

基于模拟降雨的北京褐土坡地土壤团粒流失特征试验

杨帆^{1,2} 张洪江^{1,2} 程金花^{1,2} 周柱栋^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 选取 20°北京典型褐土坡面径流小区为试验对象, 基于野外人工模拟降雨试验和有无雨滴打击作用对坡面侵蚀的影响, 研究了坡面土壤团粒组成及其变化特征, 揭示了坡面侵蚀过程中泥沙团粒的分离和输移规律。试验处理包括 3 种代表性降雨强度 (35、65、100 mm/h) 和 3 种植被盖度 (0%、30%、80%)。结果表明, 消除雨滴打击作用后, 坡面侵蚀特征变化明显, 坡面含沙量和土壤分离率分别减少 25.91% ~ 31.15% 和 35.10% ~ 41.20%, 坡面侵蚀泥沙团粒中值粒径均小于雨滴击溅坡面。通过侵蚀泥沙有效粒径分布和最终粒径分布的比值 (E/U) 分析泥沙团粒的粒径分选特征, 发现产流初始阶段粗砂、细砂、细粉粒和粘粒多以团聚体形式存在, 而粗粉砂以初级粒子形式存在; 随着降雨历时延长, 侵蚀泥沙各粒级的分离程度增加, 泥沙颗粒逐步分解为初级粒子。坡面侵蚀泥沙分离规律表明, 泥沙团粒结构变化与坡面水动力学特征密切相关, 土壤团聚体分形维数 (D) 与时间 (T) 呈幂函数关系。坡面产流前雨滴击溅对土壤分离有重要作用, 其对土壤分离贡献率为 28.09%, 而无雨滴打击坡面土壤团聚体分形维数增量是有雨滴打击增量的 48.43%。在该区坡地泥沙颗粒输移过程中, 稳定性较差的砂粒被分解为细小颗粒, 粗粉砂多以初级粒子形式存在, 对坡面侵蚀泥沙颗粒分离过程具有重要影响, 而粘粒在侵蚀坡面则逐渐富集。

关键词: 侵蚀过程; 粒径分选; 雨滴击溅; 泥沙团粒结构

中图分类号: S157.1; P426.615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0137-09

Particle Characteristics of Eroded Cinnamon Soil from Beijing
Based on Simulated Rainfall

Yang Fan^{1,2} Zhang Hongjiang^{1,2} Cheng Jinhua^{1,2} Zhou Zhudong^{1,2}

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

2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study and illuminate the effects of different raindrops and runoff characteristics on size-selectivity of sediments crumb structure detachment and transportation in soil erosion process, a rainfall simulation study was conducted to examine the sediment particle dynamic distribution characteristics in Beijing, China. Erosion plots (5 m × 1 m) were installed in a 20° hillslope. Experiment treatments included three rainfall intensities (35 mm/h, 65 mm/h and 100 mm/h) of representative rainfalls and three average vegetation coverages (0%, 30% and 80%). The changes of sediment crumb structure at erosion plots with and without raindrop impact were observed through placing the nylon net over the soil surface. The results showed that sediment concentration and soil loss were reduced by 25.91% ~ 31.15% and 35.10% ~ 41.20%, respectively, after eliminating raindrop impact. The sediment mean particle size (D_{50}) of the slope without raindrops was less than that of the slope with raindrops, which was decreased by 23.47%, 27.17% and 31.63% under the three kinds of rainfall intensities. At the initial stage of runoff, coarse sand-size, fine sand-size, fine silt-size and clay-size existed in the form of aggregation, and coarse silt-size was in a state of primary particles. With the

收稿日期: 2016-01-14 修回日期: 2016-02-21

基金项目: 国家林业局林业公益性项目 (201404209) 和国家自然科学基金项目 (41271300, 30900866)

作者简介: 杨帆 (1988—), 男, 博士生, 主要从事水土保持研究, E-mail: paper_yangfan@163.com

通信作者: 张洪江 (1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与流域管理研究, E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn

extension of rainfall, the E/U (effective-ultimate size) ratio of each graded size was gradually tended to be the value of 1, which indicated sediment particles existed in the form of primary particles. The correlation analysis of the sediment particle size and water flow power under different vegetation coverages showed that the slope erosion process was closely related to the hydrodynamic characteristics. The effect of splash on soil surface accounted for 28.09% of the total detachment degree before the runoff generation, and the soil aggregate fractal dimension increment with no raindrops on the slope was 48.43% of that with raindrops on the slope. In the sediment transport process, sand particles was decomposed into small particles, coarse silt particles were transported as primary particles, and clay particles was gradually enriched in the erosion process. The sediment size-selectivity characteristics by erosion dynamics in the process of erosion were revealed, which deepened the research on erosion regularity of different erosion processes.

Key words: erosion process; size-selectivity; raindrops splashing; sediments aggregate structure

引言

坡面降雨和径流的侵蚀分选作用导致不同程度的土壤团粒流失,其作用可以改变坡面侵蚀和水文过程^[1],因此,了解坡地土壤团粒的分离和输移规律有利于加强坡地土壤侵蚀动力学研究。土壤团聚体作为土壤基本结构单元,其结构稳定性和对侵蚀动力的响应过程是土壤流失的物质基础,侵蚀泥沙颗粒特征不仅影响坡面土壤的分离和输移过程,而且造成氮、磷等土壤养分的大量流失^[2]。在坡面水蚀过程中,BISSONNAIS^[3]指出雨滴击溅和径流冲刷是土壤团粒结构破坏的主要动力,土壤团聚体的破碎与土壤侵蚀量有着显著的关系。EMERSON等^[4]将坡面土壤团粒结构的破坏概括为以物理过程为主的团粒消散作用和以化学过程为主的粘粒分散作用。在坡地土壤团粒流失形式上,SLATTERY等^[5]将充分分离为初级粒子(sand, silt, clay)的团粒结构称为最终团粒结构(Ultimate particle);而实际坡面侵蚀泥沙是以初级粒子和团聚体的形式共同组成的,被称为有效团粒结构^[6](Effective particle),对于坡面侵蚀泥沙团粒结构的研究工作可以深入理解侵蚀泥沙的分离和输移机制。

目前,国内外学者对于坡面侵蚀的发展过程、水动力学特征和产流产沙规律已有较为深入的研究^[7-9],为理解坡面土壤侵蚀动力学机理和建立侵蚀过程模型提供了理论基础。但研究多集中于坡面径流对土壤分离及输移过程的影响上,加之以往溅蚀研究尺度较小往往忽视坡面径流对雨滴的屏蔽作用,因此,对降雨和径流在坡面土壤分离和输移过程中的贡献和作用研究尚不完善。雨滴击溅作为水力侵蚀的初始阶段,通过打击地表引起了土壤团粒间的破碎、分散,不仅破坏表层土壤结构,而且为径流挟带土粒创造条件,研究不同侵蚀方式对泥沙团粒

