

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.054.

郭凯, 李玄添, 张风宝, 等. 雨型和坡长对侵蚀泥沙粒径特征的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 50-57.
GUO Kai, LI Xuantian, ZHANG Fengbao, et al. The Influence of Rainfall Patterns and Slope Lengths on the Characteristics of Eroded Sediment Particle Sizes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 50-57.

雨型和坡长对侵蚀泥沙粒径特征的影响

郭 凯¹, 李玄添¹, 张风宝^{1,2}, 申 楠^{1,2}, 杨明义^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为揭示降雨和坡长对侵蚀泥沙粒径特征的影响,以不同坡长野外观测试验小区为对象,结合 82 场降雨资料,以降雨量(P , mm)、最大 30 min 雨强(I_{30} , mm/h)和降雨侵蚀力 $[R, \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ 为降雨特征指标,利用系统聚类法进行雨型划分(A 雨型:大雨量、高雨强、高侵蚀力;B 雨型:中雨量、小雨强、中等侵蚀力;C 雨型:低雨量、中雨强、中低等侵蚀力),分析了 11 场降雨事件中侵蚀泥沙的粒径分布特征。结果表明:(1) 研究区侵蚀泥沙粒径特征受不同雨型影响,有效黏粒和最终黏粒含量在 C 雨型下最高,有效砂粒和最终砂粒含量在 B 雨型下最高,而有效粉粒和最终粉粒含量分别在 A 和 C 雨型下最高。(2) 坡长对侵蚀泥沙粒径特征的影响存在临界坡长效应(14 m),小于临界坡长时,黏粒级和粉粒级颗粒含量随坡长增加而降低;超过临界坡长后,黏粒级和粉粒级颗粒含量随坡长增加而增加,该效应在最终粒径下更为显著。(3) 有效砂粒输移形式受雨型和坡长影响较大,在 B 雨型下主要以团粒形式输移,在 A、C 雨型下达临界坡长时以单粒形式输移。侵蚀泥沙的有效粒径颗粒比原坡面土壤细,而最终粒径颗粒则比原坡面土壤粗。整体上,降雨类型和坡长对侵蚀泥沙粒径特征产生显著影响,侵蚀泥沙有效粒径颗粒呈细化趋势,而最终粒径颗粒呈粗化趋势,坡长对泥沙颗粒影响存在临界效应。

关键词:雨型; 坡长; 粒径分布; 黄土高原; 泥沙输移

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0050-08

Influence of Rainfall Patterns and Slope Lengths on the Characteristics of Eroded Sediment Particle Sizes

GUO Kai¹, LI Xuantian¹, ZHANG Fengbao^{1,2}, SHEN Nan^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To illustrate the influence of different rainfall patterns and slope lengths on the dispersion of soil particles, we took field plots with different slope lengths as the research objects and combined with data of 82 rainfall events to classify rainfalls as 3 types (type A: heavy rainfall, high rain intensity, high erodibility; type B: medium rainfall, light rain intensity, medium erodibility; type C: low rainfall, medium rain strong, medium and low erosion) by using hierarchy cluster based on rainfall (P , mm), maximum 30 min rainfall intensity (I_{30} , mm/h), and rainfall erodibility $[R, \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$. The particle size distribution characteristics of eroded sediments in 11 rainfall events were analyzed. The results showed that: (1) the composition of eroded sediment particles was affected by different rainfall patterns; the contents of effective and ultimate clay were the highest under type C, and the contents of effective and ultimate sand were the highest under type B, the content of effective silt was the highest under type A, and the content of ultimate silt was

the highest under type C; (2) there was a critical slope length effect (14 m) on the distribution of sediment particles; when the slope length was shorter than the threshold, the contents of clay and silt particles decreased with the increase of slope length; and it would increase with the slope length while the slope length was longer than the threshold; the effect on the ultimate particle size was even more significant; (3) the transport of sand particle was greatly affected by the rainfall type and slope length; under the rainfall type B, the transport of effective sand was mainly in the form of aggregated particle, while in the rainfall types A and C, it was transported in the form of single particle at the critical slope length. The effective particles of eroded sediment are finer compared with the original soil, while the ultimate particles were coarser. On the whole, the particle size characteristics of eroded sediment are affected by different rainfall types and slope lengths significantly. The effective particle size of eroded sediment tends to be finer, while the ultimate particle size tends to coarsen, and there is a threshold effect for the slope length on sediment particles.

Keywords: rainfall pattern; slope length; particle size distribution; Loess Plateau; sediment transport

土壤侵蚀是一个复杂的过程,其主要可分为雨滴击溅和径流冲刷引起的土壤颗粒分离、泥沙输移和沉积三大过程^[1-4]。土壤颗粒被雨滴及径流分离形成侵蚀泥沙,随坡面薄层水流输移,其输沙方式和输沙距离不仅取决于坡面流的水动力特性,而且还取决于泥沙的性质,特别是泥沙颗粒的大小和密度^[5-6]。作为泥沙的一种重要物理性质,泥沙颗粒的粒径分布(particle size distribution, PSD)一方面反映了土壤风化成土过程,对土壤侵蚀、输移和沉积的研究具有重要指示意义^[7-10]。另一方面,被侵蚀的泥沙是径流中土壤养分和污染物的主要输送介质,不同粒径中所输移的养分和污染物有所差异,其中细颗粒组分比粗颗粒组分更易吸附农药及其他化学物质,进而造成侵蚀区下游水资源污染和生态环境恶化^[5,11-13]。因此,随着对土壤侵蚀机理研究的不断加深,侵蚀泥沙的 PSD 特征不断受到关注^[14-16]。侵蚀泥沙 PSD 由多种因素决定,如土壤性质^[9,17]、土地利用类型^[18]、降雨前的土壤表面条件^[19]及降雨性质等^[20]。降雨性质对侵蚀泥沙 PSD 的影响主要体现在侵蚀的分选特征和搬运方式上。在降雨和径流动能有限的情况下,土壤受雨滴打击及径流分离影响较小,团聚体不易被破坏成单粒,导致坡面原有的较细单粒颗粒优先被运移走,而较粗的团聚砂粒在坡面沉积,因而产生的侵蚀泥沙往往较原坡面土壤细^[21-22]。随降雨和径流能量的增强,更多的泥沙粗颗粒被分离和搬运,侵蚀泥沙分选效果减弱。但当雨滴打击动能及降雨侵蚀力大到足够分散、破坏泥沙团聚体结构时,侵蚀泥沙中以原始单粒形式搬运的颗粒增多,其整体粒径与原坡面土壤相比也会变细。

