

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.041.

李骁政, 任宗萍, 张晓明, 等. 基于土壤颗粒粒径的泥沙来源量化研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 34-41.

LI Xiaozheng, REN Zongping, ZHANG Xiaoming, et al. Identification of Sediment Sources Based on Grain Size of Soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 34-41.

基于土壤颗粒粒径的泥沙来源量化研究

李骁政¹, 任宗萍¹, 张晓明², 李占斌¹, 李鹏¹, 潘金金¹

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2.中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: [目的]揭示黄土高原风水复合侵蚀区风力作用对水蚀的影响,为具有不同泥沙粒径侵蚀物质来源识别提供一种有效的方法支撑,也为风水复合侵蚀区侵蚀泥沙来源辨识提供理论参考。[方法]以覆沙模拟风蚀产物,基于室内模拟试验,研究覆沙之后坡面侵蚀发育特征,同时为了有效区分不同时刻侵蚀物质的来源,尝试采用泥沙粒径作为指纹因子进行侵蚀泥沙来源贡献的辨识。[结果]不同泥沙粒径组的3个指纹因子(粒径范围分别为:26.303~34.674, 104.713~138.038, 138.038~181.970 μm)通过检验被确定为最佳指纹因子。基于最佳指纹因子,通过多元混合模型计算得出,在对同一土槽进行的3个阶段模拟降雨试验中覆沙层和黄土层的平均泥沙贡献率分别为48.2%和51.8%, 24.8%和75.2%, 6.8%和93.2%,且MAF>0.8。覆沙层的泥沙贡献率为第一阶段试验>第二阶段试验>第三阶段试验,计算结果与DEM相吻合。[结论]泥沙源地和侵蚀泥沙中的不同泥沙粒径组可作为指纹因子进行泥沙来源辨别,复合指纹法具有较好的适用性。

关键词:覆沙坡面;模拟降雨;泥沙来源;颗粒粒径

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)04-0034-08

Identification of Sediment Sources Based on Grain Size of Soil

LI Xiaozheng¹, REN Zongping¹, ZHANG Xiaoming², LI Zhanbin¹, LI Peng¹, PAN Jinjin¹

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] The research aims to reveal the influence of wind action on water erosion in the wind-water composite erosion area of the Loess Plateau, provide an effective method support for the identification of erosion material sources with different sediment particle sizes, and a theoretical reference for the identification of erosion sediment sources in the wind-water composite erosion area. [Methods] The wind erosion products were simulated by sand covering. Based on the indoor simulation experiment, the development characteristics of slope erosion after sand covering were studied, and in order to effectively distinguish the sources of erosion materials at different times, the sediment particle size was used as a fingerprint factor to identify the contribution of erosion sediment sources. [Results] Three fingerprint factors of different sediment particle size groups (particle size range: 26.303~34.674 μm , 104.713~138.038 μm , 138.038~181.970 μm) were identified as the best fingerprint factors by testing. Based on the best fingerprint factors, the average sediment contribution rates of the sand-covered layer and the loess layer were 48.2% and 51.8%, 24.8% and 75.2%, 6.8% and 93.2%, respectively, and the MAF was greater than 0.8 in the three stages of simulated rainfall experiments in the same soil bin. The contribution rate of sediment in the sand-covered layer was in the order: the first stage test > the second stage test > the third stage test, and the calculation

收稿日期:2022-03-25

修回日期:2022-05-23

资助项目:国家自然科学基金“黄土高原典型流域水沙变化趋势预测集合评估”(51879281),“黄土高原生态建设对流域侵蚀产沙的影响与机制”(42077074)”

第一作者:李骁政(1996—),男,河北张家口人,硕士研究生,主要从事泥沙示踪方面研究。E-mail:lizhengze7@gmail.com

通信作者:任宗萍(1982—),女,山东安丘人,博士,副教授,主要研究方向为土壤侵蚀与生态水文。E-mail:renzp@xaut.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

results were consistent with the DEM. [Conclusion] Different sediment particle size groups in sediment source area and erosion sediment can be used as fingerprint factors to identify sediment sources, and the composite fingerprint method has good applicability.

