比例由32.68%升至54.02%与70.11%，而0.5～1 mm的比例则由53.59%降至

36.78%与24.71%,说明随输移历程延长,该粒级发生更为充分的二次破碎与细粒生成。相对而言,对≥2 mm的粗粒级团聚体,其破碎产物随输移距离的增加更突出地表现为"次一级粒级"所占比例的累积增长,如2～3 mm向1～2 mm的转移比例由20.00%增至33.60%与42.67%;3～5 mm向2～3 mm的转移比例由29.60%增至45.19%并保持在较高水平。总体来看,输移历程延长并不改变主要破碎路径类型,但会强化不同粒级破碎产物的主导去向,即细粒级团聚体更倾向于向最细粒端点汇集,粗粒级团聚体则更表现为逐级下移的累积效应,二者共同驱动输移过程中泥沙级配的持续重构。



注:①破碎产物重量比例按破碎量归一化;②保留率(W_i/B_i)指破碎后i粒级团聚体质量(W_i)与i粒级供试团聚体质量(B_i)之比;③不同小写字母表示该初始粒级下不同破碎产物粒级的重量比例存在显著性差异($p<0.05$)。下同。

图2　1 m输移距离下不同初始粒级团聚体破碎产物的粒径分配

Fig.2　Size redistribution of fragments from aggregates of different initial size classes at a transport distance of 1 m

3　讨　论

3.1　不同初始粒级团聚体在径流输移过程中的破碎特征

土壤团聚体在径流输移阶段的破碎会直接改变侵蚀泥沙粒径组成,进而影响颗粒态与吸附态物质的迁移输出行为。本研究发现,不同初始粒级团聚体在径流输移过程中表现出差异显著的破碎特征:小粒级(<0.25 mm)和大粒级(> 3 mm)团聚体的破碎程度较高,而中等粒级(0.25～3 mm)团聚体的破碎程度较低,团聚体破碎系数δ随初始团聚体粒径呈明显地先降低后升高的非线性趋势(图1,表2)。该结果表明,团聚体在径流输移过程中的稳定性并非随粒径单调变化,而更可能受到由团聚体结构层级与胶结方式所决定的内在抗扰动性,以及由输移过程中受力模式所决定的外部扰动强度共同调控。

在团聚体形成与胶结机理层面,团聚体的形成涉及颗粒间的物理嵌挤、化学桥联及生物作用的共同黏结过程[7-9],其中黏土矿物、有机质及微生物代谢产物等胶结物质对团聚体结构稳定性具有重要作用[7-9,29-32]。已有研究[8-9,30-33]表明,不同粒级团聚体在主导团聚机制上存在差异,直径> 0.25 mm的团聚体主要通过细根和真菌丝连接的有机胶结形成,而0.05～0.25 mm和0.002～0.05 mm团聚体则多由持久性有机质、结晶氧化物和非晶型铝硅酸盐等结合而成。

大粒径团聚体往往结构更疏松、内部孔隙发育且粗颗粒骨架比例更高,这使得其胶结物质的分布和结合较为松散,在径流作用下表现出较高的破碎风险。而小粒径团聚体(<0.25 mm)由于比表面积大,胶结物质结合力相对弱[34],也容易在水流作用下解体,尤其是当有机胶结物质较少时[33,35]。