结构特征的影响有利于从源头控制水土流失的发生。北京位于华北平原北部,水力侵蚀是该区最主要的土壤侵蚀类型,区内土壤多以褐土为主,由于土层较薄,土壤底层为渗透性较差的基岩,土壤被侵蚀后生态环境急剧恶化而不宜恢复^[9]。近年来,该区受季风气候影响,降雨季节具有高温多雨的特点,且高强度的暴雨几率增加,造成土壤的大量流失。因此,加强和完善该区坡地侵蚀过程中土壤团粒变化特征的研究,对理解坡面土壤流失规律具有重要意义。

本文基于野外人工模拟降雨试验,通过坡面有无雨滴打击作用对侵蚀特征和泥沙粒径的影响,分析坡面侵蚀泥沙团粒结构的变化过程,及其在降雨和径流作用下的分离和输移规律,揭示表层土壤在侵蚀过程中的分选特性,以深化对不同侵蚀过程的侵蚀规律研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于北京市延庆县水土保持示范园(116°3'11"~116°4'19"E、40°26'19"~40°27'26"N),为北京市水土保持监测网络站点。该区地处北温带,属大陆性季风气候,年均气温8.5℃,年均降雨量474.5 mm,雨季集中在6—9月份,占年均降雨量的84%,区内地形起伏较大,坡度大于5°面积占该区总面积的83.5%。研究区内主要土壤类型为淋溶性褐土,是北京地区主要土壤类型之一^[9],土壤质地为粉壤土,土地利用方式以天然灌草覆盖的林地为主。北京市土壤侵蚀区域主要分布在以坡耕地、灌草坡、经济林为主的山区与平原交接带,由于人为破坏植被情况突出,土壤流失严重,因此,山区水土流失防控对首都生态安全尤为重要^[10]。根据研究区实地条件,选择区内撂荒地研究对象,分别

布设试验样地,研究区具有较好的典型性和代表性,对褐土地土壤流失特征的研究,能够为治理该区水土流失问题提供理论参考。样地土壤基本性质如表 1 所示。

表 1 样地土壤基本性质
Tab.1 Basic soil properties of experiment plots

土层深度/ cm	土壤组成			土壤质地	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	$M_{ws}/$ mm	$M_{sw}/$ mm	RMI
	砂粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	粘粒质量分数/%						
0~10	36.41	54.36	9.23	粉壤土	1.31	12.28	1.67	2.54	0.34

注: M_{ws} 和 M_{sw} 分别表示预湿润后震荡和慢速湿润测定的土壤团聚体平均重量直径, RMI 为相对机械破碎指数,通过 LB 法测定。

1.2 试验设计

对于坡面土壤团粒结构的研究较多采用室内分层填充土槽试验,这有利于控制侵蚀过程中的可变因子,但分筛压实过程会提前分选土壤团粒结构并对其造成物理破损,且室内试验结论在实际应用中存在较大误差,因此,本试验利用野外径流小区进行侵蚀泥沙团粒结构变化特征的研究。

研究表明,20°坡面下坡溅蚀量出现多次峰值^[11],为尽可能收集坡面雨滴溅蚀量,选择在相同坡度的山坡坡面布设野外试验径流小区,其长、宽分别为 5.0、1.0 m。径流小区四边采用铁质钢板使样地与周围区域土壤分隔,地下埋深 20 cm,地上部分高 10 cm,并在下方设置出口断面,便于收集径流泥沙(图 1)。高强度暴雨是造成坡面水土流失的主要降雨特征,依据北京“7·21”暴雨事件局部地区最大降水强度的峰值变化^[12],设计试验降雨强度分别为 35、65、100 mm/h。草本植物对降雨雨滴具有充分的拦蓄能力,植被覆盖度达到 40%时可有效阻挡降雨对土壤的溅蚀作用^[13],据此,选择低覆盖度 30%和高覆盖度 80%两个草本盖度梯度,并设置裸露径流小区为对照组。其中裸地试验均包括坡面有无雨滴打击作用,无雨滴打击采用在试验土槽上方架设纱网(孔径 1 mm×1 mm)的方式来屏蔽雨滴击溅作用^[14],纱网距土壤表面 10 cm。GABET 等^[15]研究表明,在细沟侵蚀阶段,坡面径流较为缓

和可能无法提供足够的水深和持续的冲击力以破坏土壤团粒间内聚力。在试验过程中,观测坡面细沟出现时间集中在 26~43 min 之间,因此,本研究选择以降雨历时 30 min 内的试验结果为基础数据。试验样地草本植物选择当地常见的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.),共计布设 8 类样地,具体设计见表 2。

表 2 试验设计
Tab.2 Design of experimental treatments

试验处理	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	植被盖度/ %	试验分组	样地编号
有雨滴打击	35	0	A _{a1}	No. 1
		0	B _{a1}	No. 3
	65	30	B _{a2}	No. 5
		80	B _{a3}	No. 6
	100	0	C _{a1}	No. 7
无雨滴打击	35	0	A _{b1}	No. 2
	65	0	B _{b1}	No. 4
	100	0	C _{b1}	No. 8

注:A、B、C 分别表示降雨强度 35、65、100 mm/h,a、b 分别表示有、无雨滴打击处理,1、2、3 分别表示植被覆盖度 0%、30%、80%,下同。样地编号分别代表 8 种试验处理。

为确保草本植物的生长条件符合试验设计,在试验开展前种植草本植物。首先通过调查草本植物单株生长量及覆盖度确定最优种植密度,然后采用条带状在坡面均匀种植草种,出苗 2 周后进行定苗,在植物生长期保证其充足的日晒时间,使植被盖度最大化符合试验控制要求。降雨试验前,结合图像处理办法确定样地内草被的实际盖度,清除不符合条件的植株。

1.3 试验材料

试验选用南京林业大学人工模拟降雨实验室生产的野外人工模拟降雨器,采用带压力侧喷式喷头模拟降雨,可通过控制喷头数量和供水压力调节降雨强度。人工降雨器垂直降雨高度为 6.0 m,喷头孔径分别为 1.5、2.0、2.5 mm,可调降雨强度范围为 20~150 mm/h,降雨测量精度为 0.01 mm/h,通过专业系统自控软件进行操作,人工模拟降雨均匀系数大于 0.8,其雨滴降落速度符合模拟降雨试验要求,