坡长对侵蚀泥沙 PSD 的影响主要是通过影响坡面径流及侵蚀泥沙量所致。目前关于坡长对土壤侵蚀过程产流产沙机制的影响尚未有统一的观点^[23],

主要可分为以下 3 类看法。第一类是增长型,如付兴涛等采用人工模拟降雨发现不同雨强下坡长与红壤坡面产沙量间存在着幂函数关系($R^2 > 0.80$)^[24]。第 2 类是递减型,如陈晓安等的模拟降雨试验结果表明,在小雨强范围($I_{30} \leq 0.21 \text{ mm/min}$)时,随着坡长从 20 m 到 60 m 的增加,土壤侵蚀模数逐渐减小^[25]。第 3 类则是波动型,认为随坡长的增加,侵蚀量的变化并非单一的不变、增大或减小^[26]。坡长变化对泥沙粒径特征影响还未有系统的报道。

目前国内外关于不同侵蚀条件下泥沙粒径特征的研究主要以室内模拟降雨为主,缺乏野外天然降雨条件下的相关研究,天然降雨类型和坡长变化对泥沙 PSD 特征综合影响的研究鲜有报道。基于此,本研究通过天然降雨的原位观测试验,以安塞水土保持综合试验站不同坡长的野外裸坡径流小区为对象,通过雨型划分,分析 11 场侵蚀性降雨事件中泥沙 PSD 特征,揭示不同雨型及坡长对侵蚀泥沙粒径特征的影响,以期为深入理解黄土高原黄绵土坡地泥沙输移机制、控制坡耕地面源污染及营养元素流失提供科学的理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持综合试验站。安塞区属典型黄土高原丘陵沟壑区($108^{\circ}11' - 109^{\circ}26' \text{ E}, 36^{\circ}30' - 37^{\circ}19' \text{ N}$),土壤类型为黄绵土。地形地貌复杂多样,地势由西北向东南倾斜,属温带大陆性半干旱季风气候,多年平均降水量 505.3 mm ^[27]。

试验布设 7 个不同坡长的半阴坡径流小区,坡长分别为 5 m, 8 m, 11 m, 14 m, 17 m, 20 m 和 23 m,宽度均为 2 m,坡度均为 15° ,在整个雨季及时小心地拔

除小区坡面的杂草,保持裸露状态。本试验因场地限制,未进行重复试验,但由于观测时间较长,基于多次侵蚀性降雨的数据,可减少试验带来的较大偏差,尽可能地保证了试验结果的可靠性。

1.2 采样及分析方法

在径流小区底部设置有径流泥沙收集装置,依据安塞历年降雨资料,该装置容量足够满足径流泥沙的最大收集量。试验于 2017 年 5 月开始,至 2018 年 10 月底结束。在 2017 年、2018 年雨季来临前(5 月),在不同小区内上中下 3 个位置收集未侵蚀表土(深度为 0—20 cm)约 500 g,混合后作为基础土样以获取原始土壤的背景数据,并对小区进行定期除草处理。每次降雨产流后,采集泥沙样后,在 60℃低温条件下烘至恒重并称重,保存以供室内分析。研究期间的降水数据来自中国科学院安塞水土保持研究站,用以分析降雨雨型特征,包括降雨量(P , mm)、降雨历时(min)、平均雨强(mm/h)、最大 30 min 降雨强度(I_{30} , mm/h)、降雨动能(E , MJ/hm²)。

采用 MS2000 型激光粒度分析仪(测量范围:0~2 mm)测定土壤和泥沙样品的粒径组成,样品有两种处理方式,一种是不进行任何物理和化学分散,直接上机测得其粒径组成,称之为样品的有效粒径组成,该粒径组成可真实反映侵蚀过程中泥沙颗粒的存在和运移状态;另一种是样品经化学(六偏磷酸钠溶液)和物理(超声波)充分分散后再用激光粒度分析仪测得的原始单粒粒径组成,称之为最终粒径组成,等同于机械组成^[28]。测定过程中,设置激光粒度分析仪搅拌速度 2 500 r/min,遮光度范围 20%~30%。本文根据美国农业部土壤粒径分级方法^[21],将土壤和泥沙最终粒径组成为黏粒($d < 0.002$ mm),粉粒($0.002 \text{ mm} \leq d < 0.05$ mm)和砂粒($0.05 \text{ mm} \leq d < 2$ mm)3 个粒级。土壤和泥沙的有效粒径组成划分与最终粒径组成相统一,为有效黏粒($d < 0.002$ mm)、有效粉粒($0.002 \text{ mm} \leq d < 0.05$ mm)和有效砂粒($0.05 \text{ mm} \leq d < 2$ mm)3 个粒级。

1.3 数据处理

1.3.1 降雨雨型划分 根据 2017 年 5 月至 2018 年 10 月间共收集到 82 场完整的降雨资料,选取每场降雨的降雨量(P , mm)、最大 30 min 雨强(I_{30} , mm/h)和降雨侵蚀力 $[R, \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ 为指标,采用系统聚类分析法将降雨雨型划分为 A、B 和 C 共 3 种类型。其中,A 雨型为大雨量、高雨强、高侵蚀力;B 雨型为中雨量、小雨强、中等侵蚀力;C 雨型为低雨量、中雨强、中低等侵蚀力。系统聚类分析在 IBM SPSS Statistics 24.0 软件中完成。降雨侵蚀力 R 计

算公式如下:

$$R = EI_{30} \quad (1)$$

式中: E 为降雨总动能(MJ/hm²); I_{30} 为一场降雨中最大 30 min 降雨强度(mm/h)。

1.3.2 土壤及泥沙粒径特征指标计算

(1) 有效中值粒径(D_{50}')。指由土壤或泥沙有效粒径组成计算而得的中值粒径,用来表征有团粒状态下的土壤或泥沙的平均粒径大小。该指标可由激光粒度分析仪直接分析测定得出。

(2) 最终中值粒径(D_{50})。指由土壤或泥沙绝对粒径组成计算而得的中值粒径,表征单粒状态下的土壤或泥沙的平均粒径大小。该指标也可由激光粒度分析仪直接分析测定得出。