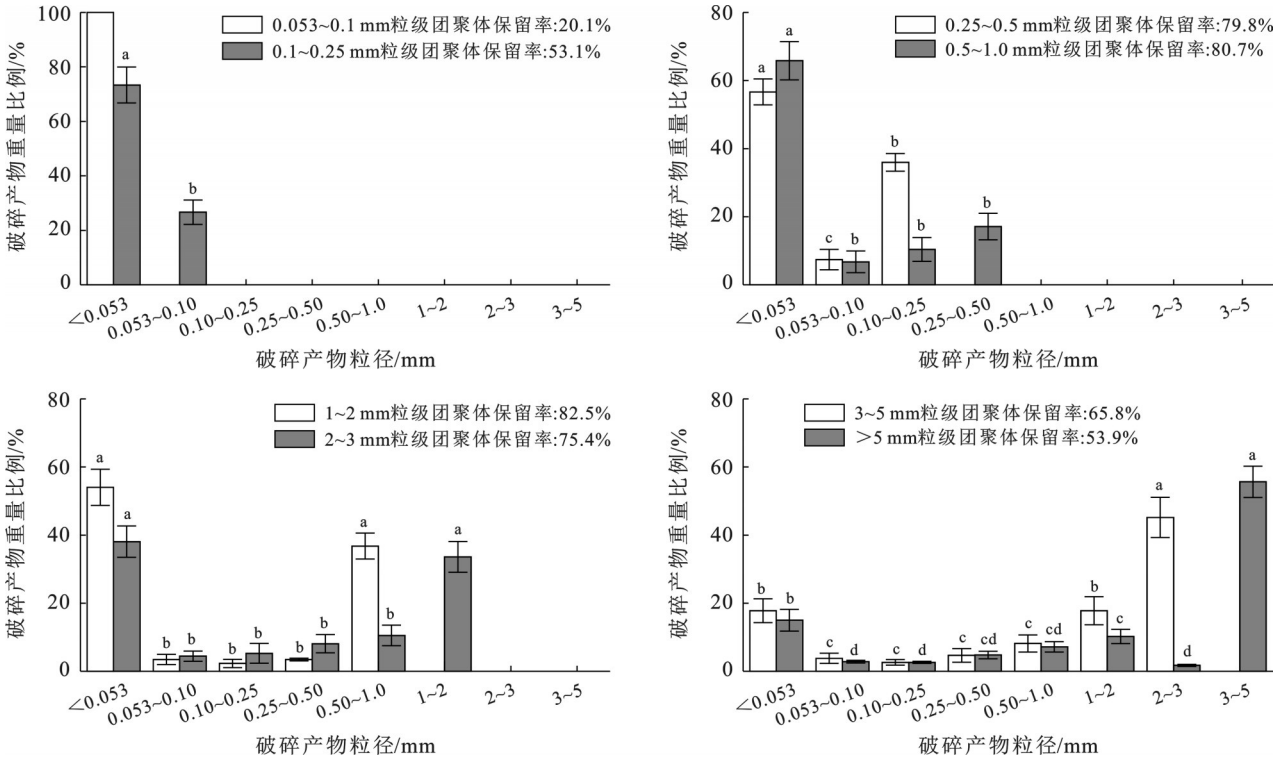


图3 2 m输移距离下不同初始粒级团聚体破碎产物的粒径分配

Fig.3 Size redistribution of fragments from aggregates of different initial size classes at a transport distance of 2 m