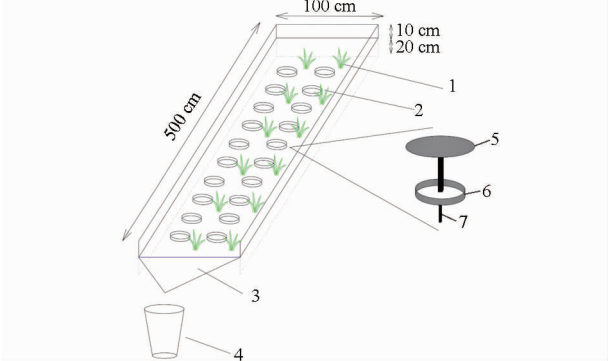


图 1 试验模式图
Fig.1 Sketch illustration of experiment
1. 试验区 2. 溅蚀杯 3. 集水面 4. 集流桶 5. 盖杯 6. 样品盒 7. 固定杆

在四周用塑料挡棚进行遮挡,以避免自然风对降雨试验的干扰。

试验采用以文献[16]设计的溅蚀杯进行改良后的溅蚀杯收集坡面雨滴击溅土粒。溅蚀杯上部为直径6 cm的圆形盖杯,下部由高1 cm,直径5 cm的铝制圆盒组成,上下部分高差为10 cm,其下方连接长为5 cm的固定杆,不仅可以插入土层保证溅蚀杯在坡面的稳定性,而且便于仪器的更换和收集(图1)。进行试验前,先用清水填满下部圆盒,方便搜集雨滴击溅土粒的同时,结合上部盖杯有效屏蔽上方降雨雨滴动能,避免对收集到的土粒造成二次击溅。沿试验土槽坡面两行均按等间距布设10排溅蚀杯,共计20个。同时,在径流小区下部设置三角形断面出口,突出坡面部分用塑料布遮盖,保证有效产沙面积为5.0 m×1.0 m,并采用集流桶收集坡面径流和泥沙样。

1.4 试验方法

1.4.1 人工模拟降雨试验

研究表明,前期土壤含水率对坡面地表径流的产生和泥沙输移有较大的影响^[17],为确保试验条件的一致性,在试验开始前,对所有径流小区进行充分降雨,使土壤基本饱和但不产生径流,用塑料布遮盖径流小区静止72 h后进行降雨试验,使试验样地前期土壤质量含水率保持在(15.13±1.52)%。

坡面试验时,待降雨强度稳定后方可进行试验,同时开始记录降雨时间。降雨试验分为2个阶段:第1阶段:从开始降雨到坡面产流为止,充分收集坡面产流前的雨滴击溅土壤颗粒。第2阶段:从坡面产流阶段开始,通过有无纱网覆盖分别获取有雨滴打击坡面的雨滴击溅土粒和径流泥沙样,以及无雨滴打击坡面的径流泥沙样。试验过程中需定时更换溅蚀杯以获取侵蚀泥沙团粒结构的动态变化,由于此操作具有一定的困难性,为避免影响模拟降雨的连续性,选择指派6名试验人员从径流小区两侧同时更换和收集溅蚀杯的方法来实现这一过程,经测算,其操作误差在15 s之内,未对试验结果造成较大误差。试验过程中间隔4 min收集一次雨滴击溅土粒,间隔2 min收集一次径流泥沙样,为观测降雨过程中坡面土壤团聚体的动态变化过程,以间隔4 min降雨历时选取坡面顶部区域3个位置(间隔50 cm),通过取样盒轻轻刮取该时段内的坡面土壤样品,以测定侵蚀坡面土壤团聚体的破碎过程。待降雨结束后,用盛装蒸馏水的洗瓶冲洗溅蚀杯中的土壤颗粒,并用铝盒收集后将其置于干燥箱105℃下干燥24 h,采用电子天平称量后收集于自封袋中。对于径流泥沙样,加入少量明矾

以加快泥沙沉淀,待水样澄清后用土工布进行过滤,通过电子秤称量并计算清液体积,并将泥沙样移入铝盒中,同样条件干燥称量后收集。各试验处理重复3次,每个小区晾晒72 h后进行下一组降雨试验。

试验过程中,同时测定坡面水流流速和水深。坡面流速测定采用染色示踪法,具体方法为:在坡面自上而下每间隔1 m确定一个测流断面,每个断面设置左、中、右3个测点测定断面流速,间隔2 min测量取平均值,由于该流速为坡面表层流速,将实测值乘以系数0.75进行修正,以测定平均值作为该时间段内的平均流速。在各断面测点采用数显测针(精度0.02 mm)测量径流深,间隔2 min测定一次,取平均值为该观测断面径流深。

1.4.2 泥沙团粒结构分析

将各试验处理所收集泥沙样品平均分为3份,第1份样品直接通过激光粒度仪(Microtrace S3500型)测定有效粒径的分布特征;第2份样品进行最终粒径分布的测定,具体步骤为^[18]:首先,用过氧化氢去除泥沙样品中的有机质,然后将样品置于六偏磷酸钠溶液浸泡24 h,采用超声波振荡仪进行充分分散,再通过激光粒度仪测定最终粒径的分布特征;第3份样品将间隔2 min获取的泥沙样品根据降雨历时均匀混合,以测定降雨时段内泥沙颗粒的累积粒径分布。

1.5 参数计算方法

1.5.1 土壤分离率和土壤流失比

土壤分离率是衡量土壤分离快慢的定量参数,它是指在径流冲刷作用下,单位时间、单位面积上土壤的流失量。本试验中,土壤分离速率采用径流桶内收集到的泥沙样计算^[8],公式为

$$D_r = \frac{CQ}{AT}$$
(1)

式中 D_r ——土壤分离速率,g/(m²·min)
 C ——泥沙质量浓度,g/L
 Q ——流量,L
 A ——土壤表面积,m²
 T ——冲刷时间,min

土壤流失比定义为植被覆盖坡面与裸露坡面的单位土壤流失率比值,当土壤流失比为1时,表示裸露坡面发生的单位土壤流失率,具体计算公式^[18]为

$$SLR = \frac{NSLR_{mulch}}{NSLR_{bare}}$$
(2)

式中 SLR ——土壤流失比
 $NSLR_{mulch}$ ——不同植被覆盖坡面的单位土壤流失率,g/(m²·min)

