

DOI: 10.20103/j.stxb.202412313210

刘壮壮, 和继军, 段光耀, 孙莉英, 蔡强国, 黎雪晴. 不同降雨-坡度条件下黄土坡面侵蚀泥沙颗粒特征研究. 生态学报, 2025, 45(13): - .

Liu Z Z, He J J, Duan G Y, Sun L Y, Cai Q G, Li X Q. Study on the particle characteristic of slope erosion sediment on loess under varied rainfall-slope conditions. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

不同降雨-坡度条件下黄土坡面侵蚀泥沙颗粒特征研究

刘壮壮¹, 和继军^{1,*}, 段光耀¹, 孙莉英^{2,3}, 蔡强国^{2,3}, 黎雪晴¹

1 首都师范大学 城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地 水资源安全北京实验室, 北京 100048

2 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100190

摘要:为探究不同降雨和坡度条件下黄土坡面侵蚀泥沙粒径分布及分选特征,更好地理解黄土坡面泥沙分离、输移和沉积过程,该研究以黄土高原两种典型土壤(黄土、沙黄土)为研究对象,在模拟人工降雨实验条件下,开展了 10 m 坡长下不同坡度(5°、7.5°、10°和 15°)和降雨强度(60 mm/h 和 90 mm/h)条件下坡面侵蚀过程以及泥沙颗粒变化特征研究。结果表明:(1)60 mm/h 雨强时,两种土壤侵蚀泥沙颗粒主要由粉粒和细砂组成,其含量占整个泥沙侵蚀量的 65%—95%,且黄土、沙黄土分别在 5°和 7.5°以及 7.5°和 10°之间存在临界坡度,导致粉粒和细砂侵蚀规律相反;90 mm/h 雨强时,两种土壤侵蚀泥沙颗粒级配更接近原状土。(2)60 mm/h 雨强下,黄土和沙黄土黏粒富集率(Enrichment Ratio, ER) < 1,粉粒的 ER 接近 1,细砂粒的 ER > 1,侵蚀泥沙颗粒以细砂的富集为主。90 mm/h 雨强下,两种土壤富集率规律相反,黄土仍以细砂的富集为主,沙黄土以黏粒的富集为主。(3)60 mm/h 雨强下,各坡面随着降雨的持续,两种土壤 d_{50} 值呈现降低的趋势,且 d_{50} 值随坡度增加而减小;90 mm/h 雨强下,两种侵蚀泥沙颗粒级配会更快接近稳定。研究结果旨在揭示两种土壤侵蚀过程中泥沙粒径的变化规律,以为黄土坡面流失机理的深入理解提供数据支撑和理论依据。

关键词:模拟降雨;土壤侵蚀;颗粒分选;富集率;黄土

Study on the particle characteristic of slope erosion sediment on loess under varied rainfall-slope conditions

LIU Zhuangzhuang¹, HE Jijun^{1,*}, DUAN Guangyao¹, SUN Liying^{2,3}, CAI Qiangguo^{2,3}, LI Xueqing¹

1 State Key Laboratory of Urban Environmental Processes and Numerical Simulation, Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 College of Resources and Environment, University Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: This study examined sediment particle sorting dynamics across rainfall intensities and slope angles on Loess Plateau soils and to better understand the processes of sediment detachment, transport, and deposition, this study focused on two pedological types: primary loess (PL) and sandy remolded loess (SRL). Simulated rainfall experiments were conducted on 10 m slope lengths under different slope gradients (5°, 7.5°, 10°, and 15°) and rainfall intensities (60 mm/h and 90 mm/h) to analyze slope erosion processes and sediment particle size variations. The results showed that: (1) Under 60 mm/h rainfall, silt-fine sand fractions dominated both soils (PL: 82%—95%; SRL: 65%—88%), constituting

基金项目:国家自然科学基金(52179071,41977069)

收稿日期:2024-12-31; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hejijun_200018@163.com

the primary erosion components. Threshold slopes emerged at 5° — 7.5° (PL) and 7.5° — 10° (SRL), inducing divergent silt-fine sand transport regimes. At a rainfall intensity of 90 mm/h, the sediment particle size distribution of both soils became more similar to that of the undisturbed soils, and with rill formation leading to elevated clay fractions in transported sediments. (2) At a rainfall intensity of 60 mm/h, the enrichment ratio (ER) of clay particles in both primary loess and sandy remolded loess was less than 1, the ER of silt particles was close to 1, and the ER of fine sand particles was greater than 1, indicating that sediment erosion was primarily dominated by fine sand enrichment. At 90 mm/h, the enrichment patterns of the two soils reversed, with fine sand enrichment remaining dominant for loess, while clay enrichment became dominant for sandy loess. (3) At 60 mm/h rainfall intensity the median particle size (d_{50}) of both loess types was generally higher than that of undisturbed parent materials, and the d_{50} values decreased over time as rainfall continued, and also decreased with increasing slope gradients, indicating surface soil fines enrichment processes on both loess and sandy loess slopes. Threshold slopes existed for primary loess (5° — 7.5°) and sandy remolded loess (7.5° — 10°) respectively, beyond which surface fines enrichment stabilized over time. At 90 mm/h rainfall intensity, the sediment particle size distribution of both soils stabilized more rapidly. The d_{50} values of loess remained higher than parent materials, whereas those of sandy loess became lower than parent materials. Rainfall induced surface fines enrichment on loess slopes, but promoted surface coarsening on sandy loess slopes through selective particle sorting. This research elucidates particle sorting mechanisms governing loess slope erosion, advancing predictive models for sediment transport dynamics of the two soil types, providing data support and theoretical insights for a deeper understanding of the mechanisms of loess slope erosion.