(3) 颗粒富集率(Enrichment ratio, ER)。采用颗粒富集率表征泥沙中各粒级有效颗粒的富集/贫化程度,其由土壤和泥沙的有效粒径组成数据计算而得,计算公式如式(2)所示。若某一粒级颗粒的 $ER > 1$,说明该粒级颗粒在侵蚀过程中被优先分离搬运,并在泥沙中富集;若 $ER < 1$,说明该粒级颗粒在侵蚀过程中不易被分离搬运或在搬运过程中易沉积,进而在泥沙中贫化。ER 的值越偏离 1,表明该粒级颗粒在侵蚀过程中分选性越强;越接近 1,则表明该粒级颗粒在侵蚀过程中分选性越弱^[13]。

$$ER_i = \text{Sed}_i / \text{Soil}_i \quad (2)$$

式中: ER_i 为 i 粒级的有效颗粒富集率; Sed_i 为泥沙有效粒径组成中 i 粒级的含量(%); Soil_i 为降雨前坡面原土壤有效粒径组成中 i 粒级的含量(%)(i 分别为 3 个不同粒级)。

(4) 团聚率(Aggregation ratio, AR)。采用团聚率指标表征泥沙中各粒级颗粒的团聚程度,其由泥沙的有效粒径组成和最终粒径组成数据计算而得,计算公式如式(3)所示:

$$AR_i = \text{Eff}_i / \text{Ult}_i \quad (3)$$

式中: AR_i 为 i 粒级的团聚率; Eff_i 为泥沙有效粒径组成中 i 粒级的含量(%); Ult_i 为相应条件下泥沙最终粒径组成中 i 粒级的含量(%)(i 分别为 3 个不同粒级)。若某一粒级颗粒的 $AR \neq 1$,说明该粒级颗粒在侵蚀过程中以团粒或团粒与单粒混合形式被分离搬运;若 $AR = 1$,说明该粒级颗粒在侵蚀过程中以单粒形式被分离搬运。AR 的值越偏离 1,表明该粒级颗粒在侵蚀过程中越倾向于以团粒形式被分离搬运;越接近 1,则表明其越倾向于以单粒形式被分离搬运^[28-29]。

本文所有表格用 Excel 2016 绘制,所有图用 Origin 2021 绘制,单因素方差分析(one-way ANOVA)用 IBM SPSS Statistics 24.0 进行。

2 结果与分析

2.1 雨型划分

利用 2017 年 5 月至 2018 年 10 月间收集的 82 场降水资料,进行雨型划分。在 82 场降雨数据中,历时超过 6 h 的降雨有 37 场,其中处于 6~12 h 的有 18 场,大于 24 h 的有 9 场,而小于 6 h 降雨共有 45 场,占比约为 54.9%,说明该地区以短历时降雨为主。本文以降雨量、最大 30 min 雨强和降雨侵蚀力为指标,采用系统聚类的方法将降雨分为 3 种类型。A 雨型:大雨量、高雨强、高侵蚀力;B 雨型:中雨量、小雨强、中等侵蚀力;C 雨型:低雨量、中雨强、中低等侵蚀力(表 1)。显著性检验结果显示,A 雨型与 B、C 雨型间差异显著($p<0.05$),表明该划分合理。

A、B、C 雨型样本占比分别为 6.1%、57.3%和 36.6%;平均累积降雨量占比为 16.3%、62.3%和 21.4%,说明划分的 3 种雨型均具有代表性。其中主要以 B 雨型(中雨量、低雨强、中等侵蚀力)为主,高侵蚀力的 A 雨型发生频率低,但是累积降雨量贡献大,这与研究区多年实际降雨情况相符。在 82 场降雨事件中,研究观测的小区有效试验的场次共计 11 场,其界定和选取标准为径流小区能够产生足够用以测定粒径分布的泥沙量,且保证每个降雨类型下均有三场及以上的有效试验(A 雨型为 3 场,B 雨型为 4 场,C 雨型为 4 场)。

表 1 基于系统聚类的不同降雨类型统计特征

降雨类型	指标 ⁽¹⁾	平均值	标准差	变异系数	总和	场次
A	$P^{(2)a}$	24.93	13.97	0.56	149.60	5
	$I_{30}^{(3)a}$	10.48	3.52	0.34	62.90	
	$R^{(4)a}$	51.08	30.26	0.59	306.49	
B	P^b	11.95	21.74	1.82	573.60	47
	I_{30}^c	2.70	2.68	0.99	129.51	
	R^b	10.81	28.84	2.67	518.95	
C	P^b	6.57	5.03	0.76	197.20	30
	I_{30}^b	6.73	2.78	0.41	201.85	
	R^b	9.06	10.42	1.15	271.87	

注:(1)表中小写字母表示不同降雨类型同一指标间的单因素方差分析,不同字母表示各雨型同一指标间差异显著($p<0.05$);(2) P 表示降雨量(mm);(3) I_{30} 表示最大 30 min 雨强(mm/h);(4) R 表示降雨侵蚀力[$\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$]。

2.2 雨型对侵蚀泥沙粒径组成特征的影响

不同雨型下侵蚀泥沙及原坡面土壤有效粒径组成和最终粒径组成特征见图 1。由图可知,不管是有效还是最终粒径组成,侵蚀泥沙中粉粒级颗粒(0.002~0.05 mm)含量最高,砂粒级颗粒(0.05~2 mm)含量

次之,黏粒级颗粒($<0.002\text{ mm}$)含量最低,这与原坡面土壤中粉、砂、黏粒级颗粒含量(图中虚线)相似。不同粒级的泥沙颗粒对不同雨型的响应有所差异。

对有效粒径组成特征而言,侵蚀泥沙中有效黏粒含量在 C 雨型下(2.37%~32.61%)显著高于 A 雨型(4.22%~11.92%)、B 雨型下(2.48%~11.09%)及侵蚀前原坡面土壤中(5.2%)的含量($p<0.05$)(图 1A);有效粉粒含量在 A 雨型下最高(47.32%~65.59%),显著高于原状土(51.1%)($p<0.05$),以 B 雨型下平均含量较低(图 1B);有效砂粒含量在 B 雨型下基本与侵蚀前原坡面土壤中的含量相近,而 A、C 雨型下则显著低于原坡面土壤中的含量(图 1C)($p<0.05$)。相较于原坡面土壤有效粒径组成,侵蚀泥沙有效粒径组成中细组分含量增加,粗组分含量降低。对最终粒径组成特征而言,侵蚀泥沙中最终黏粒和最终粉粒含量均在 C 雨型下含量较高,且均与原始土壤含量相近;最终砂粒含量在 A、B 雨型下均高于原始土壤,在 C 雨型下与原坡面土壤含量相近,且以 B 雨型下最高,说明侵蚀泥沙最终粒径整体呈变粗趋势。