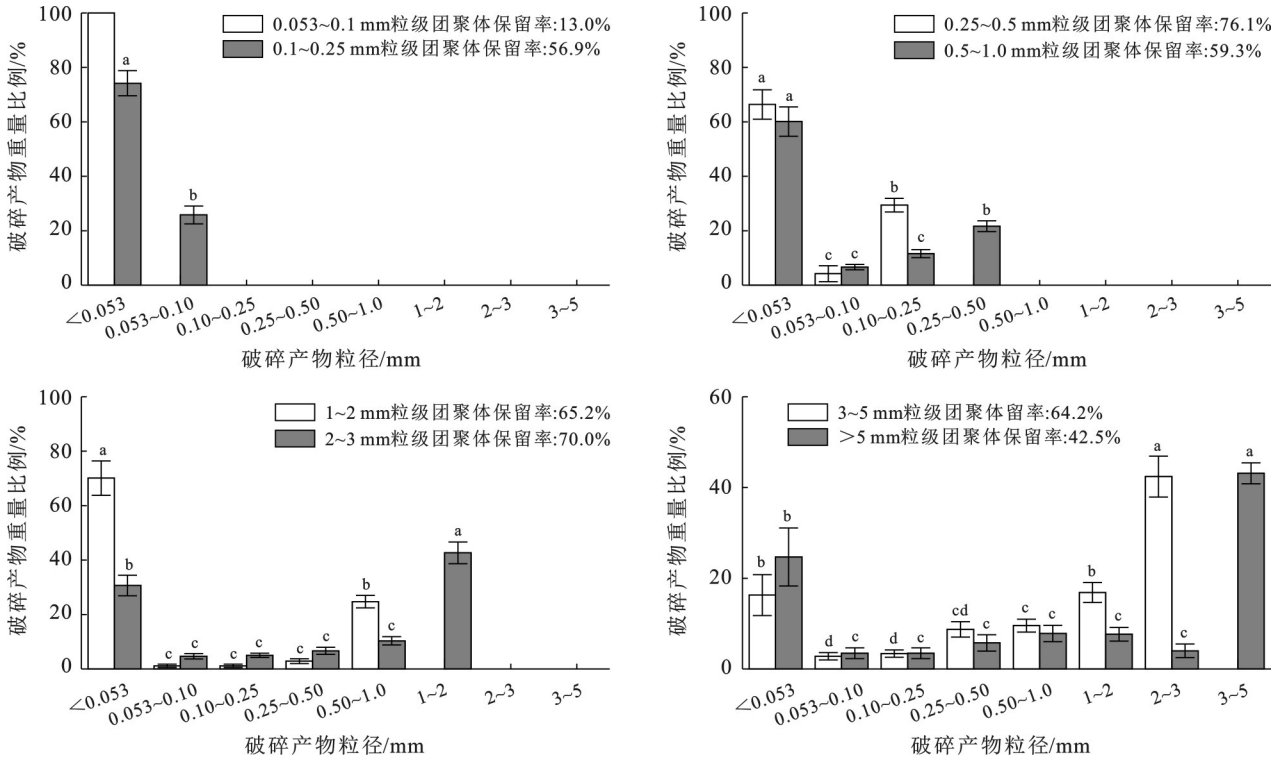


图4 3 m输移距离下不同初始粒级团聚体破碎产物的粒径分配

Fig.4 Size redistribution of fragments from aggregates of different initial size classes at a transport distance of 3 m

相比之下,中等粒径的团聚体(尤其0.25~2 mm)可能在结构完整性与多点胶结程度上处于一个“稳定阶段”,因此在本研究径流输移条件下呈现出更低的破碎程度(图1,表2)。

本研究供试壤土来源于黄土性沉积物母质,粉粒和黏粒含量较高(41.6%,28.2%),pH值偏碱(8.16)且碳酸盐和有机质含量较高(74.08 g/kg,21.35 g/kg)。这种特征决定了团聚体胶结除有机质

与黏粒桥联作用外,碳酸盐桥联与粉粒骨架效应亦可能在结构稳定性中占据重要位置。在长期耕作扰动背景下,这类团聚体内部往往呈现多尺度孔隙与弱界面并存特征,从而使稳定性对粒级的响应更易表现为非线性。本研究结果显示,中等粒级(0.25~3 mm)团聚体更可能具备相对紧密的颗粒堆积和多点胶结,具有受力更均匀的结构单元,因而在相同水动力扰动下δ值更低。相对而言,0.053~0.1 mm微团聚体尺度更接近基本颗粒集合体,胶结点数量有限,输移扰动下更易发生解体并向最细粒端点转化。>5 mm大团聚体则常伴随更发育的内部孔隙与潜在裂隙,在推移与滚动输移过程中与定床粗糙面的碰撞磨耗更强,易诱发裂隙扩展与结构破碎,从而导致δ再次升高。

除结构与胶结差异外,不同粒级在薄层径流中的主导输移方式不同,也会改变其与床面的接触频率、碰撞磨耗强度及受力集中程度,从而影响破碎机制。大粒径团聚体多以推移和滚动形式输移,与粗糙床面持续接触并反复碰撞,磨耗与剪切更强,因而更容易发生开裂并向次一级粒级转化。小粒径团聚体更多表现为跃移与短时悬移,与床面的强碰撞相对较少,但其破碎更可能以边缘磨蚀与局部解体为主,细粒释放更充分,从而提高<0.053 mm组分的生成比例。中等粒径团聚体由于结构完整性与胶结程度较高,输移受力相对均匀,破碎风险最低。类似的结论也被先前研究者发现[22]。已有研究[21]提示,径流水深与粒径之间的关系也可能改变团聚体运移状态并影响粒径与破碎程度之间的关系。例如,研究发现当径流水深<0.4 mm时,团聚体粒径越大,破碎程度越高;而当径流水深> 0.4 mm时,情况则相反[21]。本研究仅设置单一流量条件,难以进一步分离水深变化对输移方式与破碎响应的影响,后续仍需通过多流量梯度试验开展系统研究。