$NSLR_{bare}$ ——裸露坡面的单位土壤流失率，
 $g/(m^2 \cdot min)$

1.5.2 坡面水流功率

坡面水动力学参数的变化对侵蚀过程有重要的影响,在坡面侵蚀研究中,水流功率(Steam power)定义为作用于单位面积水流所消耗的能量,用来分离和输移坡面表层的土壤团粒,能够较为准确地反映坡面土壤流失的变化情况,其计算式为

$$W = \gamma R J v \tag{3}$$

式中 W ——水流功率, $N/(m \cdot s)$
 γ ——水体积质量, N/m^3
 R ——水力半径, m
 J ——侵蚀坡面正弦值
 v ——水流流速, m/s

1.5.3 侵蚀泥沙颗粒特性

不同粒径分形维数 D 计算式为

$$\frac{V(r < \bar{R}_i)}{V_T} = \left(\frac{\bar{R}_i}{\bar{R}_{max}} \right)^{3-D} \tag{4}$$

式中 $V(r < \bar{R}_i)$ ——粒径小于 $\bar{R}_i$ 的颗粒累计体积
 $\bar{R}_{max}$ ——颗粒最大粒级的平均粒径
 $\bar{R}_i$ ——两筛分粒级 R_i 与 R_{i+1} 间粒径的平均值
 V_T ——土壤各粒级体积之和
 D ——分形维数

1.5.4 泥沙粒径富集比

泥沙粒径富集比(ER)表征侵蚀过程中坡面泥沙输移的分选过程。当某一粒级 ER 值大于 1 时,表明该粒级颗粒在侵蚀过程中是富集的,其值在侵蚀泥沙中的比例高于原坡面土壤;当 ER 值小于 1 时,表明该粒级颗粒在侵蚀过程中被消耗,其值在原坡面土壤中的比例高于侵蚀泥沙,计算式为

$$ER = \frac{P_i}{P_o} \tag{5}$$

式中 P_i ——某一粒径颗粒占总侵蚀泥沙颗粒的体
积百分比, %
 P_o ——该粒径颗粒团聚体占试供土壤的体
积百分比, %

1.6 数据处理

本试验过程中采集数据主要包括坡面径流泥沙样和雨滴击溅土样。试验结束后,将收集到的径流泥沙样分离为水样和泥沙样,其中,水样收集于集流桶内,以精度为 0.001 kg 的电子秤称量,泥沙样和雨滴击溅土样采用铝盒保存,待干燥后以精度为 0.001 g 的电子天平称量。为降低试验数据测量误差,各试验处理均重复进行 3 次,对各项数据均保留小数点后两位,以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示。通过 SPSS 20.0 软件和 Microsoft Office Excel 2010 进

行数据统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和偏相关分析方法(LSD)比较各参数间差异,并用 Origin 9.0 软件进行数据制图。

2 结果与分析

2.1 雨滴击溅作用对坡面侵蚀的影响

2.1.1 有无雨滴打击坡面侵蚀特征

不同试验处理间坡面产流和产沙结果表明,有无雨滴打击作用坡面侵蚀特征存在显著变化(表 3)。坡面径流量主要由土壤渗透能力和坡面承雨量决定^[14],同雨滴打击坡面相比,消除雨滴作用后不同降雨强度下坡面径流率减少 10.57% ~ 14.06%。分析其原因,由于土壤结皮层与雨滴击溅作用密切相关,消除雨滴打击后不利于坡面结皮层的形成,相比于雨滴击溅坡面降雨入渗率较高,因此,其坡面径流量减少。消除雨滴打击作用坡面径流率减小幅度较低,主要与本研究坡面径流试验从产流状态开始记录有关,此时表层土壤含水率较高,使得土壤入渗作用较小。雨滴击溅作用能够增加径流紊动性,在消除雨滴击溅作用后,相同试验处理下坡面含沙量和土壤分离率分别减少 25.91% ~ 31.15% 和 35.10% ~ 41.20%。坡面草本植物覆盖对雨滴具有消能作用,随着植被盖度的增加,坡面含沙量和土壤分离率分别减少 14.70% ~ 35.49% 和 31.91% ~ 71.08%,土壤流失比分别为 0.68 和 0.29。以上结果表明,通过纱网和植被屏蔽和减弱降落雨滴对坡面土壤的击溅作用,可以充分影响坡面的产流和产沙过程。吴普特等^[19]通过降低降雨高度的方法来减少雨滴动能,其结果表明坡面薄层水流所产生的侵蚀量主要是由雨滴击溅所致,消除雨滴打击作用后坡面侵蚀量可降低 63.45%。因此,在坡面侵蚀过程中,消除雨滴打击对于控制侵蚀过程具有重要意义。

表 3 不同试验处理间坡面径流和侵蚀特征
Tab.3 Characteristics of runoff and erosion of
different treatments

试验 处理	径流率/ ($L \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$)	含沙量/ ($g \cdot L^{-1}$)	土壤分离率/ ($g \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$)	土壤 流失比
A _{a1}	1.28 ± 0.05	94.79 ± 7.27	121.75 ± 5.87	—
B _{a1}	1.67 ± 0.02	139.30 ± 13.37	232.94 ± 8.28	1.00
B _{a2}	1.33 ± 0.03	118.82 ± 4.86	158.61 ± 4.06	0.68
B _{a3}	0.75 ± 0.02	89.86 ± 4.22	67.37 ± 2.31	0.29
C _{a1}	2.27 ± 0.04	154.08 ± 9.22	349.86 ± 4.82	—
A _{b1}	1.10 ± 0.04	65.26 ± 7.82	71.59 ± 1.91	—
B _{b1}	1.46 ± 0.02	103.21 ± 8.70	151.18 ± 7.62	—
C _{b1}	2.03 ± 0.03	111.18 ± 5.12	224.82 ± 4.82	—