Keywords: sand-covered slope; simulated rainfall; sediment source; grain size

风水复合侵蚀是一个复杂的侵蚀过程,对我国 26 万 km² 的区域造成严重影响^[1-2]。该区域受多动力综合作用,冬、春季降水较少,主要以风蚀为主,夏、秋季降水较为集中,以水蚀为主^[3-5]。风蚀为水蚀提供了泥沙来源,而水蚀又为风蚀准备了新的风化层,两种侵蚀方式交错重叠,大大加快了侵蚀进程,其危害程度大于单一的风蚀和水蚀^[6-7]。片沙覆盖黄土地貌是该区域内两种营力共同作用影响下形成的特殊地貌,覆沙层和下部黄土差异显著,存在明显的沙土界面^[8]。为了研究风蚀与水蚀之间的相互作用机制,针对沙土界面的侵蚀产沙特征、影响因素及驱动机制等方面做了众多研究。多数研究表明存在沙土二元结构的侵蚀量呈几十倍增加^[9-11];但是这些研究并没有定量区分侵蚀物质的来源,可能对深入认识该区侵蚀产沙特征存在一定限制。

目前,量化研究泥沙来源的方法主要有:水文统计、野外径流小区观测、人工模拟降雨试验、指纹法等,其中指纹法在该区域得到广泛应用^[12-13]。指纹法是基于研究区不同泥沙源地的土壤理化性质,利用模型定量研究各泥沙源地的泥沙贡献率的研究方法。早期的指纹法常以单因子进行泥沙来源研究,指纹因子的选择一般为土壤颗粒粒径、放射性核素、稀有元素、土壤磁性等,但单因子的局限性在于对多源地识别精度不够^[14-17]。复合指纹法利用多种不同的指纹因子组合,对多源地泥沙来源进行定量判别效果显著。在以往的泥沙来源定量判别研究中,复合指纹法常用于定量分析整个流域的泥沙来源,也有学者使用人工混入稀土元素的方法研究坡面泥沙来源^[18],使用自然指纹因子研究坡面泥沙来源的文章较少。指纹因子的选择一般为多种不同类别的因子组合,需要对采集的样品进行多个指标的测定,耗时长,成本高。当流域内各泥沙源地的土壤理化性质、放射性核素等差异较小且植被覆盖较为单一时,以上部分指标在应用中会有一定的局限性^[19-20]。

由于片沙覆盖黄土地貌区泥沙物源的独特性,粒径组具有显著性差异($p < 0.05$),所以本论文尝试选用泥沙粒径组作为指纹因子,来定量研究该区侵蚀物质的来源。本研究利用人工模拟降雨试验,将不同粒径组的体积占比作为指纹因子的值,使用模型定量计算覆沙层和黄土层两物源区的侵蚀比例,以此分析在

间歇性降雨条件下,覆沙层和黄土层的泥沙贡献率随时间的变化情况,以期进一步阐明覆沙坡面的侵蚀产沙过程,为揭示风水复合侵蚀产沙机理提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与材料

模拟降雨试验在西安理工大学雨洪侵蚀大厅进行,降雨装置为西安理工大学水资源研究所研制的下喷式模拟降雨装置,有效降雨面积约为 4.5 m×4.5 m,降雨高度为 5.2 m,降雨均匀度在 85% 以上。试验使用黄土为陕西省绥德县王茂沟流域的黄绵土,上层覆沙为东柳沟流域的风沙土。试验用土的干容重为 1.35 g/cm³,土壤饱和含水率为 46.4%。采用激光粒度仪 Malvern 2000 测量泥沙粒径的体积百分比,覆沙层和黄土层的级配曲线见图 1。试验装置为长 2 m、宽 0.75 m、高 0.5 m 的木制土槽,土槽的尾部安装用于收集径流、泥沙样品的集流槽。试验装置结构见图 2。