本研究结果表明,各粒级团聚体输移破碎后的产物多集中在次一级粒级与最小粒级(<0.053 mm)(图2—4)。从团聚体形成层级视角看,产物向次一级粒级集中,表征高一级团聚体更易沿层级界面/弱胶结面发生逐级解体;而产物向<0.053 mm端点汇聚,则反映微团聚体或胶结点有限结构的进一步瓦解与细粒释放。不同初始粒级在两条路径上的比例差异,可能受其主导胶结方式与结构层级共同影响。该结果与团聚体"逐级形成-逐级解体"的层级结构认识相一致[35-36]。这一粒径转移特征表明,输移阶段不仅改变团聚体的破碎程度,也会驱动泥沙级配重构并提高细粒组分比例。由于最细粒级通常具有更高的比表面积与更强的吸附潜势,输移破碎行为导致的细粒汇集可能在不显著改变总产沙量的情况下,显著改变吸附态养分或污染物的输出结构,从而影响侵蚀过程的环境效应。

3.2　输移距离对土壤团聚体破碎特征的影响

本研究发现,不同粒级团聚体破碎程度随输移距离增大而增大(图1,表3),这与先前研究者的结论类似[19,22-23]。如Wang Junguang等[22]通过研究不同距离(9,18,36,54,72和108 m)条件下团聚体输移破碎特征时,发现破碎程度随输移距离呈现先增大后降低趋势,36~72 m是趋势转折点。Larionov等[19]将团聚体在输移过程中的剥蚀划分为两个阶段:第一阶段,团聚体在被径流输移初期,其形状由不规则逐步剥蚀变圆,并破碎释放小粒径颗粒,剥蚀破坏程度较高;第二阶段,由于团聚体形状变规则(近圆或椭圆)、质量减小,与坡面碰撞摩擦的几率变小,剥蚀破坏程度逐步降低。本研究中,输移距离从2 m增至3 m,团聚体破碎系数δ值平均涨幅为42.83%,是输移距离1~2 m条件下的2.8倍(表3)。这种差异可能与本研究的输移距离较短有关,团聚体仍可能主要经历碰撞磨耗与弱界面开裂逐步增强的过程,尚未进入明显的破碎钝化阶段,因此在2~3 m阶段出现更大的δ增幅并不与长距离研究相矛盾。此外,土壤团聚体本身性质也可能影响破碎程度对输移距离的响应关系。

从破碎产物去向看,输移历程延长并未改变主要破碎路径类型,但会强化不同粒级的主导去向(图2—4)。较细粒级团聚体的破碎产物更倾向于向最细粒端点汇聚,较粗粒级团聚体则更突出向次一级粒级的逐级下移,并叠加一定比例的最细粒生成,二者共同作用推动输移过程中泥沙级配持续重构。这一结果提示,在坡面水蚀输移子过程的参数化表达中,输移距离不宜仅作为搬运历程处理,而应同时考虑其对团聚体破碎与细粒生成的累积影响。

总体而言,本研究在定床条件下获得了不同粒级团聚体的破碎强度与产物分配特征,揭示了破碎特征对输移距离的响应规律,其结果可为坡面水蚀输移阶段团聚体破碎与级配重构过程的参数化表达提供了数据依据。受限于试验条件,本研究仅设置单一坡度、流量、土壤类型组合,后续仍需在更丰富的土壤类型和水动力条件下检验上述规律的普适性,并进一步量化水深、流态及颗粒受力模式对破碎强度及破碎产物的调控作用。此外,未来可引入水稳性团聚体分级及稳定性指标进行对照,以进一步核验本文结论在不同胶结机制条件下的稳健性与适用范围。