2.1.2 有无雨滴打击坡面侵蚀泥沙粒径分布特征

坡面侵蚀过程中土壤主要受到降雨和径流侵蚀力的作用,分析泥沙粒径分布特征可以揭示不同侵蚀过程对团粒结构变化的影响。各试验处理下坡面侵蚀泥沙的有效团粒中值粒径(D_{50E})和最终团粒中值粒径(D_{50U})如图2所示, D_{50} 越大表明侵蚀泥沙颗粒中大粒径颗粒含量越高。结果表明,各试验处理下的泥沙 D_{50E} 均小于原坡面 D_{50E} ,而泥沙 D_{50U} 基本与原坡面 D_{50U} 较为一致。分析其原因可知,在坡面降雨和径流作用下,侵蚀动力对土壤团粒结构的分选作用不同,较小粒径颗粒易于被搬运,而且随径流输移的泥沙团粒受到降雨和径流的分解作用,因此,各处理方式下有效团粒中值粒径均小于原坡面;而对于最终粒径分布,由于泥沙颗粒经过了前期预处理使其充分分散,因此侵蚀泥沙最终粒径分布的中值粒径(D_{50U})与原坡面相差不大。无雨滴击溅坡面 D_{50E} 均小于雨滴击溅坡面 D_{50E} ,3 种降雨强度下分别减少 23.47%、27.17%、31.63%,可见雨滴击溅作用对坡面土壤团粒结构的分离具有重要作用。当坡面存在雨滴打击作用时,坡面 D_{50E} 随着降雨强度的增加而增大,通过雨滴打击作用增加了坡面径流的紊动性和侵蚀水动力条件,从而使较大粒径泥沙颗粒被输移。ISSA 等^[16]研究了坡面降雨过程中侵蚀泥沙粒径随时间尺度的变化,其结果与本试验条件下团粒结构分布相似。对比不同植被覆盖度下坡面侵蚀泥沙 D_{50E} ,其值随着覆盖度的增加逐渐减少,由于草本植物可充分影响雨滴动能和坡面径流水力学特性,通过降低降雨和径流侵蚀力对坡面土壤的影响,减少了土壤团粒结构的分离。

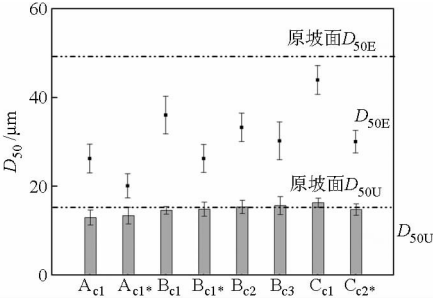


图2 不同试验组合下的泥沙中值粒径 D_{50}
Fig. 2 Median particle size (D_{50}) of sediment for different treatments

2.2 坡面侵蚀过程泥沙团粒结构变化特征

通过不同降雨时段内的泥沙团粒结构变化过程曲线,可分析侵蚀过程中土壤团粒结构的分离程度。MARTINEZ-MENA 等^[6]以有效团粒结构和最终团粒结构的比值(E/U)表征降雨和径流作用对泥沙粒径的分选情况,本研究采用同样的方法来表示 65 mm/h 降雨强度 B_{a1} 、 B_{a2} 、 B_{a3} 试验下的泥沙团粒结构 E/U 值

的变化情况(图3),包括粗砂粒(2~0.25 mm)、细砂粒(0.25~0.05 mm)、粗粉粒(0.05~0.02 mm)、细粉粒(0.02~0.002 mm)和粘粒(小于0.002 mm)5个粒径分布。

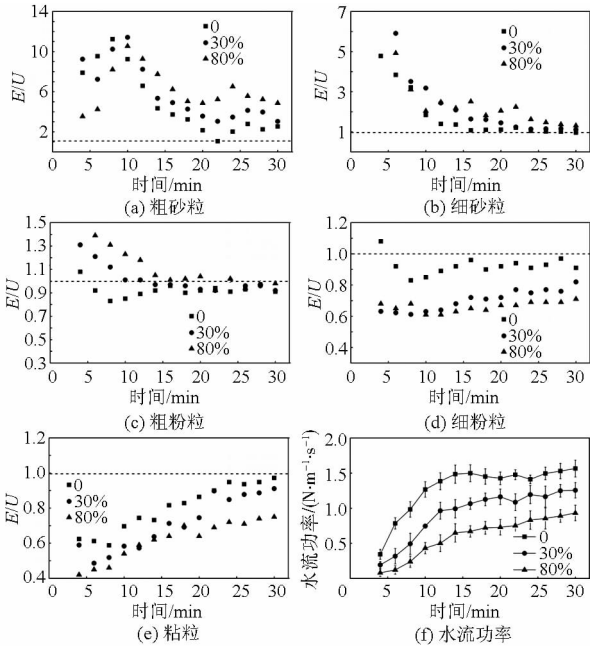


图3 不同降雨时段下泥沙团粒结构变化
Fig. 3 Changes of sediment size at different rainfall periods

由图3可知,坡面侵蚀过程中各团粒结构 E/U 比值变化存在明显波动。其中,粗砂粒 E/U 值(图3a)呈单峰曲线变化,在 5~8 min 内达到最大值,其值在降雨过程中均大于1;细砂粒 E/U 值(图3b)随着降雨历时逐渐减小,在降雨后期接近于1;粗粉粒 E/U 值(图3c)接近于1,随降雨历时的变化在数值1处上下波动;细粉粒 E/U 值(图3d)基本上小于1,随降雨历时呈缓慢增加趋势;而粘粒 E/U 值(图3e)随降雨历时逐渐增大并始终小于1。对比不同覆盖度坡面的变化情况,砂粒和粗粉粒 E/U 值均随植被覆盖度的增加而增大,而细粉粒和粘粒 E/U 值随植被覆盖度的增加而减少。在坡面侵蚀过程中,水流功率在产流初期迅速增大此后保持一个相对稳定值(图3f),何小武等^[8]对农地原状土壤的分离试验表明,水流功率能够较好描述坡面径流对土壤的分离能力,表4为 B_{a1} 、 B_{a2} 、 B_{a3} 试验条件下侵蚀泥沙团粒结构与水流功率的相关性分析。结果表明,在 B_{a1} 、 B_{a2} 、 B_{a3} 试验坡面水流功率均与砂粒呈正相关关系,与细粉粒和粘粒呈负相关关系,与粗粉粒相关关系不显著。

以上结果表明,坡面侵蚀泥沙团粒结构变化与水动力学特性密切相关,在降雨和径流的机械破坏作用下被分散。MARTINEZ-MENA 等^[6]指出当 E/U 值等于1时,表明该粒级泥沙颗粒以初级粒子形

表 4 侵蚀泥沙团粒结构与水流功率偏相关分析结果
Tab.4 Partial correlation analysis results of water flow power and sediment crumb structure

团粒结构	粗砂粒	细砂粒	粗粉粒	细粉粒	粘粒
B _{a1} 水流功率	0.910 **	0.930 **	0.185	-0.861 **	-0.908 **
Sig. 值	0	0	0.526	0	0
B _{a2} 水流功率	0.803 **	0.916 **	0.085	-0.909 **	-0.966 **
Sig. 值	0.001	0	0.773	0	0
B _{a3} 水流功率	0.907 *	0.869 **	0.323	-0.841 **	-0.958 **
Sig. 值	0.01	0	0.260	0	0