Key Words: simulated rainfall; soil erosion; particle sorting; enrichment rate; loess

土壤侵蚀是全球性的环境问题,黄土高原作为我国重要的生态屏障,其土壤侵蚀问题尤为突出。黄土结构松散,易受水蚀影响,导致土壤颗粒流失,这不仅引起土地退化,还可能引发河道淤积、洪涝灾害以及水体富营养化等问题。土壤中固体组分的大小、形状及其结合方式共同决定土壤的结构与质地,并进一步影响土壤的物理性质,而泥沙作为土壤侵蚀的产物,其颗粒的粒径分布不仅影响泥沙运输和沉积过程,也是土壤侵蚀预报、泥沙输移模型的重要参数。受团聚体的影响,侵蚀泥沙颗粒与原状土颗粒大小分布会有所不同,对侵蚀泥沙颗粒进行研究可以得出土壤颗粒各粒级迁移的难易程度、迁移方式,进而明确侵蚀、搬运和沉积过程^[1-3]。因此,深入研究模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀泥沙颗粒的特征,对于理解侵蚀过程、评估土壤流失风险及制定水土保持措施具有重要意义。

土壤侵蚀泥沙颗粒分选特征一直是坡面侵蚀的研究重点,被国内外学者广泛关注。Massey 和 Jackson 提出富集率的概念,能够用来描述不同粒级团聚体迁移的难易程度^[4],富集规律在水土保持和环境保护中具有重要意义^[5]。坡度、坡长、降雨强度和土壤质地对侵蚀泥沙颗粒的大小分布有着重要影响,不少学者也进行过实验研究,在 1980 年,Alberts 等^[6]曾指出,侵蚀泥沙物理化学输移特性受泥沙各级未分散颗粒的机械组成影响;Berger^[7]等在研究细沟发育时,认为雨强对泥沙颗粒分布的影响更大;Kiani 等^[8]指出当雨强增大,细沟产生时,径流对泥沙不具分选性,泥沙粒径分布接近原状土;郝燕芳^[9]总结他人研究规律,认为通常情况下,能量小时,径流优先输移细颗粒,随着能量增大,泥沙颗粒逐渐变粗,当产生细沟时,泥沙粒径分布接近原土;张怡^[10]等研究认为,存在临界坡度,使泥沙未分散小颗粒含量随坡度先减小后增加。近年来,众多研究人员通过了不同的实验,如人工模拟降雨实验^[11-13],野外降雨实验^[14]、天然降雨实验^[15]、室内放水冲刷实验^[16]等,从不同的角度,如雨强和坡度^[8,10-11]、土壤类型^[17]、下垫面条件^[11,13]等对不同地区的侵蚀泥沙颗粒特征以及其与地形因子的关系等方面进行研究。尽管现有研究已对侵蚀泥沙颗粒特征进行了多方面探讨,但是针对不同降雨强度、坡度、产流产沙强度的相互影响下对侵蚀泥沙颗粒分布规律的研究并不多,地形因子和降雨强度对泥沙颗粒大小分布的影响机制尚不十分明确,因此本研究通过室内模拟降雨实验,结合先进的土壤颗粒分析技术,对黄土高原不同降雨和坡度条件下两种典型土壤坡面侵蚀泥沙的颗粒分布、富集特性以及中值

粒径进行系统研究,以期研究不同降雨-地形条件下的泥沙颗粒变化特征,可以揭示侵蚀过程中泥沙颗粒的转化机制,以期为黄土坡面流失机理的深入理解提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用两种土壤分别取自安塞水土保持试验站和绥德水土保持试验站。安塞水土保持试验站位于黄土高原中部陕西省延安市安塞县境内,地处黄土高原腹地,属黄土丘陵沟壑区,处于黄土带;绥德水土保持试验站地处陕西省榆林市绥德县内,同属黄土丘陵沟壑区,处于沙黄土带。这两个地区地形复杂,资源丰富,同时又是典型受人类活动影响的水土流失严重区,对于开展水土保持与生态环境建设科学研究和试验示范具有典型代表性。取自安塞水保站、绥德水保站的土壤分别以黄土、沙黄土叙述,均采集于耕地上表层 30 cm。土壤颗粒有机碳含量选取重铬酸钾外加热法测定;试验共进行 13 场降雨,每场降雨前均利用马尔文激光粒度仪对土壤颗粒进行粒度测定,取平均值作为最终的原状土颗粒机械组成(表 1)。

表 1 土壤机械组成

Table 1 Soil mechanical composition

土壤类型 Soil type	有机碳含量 Organic carbon content/(g/kg)	土壤机械组成 soil mechanical composition/%			
		黏粒 <0.002	粉粒 0.002—0.05	细砂 0.05—0.25	粗砂 ≥0.25
黄土 Loess	1.84	8.7	54.96	36.28	0.06
沙黄土 Sandy loess	1.79	7.86	48.88	42.81	0.45

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置

试验降雨系统(图 1)采用下喷式降雨系统,降雨高度为 18 m,覆盖面积为 27 m×18 m。为了更单纯地进行坡面土壤侵蚀观察^[18],试验降雨采用纯净水,通过调整设备喷嘴的尺寸和力度来调节降雨强度,使水从顶端喷射到空中,水流破碎,形成不同大小的水滴,降落至试验土槽,与自然条件下雨滴相似^[19]。试验土槽为钢制可变坡土槽,长、宽、高分别为 10、3、0.5 m,按 1.5 m 宽间隔平均分成两个的土槽,分别装填黄土(右)和沙黄土(左),坡度可调节范围为 0—25°。

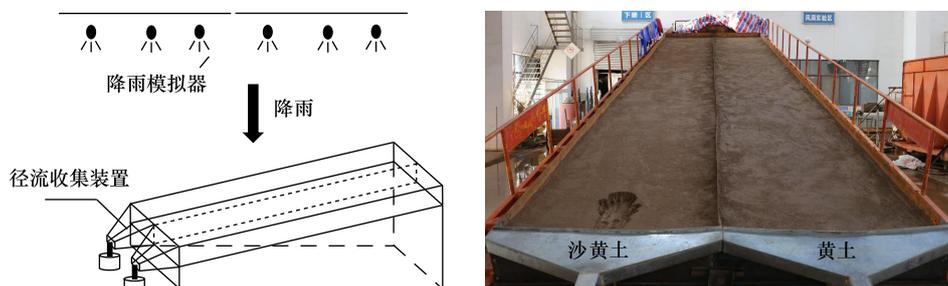


图 1 模拟降雨实验装置

Fig.1 Simulated rainfall experimental device

1.2.2 试验设计

试验前将土壤自然风干并过 10 mm 筛。装土之前,先在试验土槽的底部铺上 10 cm 厚的细沙,再覆盖透水的细纱布,随后采用分层填土法分六次填入 30 cm 厚的试验土壤,边填充边压实,每层表面用平尺拉毛,制造一定的地表糙度,装土时需要注意在边缘隔板处尽量压实以避免不必要的边缘效应^[20]。根据研究资料显示,黄土高原三个土层深度平均土壤容重在 1.25—1.37 g/cm³ 范围内^[21],土样装填完成后使用环刀取样并测定表层土壤容重,确保达到要求。每次降雨前,测量的土壤含水率和容重极端标准差,确保每次降雨实验的土