采用有效中值粒径(D'_{50})和最终中值粒径(D_{50})来评价不同雨型下侵蚀泥沙的平均粒径大小。由图 2 看出,不同雨型下侵蚀泥沙最终中值粒径无显著差异,有效中值粒径 A 雨型与 C 雨型间无显著差异,而 B 雨型分别与 A、C 雨型间存在显著差异。对有效中值粒径 D'_{50} 而言,B 雨型下产生的侵蚀泥沙平均 D'_{50} 最大,A 雨型下次之,C 雨型下最小。除 B 雨型下产生的侵蚀泥沙平均 D'_{50} 与原坡面土壤($D'_{50}=46.63\text{ }\mu\text{m}$)无显著差异外,C 和 A 雨型下的均显著小于原坡面土壤 D_{50} ($p<0.05$)。对最终中值粒径 D_{50} 而言同样呈相似趋势,即 B 雨型下产生的侵蚀泥沙平均 D_{50} 最大,A 雨型下次之,C 雨型下最小,虽无显著性差异,但 A、B 雨型下产生的侵蚀泥沙 D_{50} 均大于原坡面土壤 D_{50} ($D_{50}=34.48\text{ }\mu\text{m}$)。

2.3 坡长对侵蚀泥沙粒径组成特征的影响

本文通过设置 7 个不同坡长(5,8,11,14,17,20,23 m)的等宽径流小区来探究不同坡长对侵蚀泥沙粒径组成特征的影响,结果见图 3。无论是有效还是最终粒径组成,均以侵蚀泥沙中的粉粒级颗粒(0.002~0.05 mm)含量最高,砂粒级颗粒(0.05~2 mm)含量次之,黏粒级颗粒($<0.002\text{ mm}$)含量最低,且与原坡面土壤中粉、砂、黏粒级颗粒含量相似。值得注意的是,同一粒级之下各坡长之间的颗粒含量无显著性差异,但呈一定的规律性,即整体上呈现出随坡长增加,黏粒级及粉粒级含量均呈先下降后上升,而砂粒级则先上升后下降的趋势;对于最终粒径组成而言,

该趋势更为显著,且存在临界坡长(14 m)使颗粒含量达到极值。

对有效粒径组成特征而言,各坡长下的有效黏粒和有效粉粒平均含量均高于侵蚀前原坡面土壤,而有效砂粒平均含量则均低于侵蚀前原坡面土壤,说明相较于原坡面土壤有效粒径组成,侵蚀泥沙有效粒径组

成中细组分含量增加,粗组分含量降低。但对于最终粒径组成特征而言,则呈现相反趋势,即最终黏粒和最终粉粒平均含量基本均低于侵蚀前原坡面土壤,而最终砂粒平均含量则高于侵蚀前原坡面土壤,表明侵蚀泥沙最终粒径组成中细组分含量降低,而粗组分含量增加,整体呈变粗趋势。

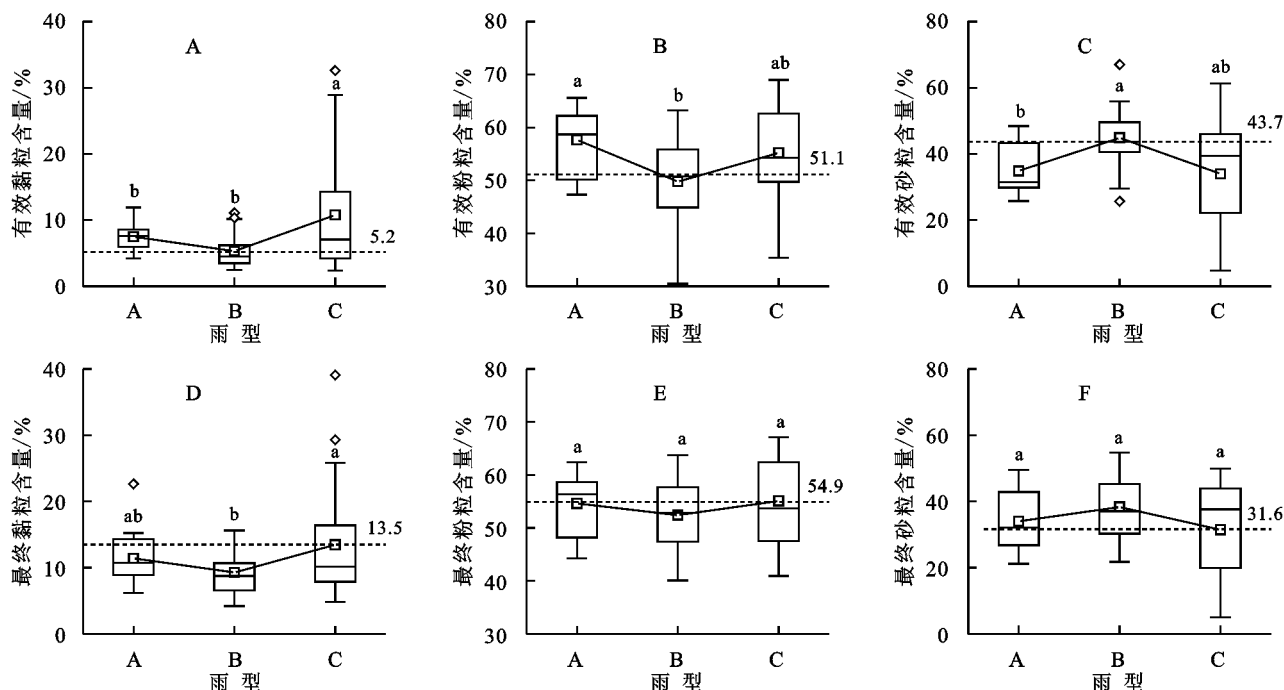
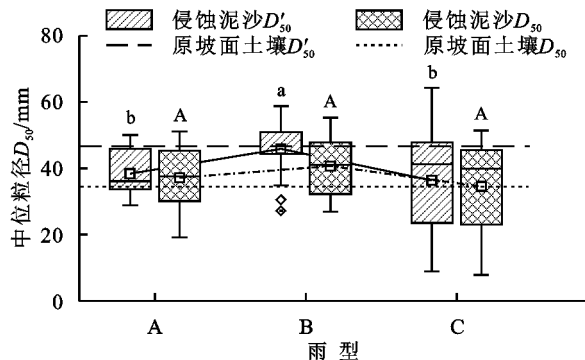