注: $n=15$, * 为显著, $P<0.05$; ** 为极显著, $P<0.01$ 。

式存在;当 E/U 值大于或者小于 1 时,表明该粒级泥沙颗粒以团粒形式存在。表 5 为不同降雨时段内侵蚀泥沙的有效粒径分布和最终粒径分布值。通过对比降雨初期(0~6 min)和降雨后期(24~30 min)侵蚀泥沙的有效粒径和最终粒径比值,发现产流初始阶段粗砂粒、细砂粒、细粉粒和粘粒的 E/U 值均大于 1 或小于 1,表明以上阶段泥沙粒径多以团聚体形式存在,而粗粉砂 E/U 值在数值 1 处上下小幅度波动,表明该粒径多以初级粒子形式存在;而在降

表 5 不同降雨时段内侵蚀泥沙的有效粒径分布和最终粒径分布值

Tab.5 Effective and ultimate particle sizes ratios of sediment at different rainfall periods

参数	0~6 min					24~30 min				
	粗砂粒	细砂粒	粗粉粒	细粉粒	粘粒	粗砂粒	细砂粒	粗粉粒	细粉粒	粘粒
$E/\%$	4.87	25.47	25.02	37.28	7.36	9.24	39.93	27.93	18.36	4.54
$U/\%$	0.56	6.01	25.21	56.57	11.65	3.98	40.11	28.97	22.02	4.92
E/U	8.69	4.34	0.99	0.66	0.63	2.32	0.99	0.96	0.83	0.93

植被覆盖条件下,由于受到不同下垫面情况的影响,径流和侵蚀变化规律复杂多变。草本植物对坡面表层的保护主要有以下两方面:一是通过叶片部分减少雨滴动能,二是通过根部拦蓄地表径流。随着植被覆盖度的增加,地表容易形成不均匀的薄层水流,坡面水流功率较低,因此,侵蚀泥沙各粒级颗粒 E/U 值均较大或较小于裸露坡面,其对泥沙颗粒的分离程度较低。WANG 等^[23]通过研究不同降雨动能对径流泥沙团粒结构组成的影响,发现较大雨滴动能增加了土壤团聚体的分离程度,与不同植被覆盖度下的泥沙各粒级的 E/U 值变化一致,当坡面土壤受到较大雨滴击溅作用时,泥沙颗粒分离程度较高。

2.3 坡面侵蚀过程中泥沙分离与输移特征

2.3.1 坡面侵蚀泥沙分离过程

从动力学角度分析,坡面水力侵蚀过程是各种因子影响下的降雨径流侵蚀力和土壤抗蚀力的相互作用,受到降雨侵蚀力和径流剪切力的共同作用。分形理论模型广泛应用于土壤团聚体的水稳性和抗侵蚀性等方面的研究,反映土壤团聚体的分离情况,

雨后期,各粒级颗粒 E/U 值逐渐趋向于 1,表明侵蚀后期泥沙颗粒主要以初级粒子存在,泥沙分离程度较高。吴永等^[20]研究表明,坡面在非饱和状态下颗粒抗蚀能力强,随着坡面土壤表层含水量逐渐增加,导致土壤粘结力减小,使土壤颗粒容易被分离和运输。由于产流初期径流水流功率较低,其对较小粒径颗粒搬运作用较强,对较大粒径颗粒搬运作用较弱;随着径流搬运能力的增强,砂粒 E/U 值在一定时段达到峰值,此后又逐渐降低,这与该粒级泥沙团粒的分解过程有关。LEGOUT 等^[21]指出土壤团聚体以分层结构的形式存在,较小土壤团粒处于较大团粒结构中,而粘粒一般以粘粒团或凝聚体的形式存在,随着坡面径流水流功率的增大,粘粒团被逐渐冲刷分解。坡面侵蚀过程受到雨滴和地表径流的共同作用,当水深大于雨滴直径的 3 倍时对雨滴产生屏蔽作用^[22],随着坡面径流对雨滴的屏蔽效应增加,坡面降雨雨滴动能降低,水流功率在 15 min 后基本达到最大稳定值(图 3f),此时坡面以径流侵蚀为主。

土壤团聚体粒径分形维数 D 越大表明土壤团聚体剥离程度越高, B_{a1} 、 B_{b1} 有无雨滴打击坡面土壤团聚体分形维数的动态变化特征如图 4 所示。结果表明,坡面产流前雨滴击溅作用对坡面土壤分离有重要作用,其分离贡献比占总分离程度的 28.09%,当坡面产流后,雨滴打击坡面增大了坡面径流的紊流特性,使其对坡面土壤的分离程度较高,这一结果与泥沙中值粒径 D_{50} 表现一致。对比不同侵蚀方式下

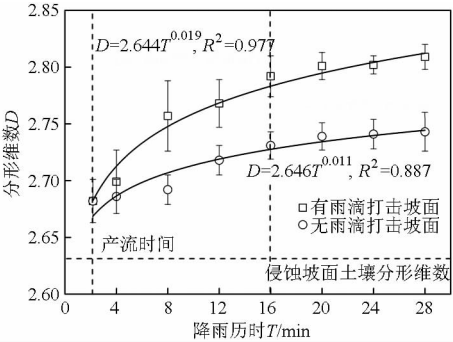


图 4 不同侵蚀方式下土壤团聚体粒径分形维数 D 动态变化

Fig.4 Dynamic changes of fractal characteristics D of soil aggregate size under different erosion patterns

土壤团聚体粒径的分形维数发现,有雨滴打击坡面土壤团聚体粒径分形维数 D 均高于无雨滴打击坡面,无雨滴打击坡面土壤团聚体分离程度较低,其分形维数增量是有雨滴打击坡面土壤团聚体粒径增量的 48.43%,这主要是由于纱网覆盖消除了雨滴动能,坡面薄层水流冲刷能力对表土团聚体的破坏作用有限,因此,无雨滴击溅作用下土壤团聚体粒径分形维数较低^[18]。ABU-HAMDEH 等^[24]在模拟降雨条件下研究了不同团聚体粒径对团粒内聚力的影响,表明内聚力和溅蚀过程随土壤团聚体粒径的增加而减少。由于降雨过程中坡面土壤大颗粒逐渐被分解和搬运,而细小颗粒聚合稳定性较高不易被分解,因此前 16 min 分形维数 D 值迅速增加,此后分形维数增加趋于平缓。