壤初始条件达到一致,并且反复率定降雨系统,使雨滴均匀度达到 80% 以上,连续三次率定结果的误差不超过 5% 即符合实验要求。根据现有资料可知,黄土高原坡度小于 7° 的耕地坡面占耕地总面积的比例达 50%,斜坡坡面与陡坡坡面占比较小^[19]。故本次实验选取 5°、7.5°、10° 和 15° 四种缓坡坡度进行研究,坡长选取 10 m。土壤侵蚀主要由暴雨侵蚀产生,24 小时内降雨量达到 50—100 mm 属于天然暴雨,本实验选取 60 mm/h 和 90 mm/h 两种降雨强度,以达到天然暴雨的级别^[22]。降雨历时 1 h,坡面开始产流后,分别记录两种土壤产流时间,在土槽出水口用容量为 1000 mL 的样瓶收集径流泥沙样,采样间隔为 1 min/次。在降雨过程中,土壤坡面可能会产生细沟,当坡面出现细沟侵蚀后,观察并记录细沟发育过程。降雨结束后,10 m 土槽坡面每隔 0.5 m 为一个断面,采用自制土壤取样器(为 10 cm×10 cm 铁框)在每一断面上等间隔取样 3 份,取样深度为 5 cm,随后混合为一个土样,用马尔文激光粒度仪测量其坡面表土泥沙颗粒机械组成,每个坡面取样 60 个。最后铲出土槽中剩下的土壤并风干,用相同的步骤对土槽进行装填,并进行实验。

1.3 指标参数

富集率(ER)是某粒级泥沙颗粒含量与原状土的比值,坡耕地土壤侵蚀引起土壤颗粒和养分的流失,土壤颗粒在径流中传输,其结果往往导致泥沙养分的富集,致使土壤生产力降低^[23]。其计算公式如下:

$$ER = \frac{P_e}{P_o} \quad (1)$$

式中, P_e 为侵蚀泥沙某一粒级的百分比(%), P_o 为原状土样某一粒级百分比(%). $ER > 1$,说明与原状土相比,该粒级颗粒在侵蚀泥沙颗粒中含量高,发生富集, $ER < 1$,该粒级颗粒在侵蚀泥沙颗粒中含量低,发生损耗, $ER = 1$,此时,降雨过程中主要消耗富集的是泥沙原始颗粒而不是泥沙侵蚀颗粒^[24]。

中值粒径 d_{50} 是一组样品的累计粒度分布质量百分数达到 50% 时所对应的粒径,是通过土壤颗粒级配曲线得出,在所有泥沙样品中,小于或大于这一粒径的泥沙在质量上相等, d_{50} 值越小,泥沙颗粒越细,反之则越粗,现有研究将 d_{50} 值作为评判样品粒度大小的平均粒径指标^[13]。

1.4 数据处理

数据处理与分析在 Excel 2013 中完成,绘图在 Origin 2022b 中完成。借助马尔文 2000 计算样品的统计学指标,包括中值粒径 d_{50} ,并计算富集率。

2 结果与分析

2.1 侵蚀泥沙的颗粒含量及变化规律

图 2 为黄土和沙黄土侵蚀泥沙各粒径含量随时间的变化规律。由图可知,60 mm/h 雨强时,两种土壤侵蚀泥沙颗粒主要由粉粒和细砂组成,其含量占整个泥沙侵蚀量的 65%—95%,在降雨中后期,黏粒和粗砂的百分含量都低于 10%,粉粒和细砂的百分含量波动较大,两者的增减趋势随着降雨历时呈现截然相反的关系。

60 mm/h 雨强降雨初期,黄土各粒级百分含量波动幅度大,之后趋于平稳。在整个降雨过程中,四个坡度下黏粒的含量始终低于原状土,且均维持在 2%—5% 的水平;粗砂含量与原状土一致,均维持在极低的水平。在降雨侵蚀过程中,粉粒含量普遍低于原状土,而细砂含量则高于或与之持平,说明侵蚀过程径流主要剥蚀土壤中的细砂颗粒。5° 时,黄土侵蚀泥沙中粉粒含量随着降雨历时下降,其余坡度历时上升,而细砂呈完全相反的状态,在降雨前期,雨滴的击溅动能直接影响团聚体颗粒的大小,黏粒的黏结作用大小间接影响团聚体的破碎程度,坡度大小影响径流对土壤的冲刷能力,雨滴的击溅作用导致团聚体中大颗粒破碎成松散的小颗粒,砂粒由于颗粒较大,团聚体中含量小,易被径流冲刷携带,故降雨初期砂粒含量较大,随着时间的推移,径流挟沙能力下降,同时粗颗粒更容易在浅流中沉积,因此粉粒含量会增加,相应的砂粒含量便慢慢减小。黄土的粉粒和细砂含量在 5° 时与其余三个坡度变化趋势不同,初步说明 60 mm/h 雨强时黄土在 5° 和 7.5° 之间存在临界坡度,导致粉粒和细砂侵蚀规律相反。