4 结 论

本研究通过室内定床薄层径流输移模拟试验分析比较了垄土不同初始粒级团聚体在不同输移距离下的破碎强度和破碎产物去向。结果表明,各粒级团聚体在输移过程中均发生破碎,破碎系数δ范围为0.06～0.90。随团聚体粒径增大,δ呈先降低后增加的趋势,在0.053～0.1 mm和＞5 mm粒级出现相对高值,而中等粒级(0.25～3 mm)团聚体的破碎程度较低,表明团聚体抗输移破碎能力并非随粒径单调变化,中间粒级整体更稳定,小粒级更易解体,大粒级更易在推移滚动与磨耗碰撞作用下发生破碎。输移距离从1 m增至3 m时,破碎程度增大了48.72%,且2～3 m阶段的破碎程度更明显,表明输移阶段存在典型的累积扰动效应。团聚体破碎产物主要分配至次一级粒级与最细粒级(＜0.053 mm),不同初始粒级对两类去向的权重不同,细粒级团聚体更趋向最细粒端点汇集,粗粒级团聚体则更突出逐级下移并叠加细粒生成,从而驱动输移过程泥沙级配的持续重构。研究结果表明,在坡面侵蚀解释与模型表达中应考虑输移阶段的破碎与级配重构,否则可能低估细粒生成及其对吸附态物质迁移输出结构的影响。

参考文献(References)

[1] 王祥,陈炜,黄国鲜,等.长江上游典型丘陵山区坡耕地径流及氮磷碳流失特征[J].环境工程技术学报,2024,14(5):1589-1598.
Wang Xiang, Chen Wei, Huang Guoxian, et al. Characteristics of runoff and nitrogen, phosphorus, and carbon loss in sloping cultivated lands in the typical hilly mountainous region of the upper Yangtze River basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(5): 1589-1598.

[2] 陆淑宁,李荣融,姚冲,等.横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J].土壤学报,2024,61(5):1271-1283.
Lu Shuning, Li Rongrong, Yao Chong, et al. Study on the effects of counter tillage on runoff and sediment yield and process of nitrogen and phosphorus nutrient loss on sloping farmland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5):1271-1283.

[3] Kahsay A, Yebyo S G, Gebremedhin Y G. Response of soil nutrient losses to erosion-deposition processes and land use managements: A case study in southeastern Tigray of northern Ethiopia [J]. Geoderma Regional, 2025,43:e01032.

[4] Zhang Qingwei, Ma Sanbao, Liu Sijun, et al. Particle size characteristics of sediment by sheet erosion and their responses to related parameters on a loess hillslope: A plot-scale study[J]. Hydrology Research, 2022, 53(3): 483-503.

[5] Liu Lin, Li Zhongwu, Xiao Haibing, et al. The transport of aggregates associated with soil organic carbon under the rain-induced overland flow on the Chinese Loess Plateau [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(10): 1895-1909.

[6] Chang Di, Li Shuo, Lai Zhengqing. Effects of extreme precipitation intensity and duration on the runoff and nutrient yields [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130281.

[7] 谭文峰,许运,史志华,等.胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J].土壤学报,2023,60(5):1297-1308.
Tan Wenfeng, Xu Yun, Shi Zhihua, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1297-1308.

[8] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3): 627-643.
Liu Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 627-643.

[9] 陈昊,马帅,王小治.土壤团聚体形成和稳定机理研究进展[J].现代农业科技,2023(2):150-155.
Chen Hao, Ma Shuai, Wang Xiaozhi. Research progress on formation and stability mechanism of soil aggregates [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(2): 150-155.

[10] Yu Zhenghong, Zhang Jiabao, Zhang Congzhi, et al. The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 251-260.

[11] Tang Xian, Qiu Jingchi, Xu Yuqi, et al. Responses of soil aggregate stability to organic C and total N as controlled by land-use type in a region of south China affected by sheet erosion [J]. Catena, 2022, 218: 106543.

[12] 陈佩岩,马岚,薛孟君,等.华北土石山区不同粒径土壤团聚体特征及其与坡面侵蚀定量关系[J].北京林业大学学报,2018,40(8):64-71.
Chen Peiyan, Ma Lan, Xue Mengjun, et al. Characteristics of soil aggregates with different particle sizes and their quantitative relationship with slope erosion in rocky mountain area of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(8): 64-71.

[13] Zhou Chunhong, Shen Nan, Zhang Fengbao, et al. Soil effective clay content and sediment load reduce soil detachment rate by rill flow [J]. Journal of Hydrology, 2025, 650: 132512.