PERFECT 等^[25]认为土壤团聚体物理破碎发生在其结构稳定性最弱时,是一个物理能量持续作用的结果。研究表明,土壤团聚体的稳定性影响其分离过程,而相对机械破碎指数 RMI 反映了土壤团聚体在雨滴打击、径流剪切等外应力下对机械破坏的抵抗能力,当 RMI 值较大时,表明团聚体易受机械破碎作用^[17]。因此,文本以 RMI 为基础指标反映被侵蚀土壤团聚体的稳定性特征,对坡面侵蚀土壤团聚体粒径分形维数 D 与时间 T 和相对机械破碎指数 RMI 进行回归分析,其关系式为

$$D = 1.22RMI + 2.219T^{0.024} \quad (R^2 = 0.961, n = 21)$$

(6)

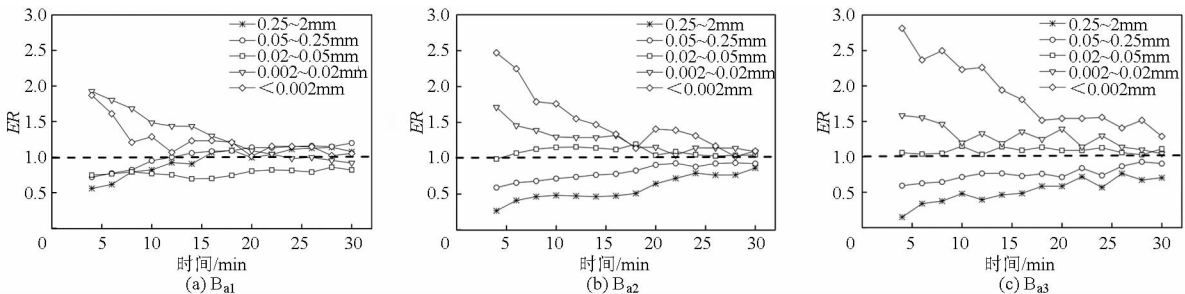


图 5 不同粒径 ER 值的变化情况

Fig. 5 Changes of sediment particles enrichment ratio ER of different particles

综上可见,降雨雨滴对于坡面侵蚀过程中泥沙团粒结构的变化具有重要作用。通过减少坡面降雨雨滴和增加植被覆盖度的方式,以此来降低坡面雨滴动能,能够有效控制侵蚀过程和减少土壤养分流失。由于土壤团粒结构组成的差异性,研究北京褐土地地侵蚀过程中不同粒径颗粒的分离和输移规律对于治理该区水土流失问题,提高水土保持效益具有实际意义。

3 结论

(1)通过增加纱网和植被覆盖降低雨滴打击作

2.3.2 坡面侵蚀泥沙颗粒输移特征

地表径流是坡面侵蚀泥沙输移的主要载体,在泥沙输移过程中径流对泥沙的粒径分选过程可以通过富集比 ER 进行说明^[18],图 5 为 65 mm/h 降雨强度 B_{a1} 、 B_{a2} 、 B_{a3} 试验下的 ER 值的变化情况。结果表明,3 种试验处理下粗砂粒和细砂粒 ER 均值分别为 0.94 和 1.03、0.58 和 0.80、0.52 和 0.76,随着降雨历时的增加 ER 逐渐增大,表明侵蚀过程中砂粒逐渐被消耗,这是由于砂粒多以团聚体形式存在,其团聚体结构稳定性较低,在输移过程中被逐渐分解。粗粉粒和细粉粒 ER 均值分别为 0.78 和 1.30、1.08 和 1.26、1.09 和 1.29,在试验坡面细粉粒 ER 随降雨历时逐渐减小,表明侵蚀过程中细粉粒逐渐富集,通过上述分析可知坡面粗粉粒多以初级粒子形式存在,因此其在侵蚀泥沙中的含量波动趋势较小,主要受径流输移能力的影响。降雨过程中粘粒 ER 均大于 1,且随着降雨历时的延长迅速减小并保持相对稳定,3 种试验处理下均值分别为 1.23、1.51 和 1.87,在坡面侵蚀过程中,粘粒由于其内聚力较强不易被分解,同时粘粒含量随着较大团粒的分解而增加,因此,该粒级颗粒在侵蚀过程中逐渐富集。对于不同植被覆盖度坡面,植被覆盖度的增加减少了降雨和径流的分离和输移能力,从而降低了对泥沙团粒结构的破坏程度,因此,砂粒富集比 ER 随植被覆盖度的增加而减小,坡面泥沙颗粒以细小颗粒富集为主。

用对于控制坡面侵蚀过程具有重要意义。同有雨滴打击作用坡面相比,消除雨滴作用后坡面径流率、含沙量、土壤分离率和土壤流失比均明显减小。同时,雨滴击溅作用还影响坡面土壤团粒结构的分离程度,无雨滴击溅坡面有效团粒中值粒径 D_{50E} 均小于雨滴击溅坡面 D_{50E} ,且随着降雨强度的增加而增大,这主要与雨滴打击坡面的径流紊动性有关。

(2)该区坡面侵蚀泥沙团粒结构变化过程表明,在坡面产流初始阶段粗砂粒、细砂粒、细粉粒和粘粒以团聚体形式存在,而粗粉粒多以初级粒子形式存在,表明该粒径颗粒对坡面侵蚀分离过程有重

要影响。随着降雨历时延长,侵蚀泥沙各粒级的分离程度增加,各粒级泥沙颗粒逐步分解为初级粒子。研究表明,泥沙团粒结构的变化与坡面水动力学特征密切相关,通过草本植被覆盖可有效降低降雨和径流对侵蚀泥沙颗粒的分离作用。

(3)雨滴击溅作用影响坡面侵蚀过程的粒径分选性。坡面产流前雨滴击溅对土壤的分离贡献比占总分离程度的 28.09%,而无雨滴打击坡面的泥沙

1 FARENHORST A, BRYAN R B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow[J]. CATENA, 1995, 25: 47 – 62.

2 PENG L, WANG J Z, YU C Z. Nutrient losses in soils on Loess Plateau[J]. Pedosphere, 1995, 5(1): 83 – 92.

3 BISSONNAIS Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 425 – 437.

4 EMERSON W W, GREENLAND D J. Soil aggregates—formation and stability [M] // De BOODT M F, HAYES M H B, HERBILLON A, et al. Soil Colloids and Their Associations in Aggregates, Springer US, 1990:485 – 511.

5 SLATTERY M C, BURT T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow[J]. Earth Surface Processes & Landforms 1997, 22(8):705 – 719.

6 MARTINEZ-MENA M, ROGEL J A, ALBALADEJO J, et al. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment[J]. CATENA, 2000, 38(3):175 – 190.