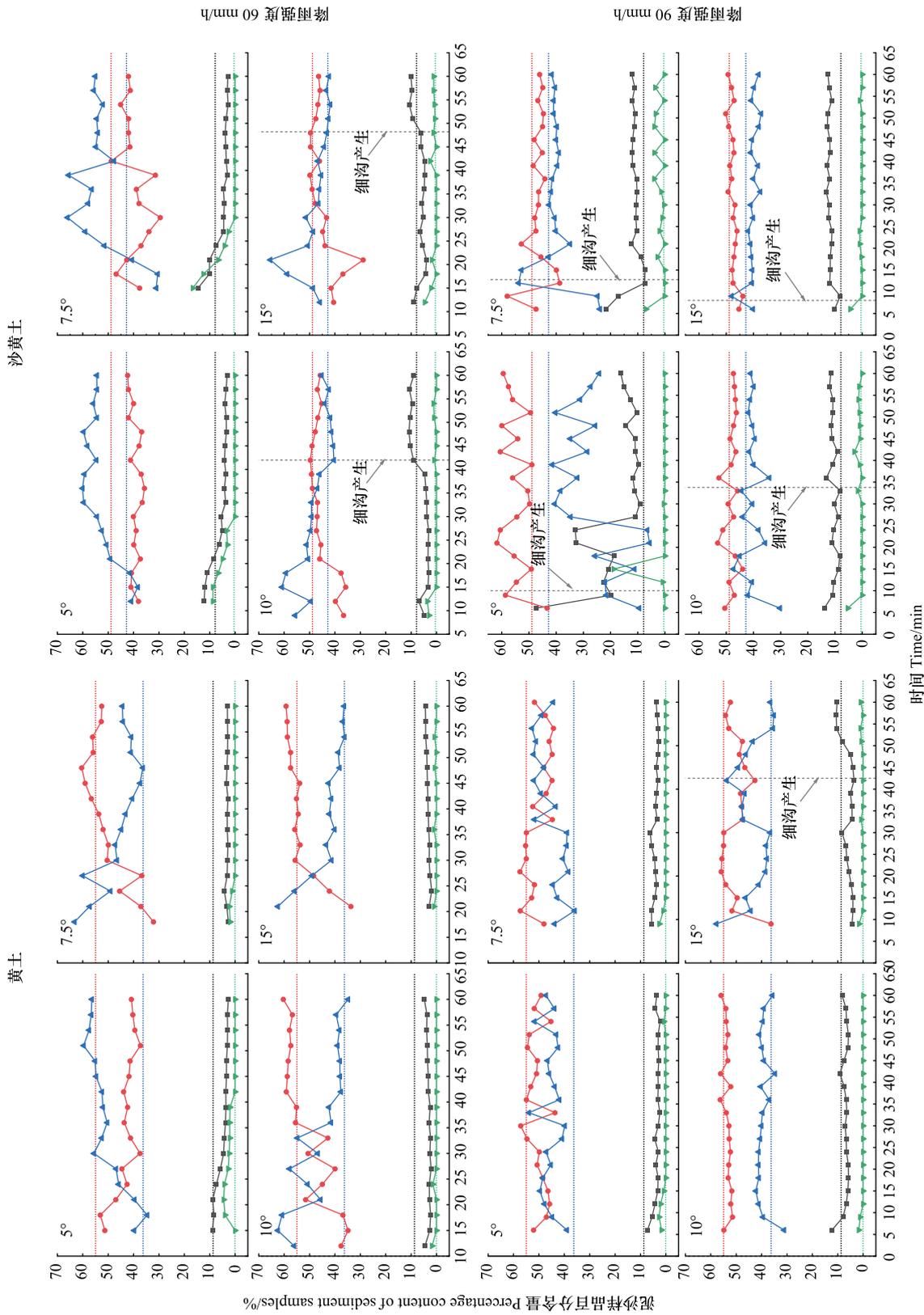


图2 不同雨强和坡度下泥沙颗粒含量的变化
虚线代表原状土粒级含量

Fig.2 The change of sediment particle content under different rainfall intensity and slope
虚线代表原状土粒级含量

沙黄土原状土黏粒与粉粒含量高于黄土,细砂含量低于黄土,故在降雨过程中沙黄土与黄土的侵蚀泥沙颗粒百分含量随时间变化与黄土不同。5°和 7.5°坡度时,沙黄土黏粒与粗砂含量在降雨初始时含量较高,处于 10%—15%之间,之后便随着降雨历时缓缓下降,在 30 min 时达到平稳状态;10°和 15°时,沙黄土产生了细沟,细沟的产生使侵蚀泥沙中黏粒含量明显上升 6%左右,5 min 后黏粒含量趋于平稳,细沟产生对其余粒级颗粒的百分含量无明显影响;沙黄土 60 mm/h 雨强时粉粒和细砂含量数值大小变化趋势与黄土类似,但波动幅度要小于黄土,随着坡度的增加,径流冲刷能力更大,各粒级含量趋于稳定,说明大坡度下径流对沙黄土部分坡面会进行无差异剥蚀,60 mm/h 雨强时沙黄土在 7.5°和 10°之间存在临界坡度,导致粉粒和细砂侵蚀机制相反。

90 mm/h 雨强时,两种土壤降雨前期侵蚀泥沙颗粒波动比 60 mm/h 雨强波动要大,粉粒和细砂变化规律与 60 mm/h 雨强类似,不同的是,两种土壤在整个降雨过程中黏粒的含量有所增加,黄土侵蚀泥沙中黏粒含量依旧始终低于原状土,而沙黄土黏粒含量始终高于原状土含量,这是由于降雨强度增大,产生的雨滴动能和径流侵蚀能力增强,对坡面土壤颗粒分散和输移程度高,沙黄土原状土黏粒含量比黄土低,土壤团聚体黏结作用小,土壤质地更松散,原存在于地表的泥沙颗粒或被雨滴击打所释放的细颗粒会被径流慢慢消耗,因此黏粒含量更高。并且两种土壤四个坡度下粉粒含量始终高于细砂含量,且粉粒和细砂含量与原状土含量接近,说明雨强和坡度的增大,会减弱径流对泥沙颗粒的选择性搬运作用,侵蚀泥沙颗粒级配会更快速接近稳定,该结论与郭进等^[25]的结论一致。尤其在高坡度条件下,细沟的形成标志着侵蚀过程的加剧,细沟的产生使两种土壤侵蚀泥沙中粉粒和细砂含量变化趋势出现波动,黏粒含量明显上升,最后都趋于平稳。