图 1 不同雨型下侵蚀泥沙有效及最终粒径组成特征



注:图中小写字母表示不同雨型 D'_{50} 间单因素方差分析,大写字母表示不同雨型 D_{50} 间单因素方差分析,不同字母表示各雨型间的中值粒径差异显著 ($p < 0.05$). 下图同。

图 2 不同雨型下侵蚀泥沙有效颗粒和最终颗粒的中值粒径特征

进一步探究不同坡长下侵蚀泥沙的中值粒径特征(图 4),发现不同坡长下产生的侵蚀泥沙中值粒径虽没有显著性差异,但呈一定规律,即有效中值粒径 D'_{50} 均小于原坡面土壤,而最终中值粒径 D_{50} 则基本大于原坡面土壤。该结果与上述结果基本一致:有效颗粒中黏粒与粉粒含量增多,砂粒含量减少,颗粒较细;最终颗粒中黏粒与粉粒含量有所降低,砂粒含量增多,颗粒更粗。

2.4 雨型及坡长对侵蚀泥沙富集率和团聚率的影响
侵蚀泥沙颗粒富集率(ER)表征与侵蚀前原坡面

土壤相比,侵蚀泥沙中某一粒级有效颗粒的富集/贫化程度,是量化侵蚀分选性强弱的良好指标。图 5A 为不同雨型下侵蚀泥沙各粒级有效颗粒富集率随坡长的变化特征。由图可知,黏、粉、砂粒级的有效颗粒富集率(ER_{clay} , ER_{silt} , ER_{sand})分别为 0.81~3.14, 0.82~1.23, 0.59~1.20,说明侵蚀过程中有效黏粒在侵蚀泥沙中发生富集,有效砂粒在侵蚀泥沙中发生贫化,进一步说明本试验条件下坡面侵蚀过程是优先分离输移细颗粒的过程。不同降雨雨型、坡长条件下,各粒级有效颗粒的富集/贫化程度和侵蚀分选性强弱有明显差异。综合对比 3 个雨型条件下侵蚀泥沙颗粒的 ER 值,我们发现 B 雨型条件下的 ER 值最接近于 1, A 雨型下的次之, C 雨型下的值最偏离于 1,说明本研究中 B 雨型条件下的侵蚀过程分选性最弱, A 雨型下次之, C 雨型条件下的侵蚀过程分选性最强。侵蚀泥沙各粒级的有效颗粒富集率随坡长的变化规律在不同雨型下表现不同。整体来看,在 A, C 雨型下, ER_{silt} 呈先下降后上升趋势,值先接近于 1 后偏离 1, ER_{sand} 则呈先上升后下降趋势,且 A 雨型下 ER_{silt} 与 ER_{sand} 的极值出现在 11 m 坡长处, B 雨型下 ER_{silt} 与 ER_{sand} 的极值出现在 14 m 坡长处,而 ER_{clay} 在 A, C