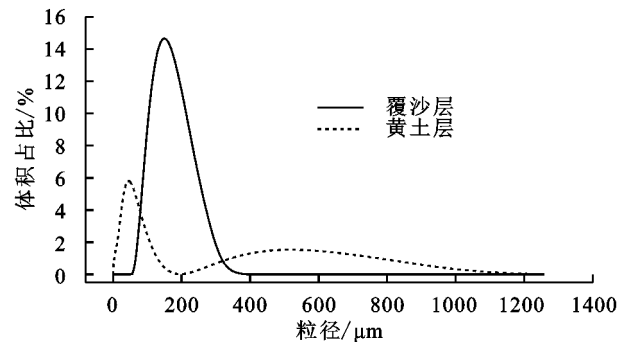


图 1 覆沙层和黄土层颗粒级配曲线

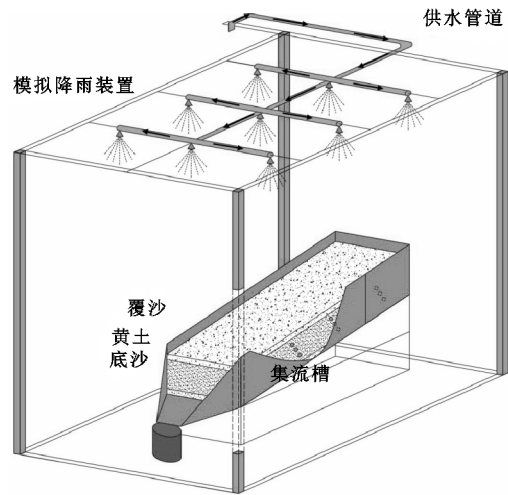


图 2 试验装置结构示意图

1.2 试验设计

试验于 2018 年 8 月在西北旱区生态水利工程国家重点实验室雨洪侵蚀大厅进行。土槽内土层布设方法如下:为使土壤水分均匀下渗并接近于天然坡面水分下渗情况,首先需在土槽底部铺设一层河沙;其次,黄土层铺设采用分层装填的方式,填土高度为 40 cm,每层填土厚度为 10 cm,铺平、压实、调整土壤含水量在 15% 左右;最后在装填好的黄土层表面均匀覆盖风沙土 2 cm。试验土槽坡度为 12°,降雨强度为 1.5 mm/min。本研究设计 3 个阶段降雨试验,每阶段降雨历时为 60 min,土槽在前一阶段试验结束后静置 24 h 进行下一阶段试验。

1.2.1 数据采集及处理 坡面开始产流后,记录初始产流时间并观察试验过程,每 1 min 收集一次集流槽出口处径流、泥沙样品。每阶段试验结束后,将每个收集桶中的水沙充分搅拌均匀,取样进行颗分测定(第一阶段试验中,16 min 和 28 min 的数据缺测);泥沙质量采用烘干法测定,并记录每 1 min 的产沙量;径流量通过测量盛接径流的容器体积确定,记录每 1 min 的径流量。

每阶段试验降雨前后,使用 3D 激光扫描仪(Trimble FX)扫描斜坡的地形数据,通过 Trimble Real Works 软件进行去噪、裁剪、校准和处理,并使用 ArcGIS 10.2 生成分辨率为 5 mm×5 mm 的坡面数字高程模型(DEM)。

1.3 复合指纹法

以不同粒径泥沙作为指纹因子,将覆沙层和黄土层作为两个泥沙源地,收集水沙的收集桶作为汇集区。运用复合指纹法,对每 1 min 收集到的泥沙进行来源辨识研究。

1.3.1 指纹因子选择 泥沙指纹示踪技术基于以下两个前提^[21-22]:(1) 指纹因子在各潜在源地中存在显著差异;(2) 指纹因子在泥沙输移、搬运及沉积过程中保持稳定。为确保筛选的指纹因子满足上述前提,指纹因子筛选过程需要进行保守性检验及 Kruskal-Wallis H 检验,其次对筛选出的指纹因子进行多元判别分析,基于 Wilks 的 lambda 最小化的基础上,确定最佳指纹因子组合。保守性检验:收集到的泥沙中每个样品里指纹因子浓度的最大值或最小值都要在两个泥沙源地中对应指纹因子的浓度范围内,且指纹因子浓度的平均值也在各泥沙源地对应指纹因子浓度的平均值范围内^[23]。Kruskal-Wallis H 检验:通过非参数检验对泥沙源地采集样品中各指纹因子的总体分布特征进行检验,当因子 $p < 0.05$ 时认为该因子存在显著性差异,指纹因子被接受^[24]。

基于风沙、黄土的级配曲线(图 1),选取不同粒径组的泥沙作为潜在指纹因子,共计 30 个,命名为 $D_1—D_{30}$,潜在指纹因子粒径范围见表 1。将不同粒径组的体积占比作为指纹因子的值,对 30 个指纹因子进行保守性检验和 Kruskal-Wallis H 检验,筛选出差异性显著的指纹因子。在保守性检验和 Kruskal-Wallis H 检验的基础上,利用多元逐步判别分析,筛选最优指纹因子组合^[25]。在判别过程中,每步 Wilks' λ 的最小值进入判别函数:

$$\lambda = |SS_t| / |SS_t + SS_w| \quad (1)$$

式中: SS_t 为组内偏差平方和; SS_w 为组间偏差平方和。

表 1 潜在指纹因子粒径范围对照表

粒径 范围/ μm	指纹 因子	粒径 范围/ μm	指纹 因子
0.316~0.417	D_1	19.953~26.303	D_{16}
0.417~0.55	D_2	26.303~34.674	D_{17}
0.55~0.724	D_3	34.674~45.709	D_{18}
0.724~0.955	D_4	45.709~60.256	D_{19}
0.955~1.259	D_5	60.256~79.433	D_{20}
1.259~1.66	D_6	79.433~104.713	D_{21}
1.66~2.188	D_7	104.713~138.038	D_{22}
2.188~2.884	D_8	138.038~181.97	D_{23}
2.884~3.802	D_9	181.97~239.883	D_{24}
3.802~5.012	D_{10}	239.883~316.228	D_{25}
5.012~6.607	D_{11}	316.228~416.869	D_{26}
6.607~8.71	D_{12}	416.869~549.541	D_{27}
8.71~11.482	D_{13}	549.541~724.436	D_{28}
11.482~15.136	D_{14}	724.436~954.993	D_{29}
15.136~19.953	D_{15}	954.993~1258.925	D_{30}

1.3.2 混合模型求解与评估 对于复合指纹法,如果泥沙源地的个数(m)小于($n+1$)时(n 为指纹因子的数量),方程为超定方程,需要通过优化算法求解。最常用的求解方法是通过寻找一组近似解,使得该方程组两边近似相等,且满足相对偏差绝对值的和最小,这组近似值就是该方程组的最优解^[26]。本文使用带约束的全局优化算法 Dual Annealing 算法^[27]计算得到方程的最优解,求得覆沙层和黄土层的泥沙贡献率。多元混合模型如下:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_i - (\sum_{s=1}^m P_s S_{s,i})}{C_i} \right| \quad (2)$$

式中: E 为相对偏差绝对值的和; P_s 为某个粒径组中 s 泥沙源地对汇集区的泥沙贡献百分数; $S_{s,i}$ 和 C_i 分别是 s 泥沙源地和汇集区中 i 指纹因子浓度的平均值; m 为泥沙源地的数量; n 为指纹因子的数量。同时,MAF(Mean Absolute Fit)被广泛应用于评估混合模型性能和优化结果的可信性^[28]。

$$\text{MAF} = 1 - \frac{E}{n} \quad (3)$$

其中,当MAF的值越接近1,则表明预测的汇集区中某指纹因子的浓度与实测浓度相吻合,混合模型表现越好^[29]。

2 结果与分析

2.1 覆沙坡面侵蚀变化

产沙强度和含沙量能够直观地反映降雨试验各时段侵蚀情况。由图3可知,第一阶段模拟降雨开始后,试验进行到15 min开始产流产沙,20 min前产沙强度小于 $0.01 \text{ kg}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$;第二、第三阶段则在第1 min开始产流产沙。3个阶段产沙强度的平均值分别为 $0.14, 0.44, 0.16 \text{ kg}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,含沙量的平均值分别为 $0.14, 0.29, 0.12 \text{ kg}/\text{L}$;对三阶段产沙强度进行方差分析表明,产沙强度第二阶段显著高于第一阶段和第三阶段($p < 0.05$);第一阶段和第三阶段产沙强度没有显著差异($p > 0.05$),含沙量的变

化趋势与产沙强度基本一致。三阶段试验均出现“多峰多谷”的现象,从产沙强度来看,第二阶段试验是第一阶段试验平均值的3.14倍,是第三阶段试验平均值的2.75倍;第二阶段试验的含沙量平均值是第一阶段的2.07倍,是第三阶段的2.42倍。

覆沙坡面3个阶段降雨结束后的DEM与试验开始前获得的初始坡面DEM相减,得到以初始坡面为基准的侵蚀DEM,正值的高程为堆积,负值为侵蚀(图4)。第一阶段降雨结束(图4A),坡面中下部的表层覆沙被大量侵蚀,部分黄土裸露,并在坡面一侧有沟道发育,并有支沟出现,最长沟道长度为76.00 cm,最长沟平均沟深4.43 cm;第二阶段试验后(图4B),坡面上部覆沙基本被侵蚀,在坡面一侧和发育的三条沟道之间残存部分覆沙,最长沟道长度为101.10 cm,最长沟平均沟深10.14 cm;第三阶段(图4C)沟道进一步发育,最长沟道长度达到129.00 cm,平均沟深达12.08 cm,覆沙层被侵蚀殆尽。