2.2 侵蚀泥沙颗粒富集率的变化特征

图 3 为不同雨强和坡度下面蚀过程泥沙样品黏粒、粉粒、细砂的富集率,由于原状土壤粗砂含量极低,比值没有意义,便不做分析。

60 mm/h 雨强下,两种土壤各粒级富集率总体规律类似,这是由于两种试验土壤原状土颗粒机械组成差

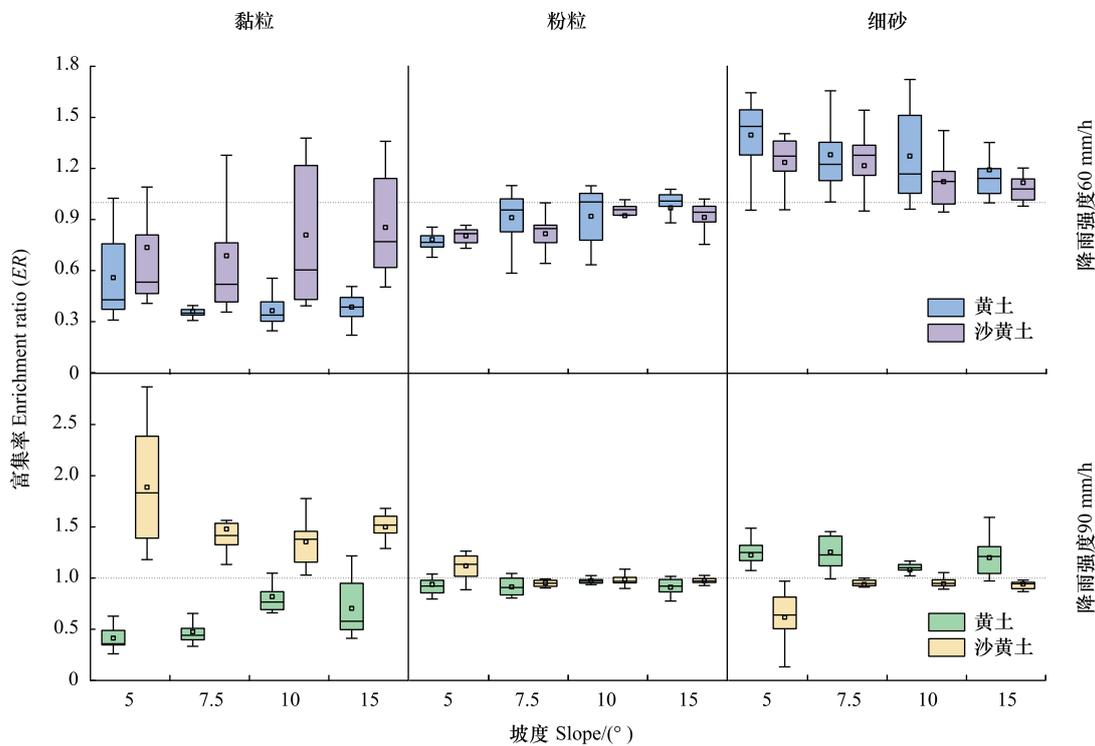


图 3 不同雨强和坡度下富集率的变化

Fig.3 The change of enrichment rate under different rainfall intensity and slope

异不大,各粒级差异在 6%以内。黄土和沙黄土的黏粒的 $ER < 1$,四种坡度下黄土黏粒 ER 值接近,约为 0.30 (中值)沙黄土黏粒的 ER 值大于黄土 0.20 左右,说明在侵蚀过程两种土壤的黏粒含量比原状土含量少得多。两种土壤粉粒的 ER 接近 1,说明侵蚀过程对其没有分选,细砂粒的 $ER > 1$,说明侵蚀泥沙颗粒以细砂的富集为主,随着降雨时间的延长,土壤中粗细颗粒分离现象严重,细颗粒会流失和下移,表土粗颗粒含量增加,径流冲刷也会挟带一部分团聚体或团聚体的破碎体,因此泥沙中细砂颗粒较原状土要多。该雨强下,随着坡度的增加,黄土粉粒 ER 值上升,黏粒和砂粒下降,沙黄土的黏粒和粉粒 ER 值上升,砂粒下降,但变化幅度不大,说明坡度并不是影响富集率的主要因素。

90 mm/h 雨强下,两种土壤的黏粒的 ER 值均有所增加,而粉粒和细砂无明显变化,表明雨强增加会对侵蚀泥沙细颗粒的富集产生影响,大雨强条件下细颗粒更易富集。对于黄土,侵蚀泥沙中黏粒的 $ER < 1$,粉粒的 ER 接近 1,细砂的 $ER > 1$;对于沙黄土,侵蚀泥沙中黏粒的 $ER > 1$,粉粒与细砂 ER 值除了坡度 5° 均接近 1。两种土壤侵蚀泥沙颗粒中的粉粒 ER 均接近 1,表明其以原始土壤的形式被搬运,该雨强下坡度对两种土壤 ER 值的影响不大。细沟的产生并没有改变黄土的颗粒富集规律,说明其细沟间侵蚀与细沟侵蚀泥沙颗粒搬运机制相似。两种土壤的泥沙颗粒富集率规律差异明显,表明侵蚀泥沙颗粒的分布和搬运与土壤质地有关。

2.3 侵蚀泥沙颗粒中值粒径的变化特征

由图 4、图 5 可知,60 mm/h 雨强下,两种土壤四种坡度下的侵蚀泥沙的 d_{50} 值降雨过程中大多数泥沙样值高于原状土壤,波动幅度在 40—70 μm 之间,侵蚀过程中, d_{50} 值随降雨历时的变化过程总体上主要分为两个阶段,一是产沙初期 d_{50} 值快速上升(下降)阶段:约历时 15 min;二是 d_{50} 值慢慢趋于稳定阶段。黄土 5° 坡度和沙黄土 5° 、 7.5° 坡度下 d_{50} 值随着降雨历时增加,其余情况下 d_{50} 值随着降雨历时下降,在侵蚀末期慢慢趋近于原状土背景值,此时含沙量也达到了稳定状态,说明 60 mm/h 降雨会使两种土壤坡面表层土壤细颗粒化,且小坡度下,黄土(5°)和沙黄土(5° 、 7.5°)细颗粒化程度随时间增加,其余坡度下,黄土(7.5° 、 10° 、 15°)和沙黄土(10° 、 15°)细颗粒化程度随时间减小,黄土在 5° 与 7.5° 之间、沙黄土在 7.5° 与 10° 之间存在临界坡度,使土壤表层细颗粒化程度随降雨历时保持不变。两种土壤侵蚀颗粒的黏粒与细粉粒含量均低于原状土,而小颗粒的减小会导致中值粒径 d_{50} 的增加。