雨型下均大于1且无明显变化趋势,说明A,C雨型下,随坡长变长,侵蚀过程分选性先减弱后增强,在坡长为11与14 m时分选性最弱。在B雨型下,ER_{clay},

ER_{silt},ER_{sand}的值在1上下波动,并随坡长变长无明显变化规律,说明B雨型下,侵蚀过程分选性很弱,且随坡长变长无明显强弱变化规律。

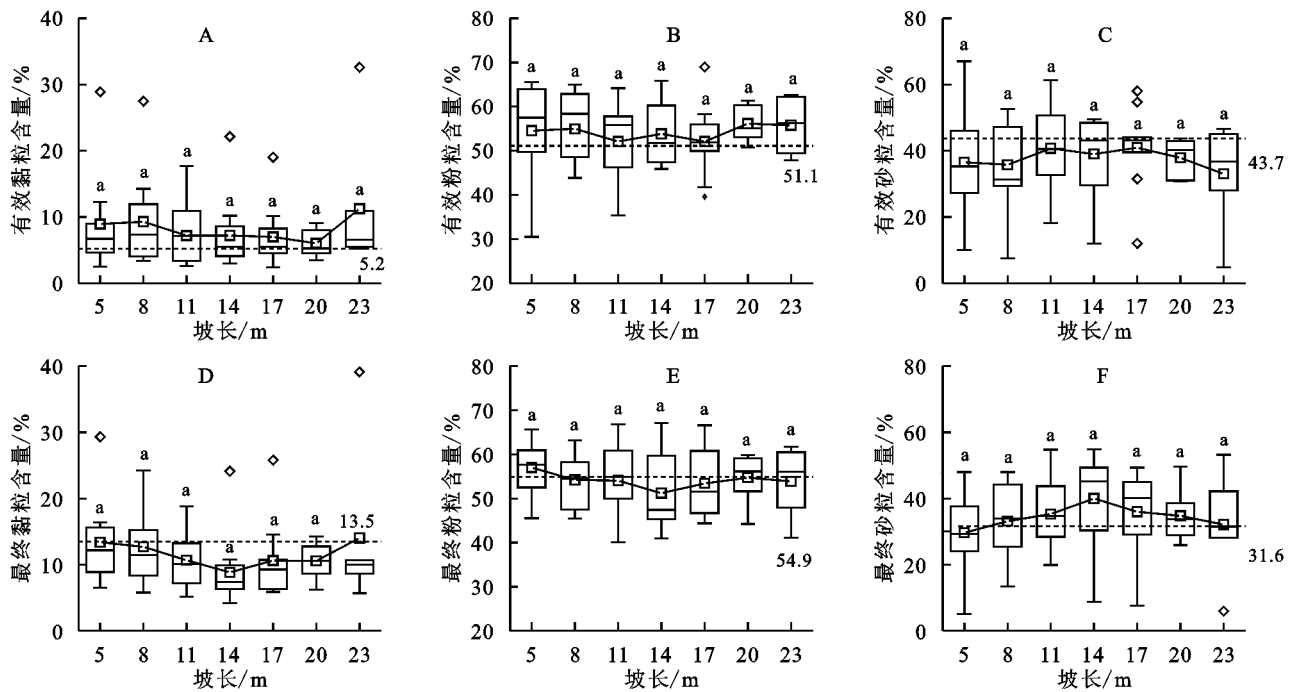


图3 不同坡长下侵蚀泥沙有效及最终粒径组成特征

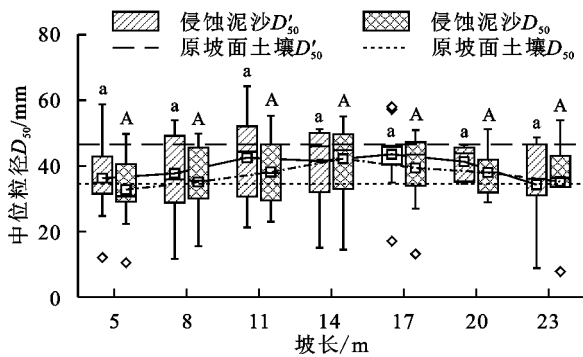


图4 不同坡长下侵蚀泥沙有效颗粒和最终颗粒的中值粒径特征

沙的团聚程度(图5B),发现黏、粉、砂粒级团聚率(AR_{clay},AR_{silt},AR_{sand})分别为0.43~0.99,0.78~1.10,0.88~1.48,而原坡面土壤黏、粉、砂粒级团聚率经计算分别为0.38,0.93,1.38,说明侵蚀泥沙的团聚情况与原坡面土壤相似,且侵蚀过程中黏粒级颗粒以团粒形式或团粒与单粒混合形式被分离搬运,粉粒级颗粒多数以单粒形式被分离搬运。而砂粒组分的团聚率在B型下基本均大于1,而在A,C雨型下随坡长增加而降低,在14 m坡长下其团聚率接近于1。这说明在临界坡长下,这两种雨型下的砂粒组分输移形式以单粒为主。

进一步通过团聚率AR指标探究侵蚀过程中泥

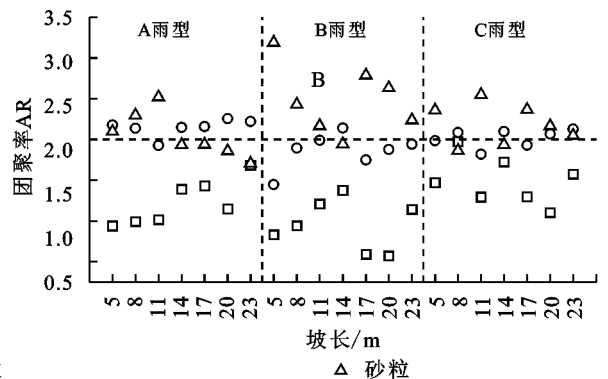
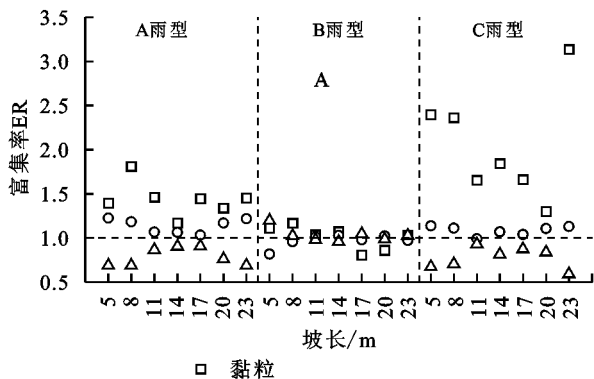


图5 不同雨型及坡长下泥沙颗粒的富集比与团聚率

3 讨论

本研究通过分析侵蚀泥沙分散前后粒径组成在

不同雨型和坡长下的变化特征及其富集情况,分析其输移规律,探讨影响颗粒分散的关键因素。研究结果表明,不同降雨类型下泥沙颗粒组成存在较大差异。

就有效粒径而言,黏粒级平均含量在 C 雨型下最高,粉粒级平均含量在 A 雨型下最高,而砂粒级平均含量则以 B 雨型下较高。所有雨型条件下侵蚀过程均是优先分离搬运细颗粒的过程,且 C 雨型下侵蚀分选性最强、A 雨型下次之、B 雨型下分选性最弱。结合相应的泥沙富集比结果,发现在简化其他细沟间侵蚀因素(径流深、地表粗糙度等)的情况下,对于低雨量、中雨强、中低等侵蚀力的 C 雨型而言,黏粒级因重量较小而优先运移,在径流中有较高的富集($1.30 < ER_{\text{clay}} < 3.14$),而砂粒级泥沙的侵蚀效率较低($0.59 < ER_{\text{sand}} < 0.93$);随着降雨类型逐渐向中雨量、小雨强、中等侵蚀力的 B 雨型转换,径流流动和输移能力得到提高,较粗粒级组分的移动和传输变得更加显著^[16,30-31],同时泥沙各粒级的富集率趋近于 1,粒径分选性不再明显^[13,20]。值得注意的是,粉粒级含量在大雨量、高雨强、高侵蚀力的 A 雨型下富集率最高。这一方面与土壤质地有关^[9,21],无论是有效粒径或最终粒径,其原坡面土壤组成均以粉粒级含量最高,为土壤颗粒的流失与沉积泥沙的富集提供了大量物质来源。另一方面,随降雨雨强的增大,其降雨侵蚀力越大,雨滴对地表的击溅作用所导致的坡面土壤大团聚体分散、剥离现象也越明显,在分离搬运过程中会造成非常严重的团粒破碎;同时由于黄绵土地区存在“凝结降落”现象^[30,32],大团聚体中分散剥离而出的细粒,在降雨湿润的环境条件下,又易互相聚集凝结成团粒;两者此消彼长的共同作用最终导致该雨型下侵蚀泥沙呈粉粒级组分富集的现象。