7 王军光,李朝霞,蔡崇法,等. 集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及抗剪强度定量关系[J]. 土壤学报,2011,48(6): 1133 – 1140.

WANG Junguang, LI Zhaoxia, CAI Chongfa, et al. Quantitative relationships of detachment rate of red soil in concentrated flow with soil aggregate characteristics and soil shear strength[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6):1133 – 1140. (in Chinese)

8 何小武,张光辉,刘宝元. 坡面薄层水流的土壤分离实验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 52 – 55.

HE Xiaowu, ZHANG Guanghui, LIU Baoyuan. Soil detachment by shallow flow on slopes[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 52 – 55. (in Chinese)

9 程金花,秦越,张洪江,等. 华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 153 – 161.

CHENG Jinhua, QIN Yue, ZHANG Hongjiang, et al. Splash erosion under artificial rainfall in rocky mountain area of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):153 – 161. (in Chinese)

10 毕小刚. 北京山区坡面土壤流失方程研究[D]. 北京:北京林业大学, 2007.

11 SUTHERLAND R A, WAN Y, ZIEGLER A D, et al. Splash and wash dynamics: an experimental investigation using an Oxisol [J]. Geoderma, 1996, 69(1 – 2):85 – 103.

12 尤焕苓,任国玉,吴方,等. 北京“7·21”特大暴雨过程时空特征解析[J]. 气象科技, 2014, 42(5): 856 – 864.

YOU Huanling, REN Guoyu, WU Fang, et al. Spatial and temporal characteristics of a summer rainstorm in 2012 in Beijing [J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(5): 856 – 864. (in Chinese)

13 丛月,张洪江,程金花,等. 华北土石山区草本植被覆盖度对降雨溅蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 1 – 5.

CONG Yue, ZHANG Hongjiang, CHENG Jinhua, et al. Effects of herbaceous plant coverage rate on rainfall splash in rocky mountain area of northern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 1 – 5. (in Chinese)

14 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 104 – 112.

SHEN Haiou, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. Effects of raindrop impact on rill erosion characteristics on loess hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 104 – 112. (in Chinese)

15 GABET E J, DUNNE T. Sediment detachment by rain power[J]. Water Resource Research, 2003, 39(1): ESG1 – 1 – ESG1 – 12.

16 ISSA O M, BISSONNAIS Y L, PLANCHON O, et al. Soil detachment and transport on field and laboratory-scale interrill areas: erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2006, 31(8):929 – 939.

17 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 95 – 103.

MA Renming, CAI Chongfa, LI Zhaoxia, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozom[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3):95 – 103. (in Chinese)

18 SHI Z H, YUE B J, WANG L, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(1): 257 – 267.

19 吴普特,周佩华. 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用[J]. 水土保持通报,1992,12(4):19 – 26.

WU Pute, ZHOU Peihua. The action of raindrop splash on sheet flow erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4):19 – 26. (in Chinese)

分离程度较低,其分形维数增量是有雨滴打击坡面土壤团聚体粒径增量的 48.43%。在坡面土壤侵蚀过程中,可采用相对机械破碎指数 *RMI* 反映侵蚀土壤团粒结构的稳定性特征。该区土壤团粒输移过程中各粒径颗粒表现不同,其中,结构稳定性较差的砂粒被分解为细小颗粒,粗粉粒多以初级粒子形式存在对坡面侵蚀泥沙颗粒分离过程具有重要影响,而粘粒在侵蚀坡面逐渐富集。

参 考 文 献

removing ammonia[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2013, 30(11): 2037 – 2042.

19 孟海玲, 陶秀萍, 董红敏, 等. 猪场厌氧出水后续处理效果的测定[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 231 – 234.
MENG Hailing, TAO Xiuping, DONG Hongmin, et al. Measurement of post-treatment efficiency for anaerobic digestion effluent from swine wastewater treatment[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 231 – 234. (in Chinese)

20 李云, 姜培正. 过程流体机械[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2008.

21 华依青. 搅拌器在化工单元设备中的选用[J]. 化工设计, 2004(6): 10 – 13.

22 张平亮. 搅拌器的选择和设计[J]. 化工设备设计, 1996, 33(1): 15 – 21.

23 王莎. 方形搅拌槽单颗粒临界悬浮时槽底湍流特性[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
WANG Sha. Turbulence characteristics of off-bottom solids suspension in bottom of solid-liquid square stirred tank[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014. (in Chinese)

24 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.

25 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.

26 刘芳, 张万钦, 吴树彪, 等. 厌氧发酵中挥发酸含量与碳酸氢盐碱度的滴定法修正[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 91 – 96.
LIU Fang, ZHANG Wanqin, WU Shubiao, et al. Titration method for total inorganic carbon and volatile fatty acids determination in anaerobic digestion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 91 – 96. (in Chinese)

27 李瑞华, 韦朝海, 吴超飞, 等. 吹脱法预处理焦化废水中氨氮的条件试验与工程应用[J]. 环境工程, 2007, 25(3): 38 – 40.

28 CAMPOS J C, MOURA D, COSTA A P, et al. Evaluation of pH, alkalinity and temperature during air stripping process for ammonia removal from landfill leachate[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2013, 48(9): 1105 – 1113.

29 李小平. 猪场废水厌氧消化液氨氮吹脱法处理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
LI Xiaoping. Ammonian stripping of anaerobic digestion effluent of swine wastewater[D]. Beijing: China Agricultural University, 2010. (in Chinese)

30 杜倩. 厌氧发酵系统中消化液循环利用试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
DU Qian. Study on recycling digestive effluent in the system of anaerobic fermentation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 145 页)

20 吴永, 何思明, 李新坡. 降雨作用下坡面侵蚀的水动力机理[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2440 – 2444.  
WU Yong, HE Siming, LI Xinpo. The hydrodynamic mechanism of slope erosion under rainfall[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2440 – 2444. (in Chinese)

21 LEGOUT C, LEGUEDOIS S, BISSONNAIS Y L, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005, 124(3): 279 – 292.

22 汤立群. 坡面降雨溅蚀及其模拟[J]. 水科学进展, 1995, 6(4): 304 – 310.  
TANG Liqun. Soil erosion caused by impacts of raindrop on the sloping land and its simuation[J]. Advances in Water Science, 1995, 6(4): 304 – 310. (in Chinese)

23 WANG L, SHI Z H, WANG J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 512: 168 – 176.

24 ABU-HAMDEH N H, ABO-QUDAIS S A, OTHMAN A M. Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics [J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(5): 609 – 616.

25 PERFECT E, KAY B D. Fractal theory applied to soil aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(6): 1552 – 1558.