90 mm/h 雨强下,四种坡度下,黄土的侵蚀颗粒 d_{50} 值水平高于原状土壤,所有样品 d_{50} 值波动幅度维持在 35—55 μm 之间, 15° 坡度细沟的产生并未使 d_{50} 值趋势有明显改变;沙黄土的侵蚀颗粒 d_{50} 值水平低于原状土

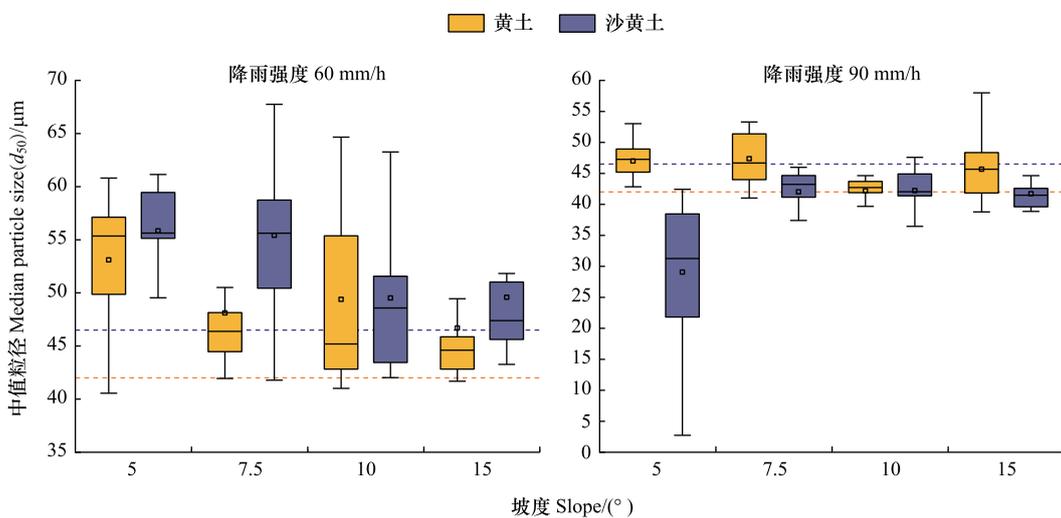


图 4 侵蚀泥沙颗粒次降雨 d_{50} 值
 Fig.4 The d_{50} value of erosion sediment particle rainfall
 虚线为原状土 d_{50} 值