不同坡长对侵蚀泥沙粒径组成的影响主要体现在最终粒径组成上,虽然不同坡长间各粒径泥沙含量无统计学显著差异,但呈一定的变化趋势:黏粒级及粉粒级含量呈先下降后上升,而砂粒级呈先上升后下降的趋势。这与 ER_{clay} 和 ER_{silt} 先下降后上升, ER_{sand} 的先上升后下降趋势相一致,且存在着显著的临界坡长(14 m)现象,使颗粒含量和富集比达到极大值或极小值。该结果说明泥沙在坡面的侵蚀、搬运、沉积过程中呈强弱交替的空间变化特征,这主要与坡面径流侵蚀力的变化及输移模式有关^[33]。在本研究中,在短坡长时,坡面无细沟产生,坡长对侵蚀的影响甚微,侵蚀泥沙主要来源于坡面上部的雨滴击溅侵蚀和细沟间侵蚀^[31]。随着坡长增加,坡面产生细沟侵蚀的可能性增加,股流开始形成,径流侵蚀力显著增加,侵蚀分选性降低,导致输移泥沙中黏粒级含量减少,砂粒级含量增多^[34-35]。当坡长超过临界坡长(14 m)

后,随径流量和径流深的增加,削弱了雨滴的打击作用,进而减弱径流的侵蚀与输沙能力,粒径较大的泥沙粗粒优先在坡面沉积,而小粒径的黏粒级含量则逐渐在侵蚀泥沙中富集^[33,36]。

在输移形式方面,有效黏粒和有效粉粒受雨型及坡长的影响较小,分别主要以团粒和单粒形式进行运移。有效砂粒的运移受不同雨型和坡长的影响较大,在 B 雨型下主要以团粒形式输移;而在 A、C 雨型下,坡长接近临界值时,主要以单粒形式输移。这一方面是由于 B 雨型下侵蚀泥沙分选性较弱,各粒级有效粒径颗粒共同运移,其中也包括了团粒形式的砂粒颗粒,而此时的雨滴打击及径流输移作用又不足以使团粒分散,因而导致团粒形式的有效砂粒含量增加。另一方面, A 雨型下降雨侵蚀力较大,击溅作用易使团粒砂粒破坏崩解成原始单粒形式;而 C 雨型输移能力较弱,无法搬运团粒形式的砂粒颗粒,因而 A、C 雨型下的有效砂粒主要由单粒构成。在本研究中,各雨型及坡长下的侵蚀泥沙粒径分布均呈有效颗粒比原坡面土壤细,而最终颗粒比原坡面土壤粗的现象。根据侵蚀泥沙有效砂粒含量低于原坡面土壤,而最终砂粒颗粒大于原坡面土壤的结果,可推断原坡面土壤中由细组分黏聚而成的有效砂粒含量高于侵蚀泥沙(图 6),该部分砂粒分散成细组分后,使得最终粒径中的黏粒级和粉粒级比例增加,砂粒级组分比例降低,原坡面土壤的平均粒径变细。而在侵蚀泥沙中,被分散成细组分的有效砂粒含量较少,黏粒级和粉粒级增加的比例有限,保留下来的砂粒级含量较多,从而平均粒径较原坡面土壤最终粒径而言更粗。

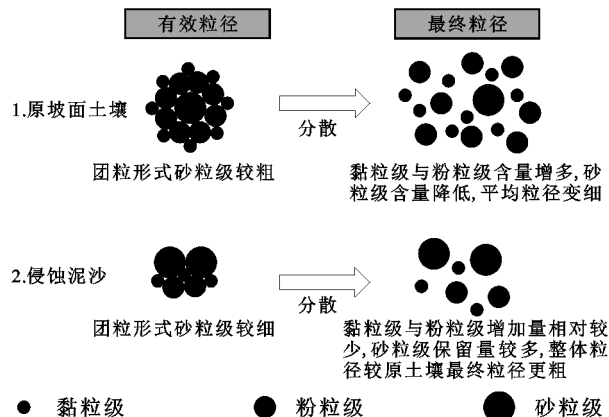


图 6 原坡面土壤与侵蚀泥沙分散前后相对粗细特征

4 结论

(1) 侵蚀泥沙粒径特征受不同降雨类型的显著影响,在 C 雨型(低雨量、中雨强、中低等侵蚀力)下

有效黏粒和最终黏粒,及最终粉粒含量最高,在 A 雨型(大雨量、高雨强、高侵蚀力)下有效粉粒含量最高,而 B 雨型(中雨量、小雨强、中等侵蚀力)下有效砂粒和最终砂粒含量最高。

(2) 不同坡长下的侵蚀泥沙粒径组成存在临界坡长(14 m)现象。坡长在临界坡长以下时,黏粒级和粉粒级颗粒含量呈随坡长增加而降低的趋势;坡长超过临界坡长后,黏粒级和粉粒级颗粒含量呈随坡长增加而增加的趋势。相较于有效粒径,该现象在最终粒径下更为明显。

(3) 侵蚀泥沙有效黏粒和有效粉粒的输移形式受雨型及坡长的影响较小,分别以团粒和单粒形式运移,而有效砂粒在 B 雨型下主要以团粒形式输移,在 A、C 雨型下达临界坡长时则以单粒形式输移。

(4) 各雨型及坡长下的侵蚀泥沙有效粒径颗粒比原坡面土壤细,而最终粒径颗粒比原坡面土壤粗。

参考文献:

- [1] Gregorich E G, Greer K J, Anderson D W, et al. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects[J]. Soil & Tillage Research, 1998,47(3):291-302.
- [2] 吴凤至,史志华,岳本江,等.坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J].土壤学报,2012,49(6):1235-1240.
- [3] 张科利,唐克丽.黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J].土壤学报,2000,37(1):9-15.
- [4] Kadlec V, Procházková E, Urbanová J, et al. Soil organic carbon dynamics and its influence on the soil erodibility factor[J]. Soil & Water Research, 2012,7(3):97-108.
- [5] Pan Z, Wy A, Gl B, et al. Experimental study of sediment transport processes and size selectivity of eroded sediment on steep Pisha sandstone slopes[J]. Geomorphology, 2020,363(5):169-178.
- [6] 杨帆,张洪江,程金花,等.华北土石山区坡面溅蚀和片蚀泥沙颗粒特征研究[J].水土保持学报,2016,30(3):71-77,243.
- [7] 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, 2010,57(5):609-616.
- [8] Durnford D, King J P. Experimental study of processes and particle-size distributions of eroded soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993,119(2):383-398.
- [9] 徐加盼,李继洪,魏玉杰,等.不同母质类型发育土壤颗粒组成分形特征[J].土壤学报,2020,57(5):1197-1205.
- [10] Naser, A, Al-Shayea. The combined effect of clay and

moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils[J]. Engineering Geology, 2001,62(4):319-342.