[14] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.

Zhang Guanghui. Several ideas related to soil erosion research [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(4):21-30.

[15] Yao Chong, Zhang Qingwei, Wang Chenfeng, et al. Response of sediment transport capacity to soil properties and hydraulic parameters in the typical agricultural regions of the Loess Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2023,879:163090.

[16] 秦琪珊,郑粉莉,师宏强,等.东北黑土坡面降雨和汇流对土壤团聚体流失和颗粒迁移的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(1):1-9.
Qin Qishan, Zheng Fenli, Shi Hongqiang, et al. Impacts of slope rainfall and inflow in Mollisol region of northeast China on the soil aggregate loss and particle transport [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(1):1-9.

[17] Shen Nan, Wang Zhanli, Guo Qi, et al. Soil detachment capacity by rill flow for five typical loess soils on the Loess Plateau of China [J]. Soil and Tillage Research, 2021,213:105159.

[18] 马卡维耶夫.河流河床及其流域侵蚀[M].莫斯科:苏联科学院出版社,1955.

[19] Larionov G A, Bushueva O G, Dobrovol'skaya N G, et al. Destruction of soil aggregates in slope flows[J]. Eurasian Soil Science, 2007,40(10):1128-1134.

[20] 王军光.集中水流内典型红壤分离机制及团聚体剥蚀特征研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2013.
Wang Junguang. The research of typical red soil detachment mechanism and aggregate abrasion characteristic in concentrated flow [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2013.

[21] 余冰,宋云瑞,程嘉宁,等.不同模拟糙度集中水流内红壤团聚体剥蚀特征研究[J].土壤学报,2016,53(4):860-868.
Yu Bing, Song Yunrui, Cheng Jianing, et al. Denudation of red soil aggregates in concentrated flow as affected by artificial surface roughness [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(4):860-868.

[22] Wang Junguang, Li Zhaoxia, Cai Chongfa, et al. Effects of stability, transport distance and two hydraulic parameters on aggregate abrasion of Ultisols in overland flow [J]. Soil and Tillage Research, 2013,126:134-142.

[23] 张茜.机械压实与冻融共同作用下东北黑土团聚体输移破碎规律研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2025.
Zhang Qian. Study on the transport and fragmentation law of black soil aggregates in northeast China under the combined action of mechanical compaction and freeze-thaw [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2025.

[24] 吴娟,齐雁冰,常庆瑞,等.关中地区垆土系统分类归属及代表土系建立[J].土壤学报,2021,58(2):357-371.
Wu Juan, Qi Yanbing, Chang Qingrui, et al. Attribution of Lou soil in Chinese soil taxonomy and establishment of representative soil series in Guanzhong area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,58(2):357-371.

[25] Meyer G R F A L D.Transport of soil particles by shallow flow [J]. Transactions of the ASAE,1972,15(1):99-102.

[26] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASAE, 1989,32(5):1587-1593.

[27] Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Liu Guobin, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(3):713-719.

[28] Shen Nan, Wang Zhanli, Zhang Qingwei, et al. Quantifying the contribution of sediment load to soil detachment rate by sediment-laden rill flow [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017,81(6):1526-1536.

[29] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004,79(1):7-31.

[30] 焦钒栩,侯卫亮,李光录.降雨条件下土壤胶结状况与团聚体分布特征研究[J].水土保持研究,2024,31(6):109-118.
Jiao Fanxu, Hou Weiliang, Li Guanglu. Study on soil cementation and aggregate distribution characteristics under rainfall conditions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):109-118.

[31] Krause L, Rodionov A, Schweizer S A, et al. Microaggregate stability and storage of organic carbon is affected by clay content in arable Luvisols [J]. Soil and Tillage Research, 2018,182:123-129.

[32] Blankinship J C, Fonte S J, Six J, et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem [J]. Geoderma, 2016,272:39-50.

[33] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982,33(2):141-163.

[34] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter II: A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(3):1042-1049.

[35] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils [J]. Australian Journal of Soil Research, 1991,29(6):815-828.

[36] Dexter A R.Advances in characterization of soil structure [J]. Soil and Tillage Research, 1988,11(3/4):199-238.