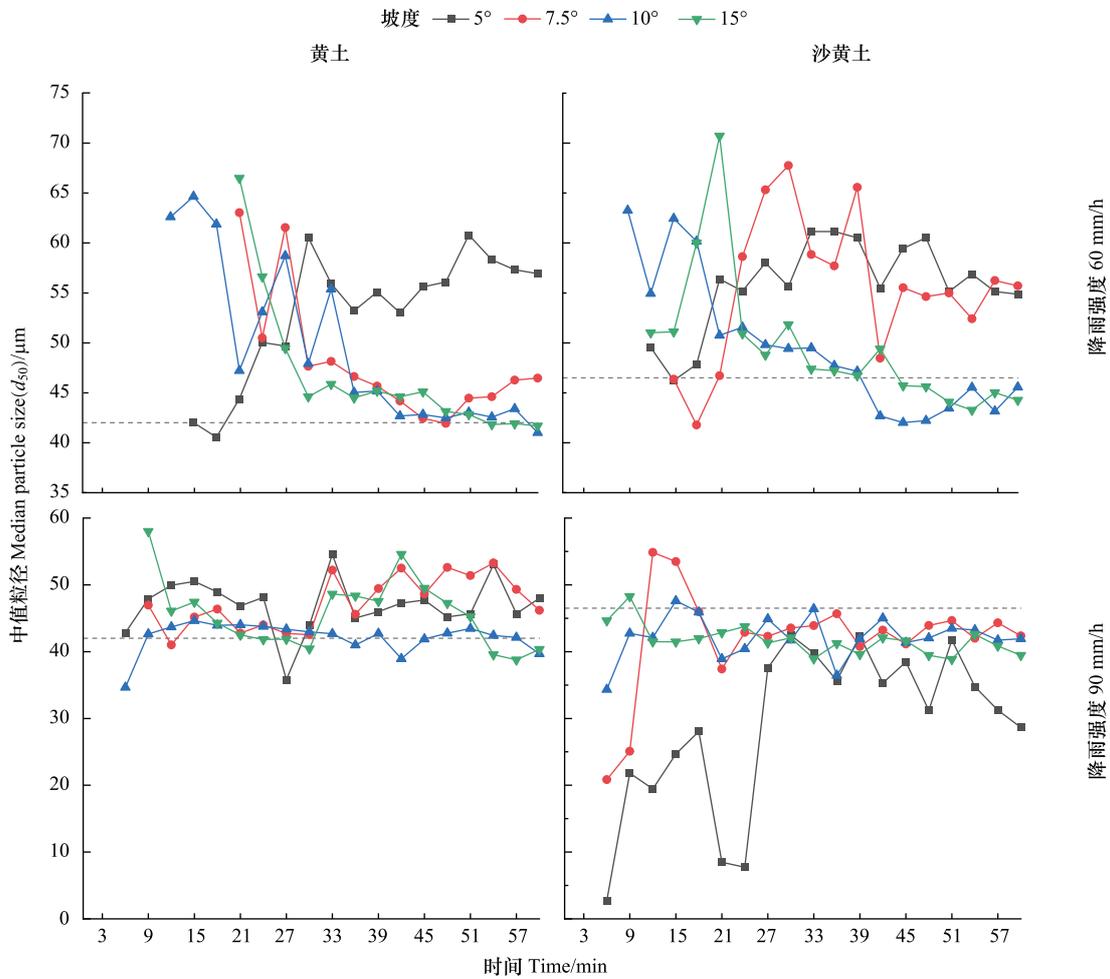


图5 不同雨强和坡度下 d_{50} 值的变化

Fig.5 The change of d_{50} value under different rainfall intensity and slope

虚线为原状土 d_{50} 值

壤,所有样品 d_{50} 值波动幅度维持在 5—50 μm 之间,降雨前期 5° 与 7.5° 坡度波动幅度较大,细沟的产生对 d_{50} 值无明显影响。5° 坡度下沙黄土的 d_{50} 值明显低于原状土,这与前文沙黄土黏粒富集率较大结果一致。初步说明降雨使黄土坡面表层土壤细颗粒化,使沙黄土粗颗粒化,从颗粒 d_{50} 值波动幅度上看,降雨前期黄土侵蚀过程比沙黄土更稳定,整个降雨过程中黄土的 d_{50} 值水平平均高于沙黄土,说明侵蚀颗粒 d_{50} 值与土壤质地有关,坡度对两种试验土壤的样品 d_{50} 值无明显影响。

3 讨论

侵蚀过程中泥沙颗粒特性与土壤团聚体破碎情况和径流携沙能力有关,侵蚀泥沙的粒径分布是影响坡面侵蚀沉积的主要因素,也是泥沙物质输移模型的重要参数之一,此外,侵蚀泥沙颗粒特征的定量描述可以反映土壤结构变化和径流选择性搬运特性,对于深刻理解坡面侵蚀过程和泥沙颗粒的分选特征具有重要意义 [8,26—27]。

本研究表明,降雨强度、土壤质地、坡度均是侵蚀泥沙颗粒粒度分布的影响因子,李旭尧 [28] 和吴凤至等 [24] 学者通过分析不同降雨强度和不同降雨历时各粒级泥沙含量的变化情况,得出粒径分布是由降雨强度、产沙强度、原始颗粒、产流强度和坡面流速共同决定,并且在不同侵蚀阶段,各粒级含量分布情况有所不同,与

本研究结果类似,两种土壤侵蚀泥沙中颗粒表现出的粒径差异,是由各种因素综合造成。两种土壤侵蚀泥沙中粉粒和细砂均占比最高,并且粉粒和细砂的百分含量波动较大,两者的增减趋势随着降雨历时呈现截然相反的关系,即细砂含量的增加会导致粉粒含量的减少,反之亦然,这与许多学者得出的结论一致^[25,29-30]。60 mm/h 雨强时,雨滴溅蚀作用弱,坡面径流产生的影响更大,径流对搬运土壤颗粒会有选择性,90 mm/h 雨强时,无论是面状侵蚀还是细沟侵蚀,径流的侵蚀分选作用并不明显,该结论与郭进等^[25]的结论一致,且本研究表明 5°和 7.5°坡度下侵蚀泥沙的颗粒含量差异更为显著,并且随着坡度的增加,会减弱径流对泥沙颗粒的选择性搬运作用,使侵蚀泥沙颗粒级配会更快速接近稳定。郭伟等^[31]的研究表明坡面侵蚀过程是土壤可蚀性与土壤营力之间相互作用的过程集合,土壤质地因素是决定坡面侵蚀的重要因素之一,由于土壤颗粒粒径组成不同,坡面侵蚀过程差异显著,与本研究的结论印证,如 60 mm/h 雨强时侵蚀泥沙中黄土黏粒的含量始终低于原状土,这是由于黄土原状土黏粒含量大,团聚体比较稳定,而 60 mm/h 雨强的雨滴能量不足以使土壤团聚体完全破碎;而沙黄土黏粒与粗砂含量在降雨初始时含量较高,由于沙黄土黏粒含量小,土壤团聚体稳定性小于黄土,雨滴击溅和径流冲刷作用使得沙黄土坡面小颗粒被优先搬运。

本研究中,60 mm/h 雨强时黄土和沙黄土的黏粒的 $ER < 1$,即与供试土壤颗粒含量相比,黏粒含量远小于原土,在侵蚀过程中该粒级的土壤发生了损耗,两种土壤粉粒的 ER 接近 1,说明侵蚀过程对其没有分选,两种土壤细砂粒的 $ER > 1$,说明侵蚀泥沙颗粒以细砂的富集为主,在 60 mm/h 雨强降雨初期,雨滴动能不足以使黏结力强的稳定团聚体破碎,雨滴击溅和径流只能破坏脆弱的土壤团聚体,部分细颗粒会随着径流流失,另一部分会通过土壤孔隙下移,黄土黏粒与粉粒含量高于沙黄土,形成的土壤团聚体黏结力更高,因此黏粒与粉粒的含量略低于沙黄土,这与吴凤至等^[24]和汤珊珊等^[13]的研究的壤土和黄绵土的黏粒富集率规律相反,可见土壤质地的不同会很大程度上影响泥沙颗粒的侵蚀规律。而在 90 mm/h 雨强下,对于黄土,侵蚀泥沙中黏粒的 $ER < 1$,粉粒的 ER 接近 1,细砂的 $ER > 1$;对于沙黄土,侵蚀泥沙中黏粒的 $ER > 1$,粉粒与细砂 ER 值除了坡度 5°均接近 1,表明该雨强下侵蚀泥沙中,黄土的黏粒发生了损耗,沙黄土的黏粒发生了富集,这是由于在该雨强下,雨滴动能已经足以使黏结力强的稳定团聚体破碎,所以沙黄土侵蚀泥沙中黏粒含量高于原状土,而黄土的土壤团聚体黏结力更高,因此黄土侵蚀泥沙中黏粒含量有所上升,但是仍没有接近原状土,表明这种侵蚀的分选性主要受降雨和径流能量的限制,并必然与土壤内在性质有关^[9]。

4 结论

(1) 两种土壤侵蚀泥沙颗粒主要由粉粒和细砂组成,60 mm/h 雨强时,雨滴溅蚀作用弱,坡面径流产生的影响更大,径流对搬运土壤颗粒会有选择性,且对沙黄土选择性更强,该雨强下黄土、沙黄土分别在 5°和 7.5°以及 7.5°和 10°之间存在临界坡度,导致粉粒和细砂侵蚀规律相反;90 mm/h 雨强时,无论是面状侵蚀还是细沟侵蚀,径流的侵蚀分选作用并不明显,随着坡度的增大,两种侵蚀泥沙颗粒级配会更快速接近稳定,细沟发生后,两种土壤侵蚀泥沙中粉粒和细砂含量变化趋势出现波动,黏粒含量明显上升,最后都趋于平稳。