- [11] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响[J].泥沙研究,2003,48(5):64-68.
- [12] Elisabet, Nadeu, Joris, et al. Exploring particle size distribution and organic carbon pools mobilized by different erosion processes at the catchment scale[J]. Journal of Soils & Sediments, 2011,11(4):667-678.
- [13] Wang Z, Govers G, Oost K V, et al. Soil organic carbon mobilization by interrill erosion: Insights from size fractions[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2013,118(2):348-360.
- [14] Warrington D N, Mamedov A I, Bhardwaj A K, et al. Primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development[J]. European Journal of Soil Science, 2009,60(1):84-93.
- [15] Bradford J M, Ferris J E, Remley P A. Interrill soil erosion processes: I. Effect of surface sealing[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987,51(6):1566-1571.
- [16] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow[J]. Catena, 2019,173:494-504.
- [17] 曹媛,孟明,王磊,等.宁夏中部干旱带天然草地土壤颗粒空间分布特征[J].中国水土保持,2021,42(2):56-59.
- [18] 邱捷,王洪德,郑一鹏,等.海涂围垦区不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J].农业现代化研究,2020,41(5):882-888.
- [19] 董雪,迟悦春,许德浩,等.西鄂尔多斯荒漠灌丛土壤粒径分形特征与养分的耦合关系[J].草业科学,2020,37(12):2403-2413.
- [20] Kinnell P. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review[J]. Hydrological Processes, 2010,19(14):2815-2844.
- [21] 郝燕芳,刘宝元,杨扬,等.中国 5 种典型土壤的侵蚀泥沙粒径分布特征[J].水土保持学报,2018,32(2):150-159.
- [22] Berhe A A, Harden J W, Torn M S, et al. Linking soil organic matter dynamics and erosion-induced terrestrial carbon sequestration at different landform positions[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2015,113(G4):39-51.
- [23] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J].中国水土保持科学,2020,18(6):140-146.
- [24] 付兴涛,张丽萍.坡长对红壤侵蚀影响人工降雨模拟研究[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(3):474-483.

- [15] Deng L, Shangguan Z P. Afforestation drivers soil carbon and nitrogen changes in China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1):151-165.
- [16] 林雪青,李志,向伟,等.黄土高原沟壑区不同坡位和植被下的土壤硝态氮特征研究[J].环境科学学报,2017, 37(6):2360-2367.
- [17] 王金成,井明博,周天林,等.黄土高原沟壑区人工沙棘林生长年限对土壤微生物组成的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):253-260.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等.黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J].土壤学报,2010,47(5):979-986.
- [20] 何斌,卢万鹏,唐光,等.桂西北秃杉人工林土壤肥力变化的研究[J].林业科学研究,2015,28(1):88-92.
- [21] 罗蓉,杨苗,余旋,等.沙棘人工林土壤微生物群落结构及酶活性的季节变化[J].应用生态学报,2018,29(4): 1163-1169.
- [22] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等.三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J].应用生态学报,2012,23 (2):445-451.
- [23] 赵娜,孟平,张劲松,等.华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J].应用生态学报,2014,25 (2):351-358.
- [24] 李林海,邱莉萍,梦梦.黄土高原沟壑区土壤酶活性对植物恢复的响应[J].应用生态学报,2012,23(12): 3355-3360.
- [25] 孔玉华,韩梦娟,张志华,等.3种人工林表层土壤溶解性有机质含量的季节变化[J].中国水土保持科学, 2019,17(2):48-56.
- [26] 裴丙,朱龙飞,冯志培,等.太行山南麓5个林龄侧柏人工林土壤酶活性季节变化[J].水土保持研究,2018,25 (2):170-175,182.
- [27] 曹成有,陈家模,邵建飞,等.科尔沁沙地4种固沙植物群落土壤微生物生物量及酶活性的季节变化[J].生态学杂志,2011,30(2):227-233.
- [28] 牛小云,孙晓梅,陈东升,等.辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J].应用生态学报,2015,26(9):2663-2672.
- [29] 闫丽娟,李广,吴江琪,等.黄土高原4种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J].生态学报,2019, 39(15):172-180.
- [30] 邹俊亮,邵明安,龚时慧.不同植物和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J].水土保持研究,2011,18(6):12-17.
- [31] 朱海强,李艳红,李发东.艾比湖湿地典型植物群落土壤酶活性季节变化特征[J].应用生态学报,2017,28 (4):1145-1154.
- [32] Su Y Z, Li Y L, Cui J Y, et al. Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, Northern China[J]. Catena, 2005, 59(3):267-278.

~~~~~  
(上接第57页)

- [25] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J].土壤通报,2011,42 (3):721-725.
- [26] 汪晓勇,郑粉莉.黄土坡面坡长对侵蚀-搬运过程的影响研究[J].水土保持通报,2008,28(3):1-4.
- [27] 任瑞雪.降雨侵蚀的分离与输移过程对泥沙中有机碳特征的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [28] 郝燕芳,佟帆.侵蚀泥沙颗粒特征研究进展[J].水土保持学报,2020,34(1):1-7.
- [29] 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.
- [30] 吴凤至,史志华,方怒放,等.不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律[J].环境科学,2012,33(7):2497-2502.
- [31] 付兴涛,姚璟.降雨条件下坡长对陡坡产流产沙过程影响的模拟试验研究[J].水土保持学报,2015,29(5):20-24.
- [32] 周梦玲,郭建斌,崔明,等.喀斯特坡地侵蚀泥沙养分流失与粒径分布的关系[J].水土保持学报,2019,33(6): 54-60,71.
- [33] 廖义善,蔡强国,程琴娟.黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件[J].中国水土保持科学,2008,6 (2):32-38.
- [34] 郭新亚,张兴奇,顾礼彬,等.坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):540-44.
- [35] 刘和平,王秀颖,刘宝元.短坡条件下侵蚀产沙与坡长的关系[J].水土保持学报,2011,25(2):1-5,77.
- [36] Kinnell P I A. The Effect of Slope Length on Sediment Concentrations Associated with Side-Slope Erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1004-1008.