(2) 60 mm/h 雨强下,黄土和沙黄土黏粒 $ER < 1$,粉粒的 ER 接近 1,细砂的 $ER > 1$,表明两种土壤以细砂的富集为主,90 mm/h 雨强下,两种土壤富集率规律相反,黄土以细砂的富集为主,沙黄土以黏粒的富集为主,两种黄土粉粒均以原状土壤的形式被搬运。

(3) 60 mm/h 雨强下,各坡面随着降雨的持续,两种 d_{50} 值呈现降低的趋势,两种土壤 d_{50} 值随坡度增加而减小,该降雨强度会使黄土与沙黄土坡面表层土壤细颗粒化;90 mm/h 雨强下,黄土 d_{50} 值高于原状土,沙黄土 d_{50} 值低于原状土,该降雨强度会使黄土坡面表层土壤细颗粒化,使沙黄土坡面表层土壤粗颗粒化,细沟的产生对两种土壤的颗粒富集规律和侵蚀样品 d_{50} 值无明显影响。

参考文献 (References):

- [1] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用. 土壤学报, 2002, 39(4): 490-497.
- [2] Liu G, Dabney S M, Yoder D C, Wells R R, Vieira D A N. Modeling land management effects on the size distribution of eroded sediment. Soil and

- Tillage Research, 2019, 192: 121-133.
- [3] 汤珊珊, 高海东, 李占斌, 任宗萍, 张辉, 苏远逸, 支再兴. 坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性. 农业工程学报, 2017, 33(2): 125-130.
- [4] Massey H F, Jackson M L. Selective erosion of soil fertility constituents. Soil Science Society of America Journal, 1952, 16(4): 353-356.
- [5] Yang Y, Ye Z H, Liu B Y, Zeng X Q, Fu S H, Lu B J. Nitrogen enrichment in runoff sediments as affected by soil texture in Beijing mountain area. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(2): 971-978.
- [6] Alberts E E, Moldenhauer W C, Foster G R. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(3): 590-595.
- [7] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, Schlunegger F. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456-1467.
- [8] Kiani-Harchegani M, Sadeghi S H, Asadi H. Comparing grain size distribution of sediment and original soil under raindrop detachment and raindrop-induced and flow transport mechanism. Hydrological Sciences Journal, 2018, 63(2): 312-323.
- [9] 郝燕芳, 佟帆. 侵蚀泥沙颗粒特征研究进展. 水土保持学报, 2020, 34(1): 1-7.
- [10] 张怡, 丁迎盈, 王大安, 谭诗, 杨扬, 刘宝元. 坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响. 水土保持学报, 2015, 29(6): 25-29.
- [11] 朱高立, 文博, 李静, 黄炎和, 邹伟, 林金石, 蒋芳市, 张建. 不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征. 土壤学报, 2016, 53(6): 1371-1379.
- [12] 张德谦, 倪世民, 王军光, 吴文泉, 蔡崇法. 不同侵蚀程度花岗岩红壤坡面侵蚀泥沙颗粒特征研究. 土壤学报, 2020, 57(6): 1387-1398.
- [13] 汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 唐辉, 王添. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究. 土壤学报, 2016, 53(1): 39-47.
- [14] 朱方方, 程金花, 王书韬, 李语晨. 湖北低山丘陵区侵蚀泥沙颗粒特征及其与地形因子的关系. 水土保持学报, 2021, 35(4): 27-33.
- [15] Martinez-Mena M, Rogel J A, Albaladejo J, Castillo V M. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment. Catena, 2000, 38(3): 175-190.
- [16] 蒋倩, 郑子成, 王永东, 李廷轩. 紫色土坡面细沟侵蚀过程中泥沙颗粒特性. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 114-121.
- [17] Rienzi E A, Fox J F, Grove J H, Matocha C J. Interrill erosion in soils with different land uses: The kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution. Catena, 2013, 107: 130-138.
- [18] 余新晓, 张晓明, 李建芳. 土壤侵蚀过程与机制. 北京: 科学出版社, 2009.
- [19] 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性. 水土保持通报, 2007, 27(6): 56-60.
- [20] 苗雨池. 不同人工降雨和坡度条件下区域产流产沙变化特征影响试验研究. 水利规划与设计, 2020(2): 54-58.
- [21] 于冬雪, 贾小旭, 黄来明, 邵明安, 王娇. 黄土区不同土层土壤容重空间变异与模拟. 土壤学报, 2019, 56(1): 55-64.
- [22] 郑粉莉, 唐克丽, 陈文亮. 细沟侵蚀过程的研究方法. 水土保持研究, 1993(1): 107-111.
- [23] Eshel G, Levy G J, Mingelgrin U, Singer M J. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 736.
- [24] 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江. 不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律. 环境科学, 2012, 33(7): 2497-2502.
- [25] 郭进, 文安邦, 严冬春, 史忠林, 巨莉. 三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征. 水土保持学报, 2012, 26(3): 18-21.
- [26] Parsons A J, Abrahams A D, Luk S H. Size characteristics of sediment in inter-rill overland-flow on a semiarid hillslope, southern Arizona. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16(2): 143-152.
- [27] 钱婧, 张丽萍, 王文艳. 红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性. 生态学报, 2018, 38(5): 1590-1599.
- [28] 李旭尧, 邓艳. 坡面产沙规律及侵蚀泥沙颗粒组成特征的研究. 广东化工, 2019, 46(23): 5-6, 8.
- [29] 崔斌, 张瑜, 许晓鸿, 王洋. 人工模拟降雨条件下坡面产沙规律及侵蚀泥沙颗粒特征研究. 中国水土保持, 2015(4): 43-45.
- [30] 赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子——以黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, 2015, 35(14): 4625-4632.
- [31] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 李朝霞, 闫峰陵, 蔡崇法. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响. 生态学报, 2007, 27(6): 2516-2522.