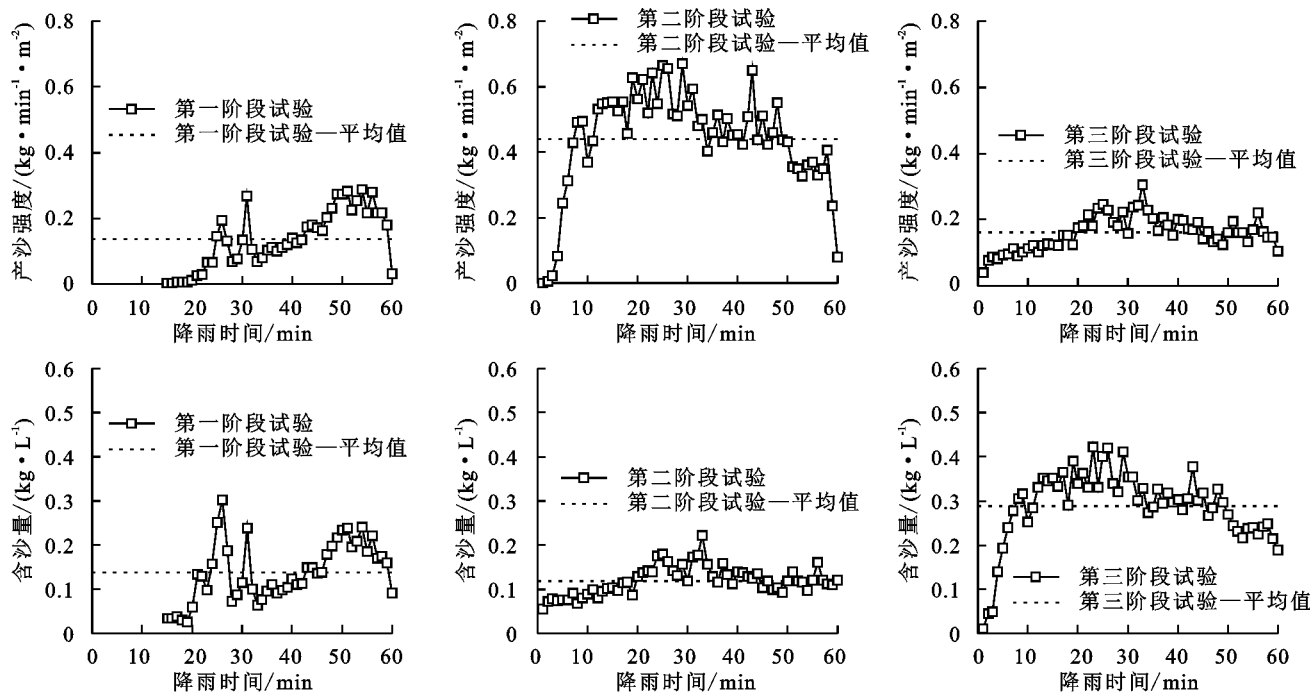


图3 覆沙黄土坡面产沙强度及含沙量随降雨时间变化过程线

2.2 指纹因子筛选

为确定在输移过程中保持稳定状态的指纹因子且满足两泥沙源地之间的差异性,进行指纹因子筛选。由表2看出,在30个潜在指纹因子中,通过保守性检验的因子有 $D_{17}, D_{18}, D_{19}, D_{20}, D_{21}, D_{22}, D_{23}, D_{24}, D_{28}, D_{29}, D_{30}$ 。通过保守性检验的11个因子,大部分表现出显著性差异。除 D_{30} 外,剩余的10个因子全部通过了Kruskal-Wallis H检验($p < 0.05$)。经Kruskal-Wallis H检验后,对差异显著的指纹因子进行多元判别分析。结果表明3个指纹因子(D_{23} ,

D_{22} 和 D_{17})入选时,lambda值由0.009逐渐减小为0.002,累计正确判别率分别为83.0%,84.6%和98.0%,累计判别率超过90.0%,符合分析要求^[30]。因此,本论文选择 D_{23}, D_{22} 和 D_{17} 组成的最佳符合因子组合用于分析覆沙坡面泥沙来源。

2.3 侵蚀泥沙来源量化

根据最佳指纹因子组合(D_{23}, D_{22} 和 D_{17})在泥沙源地和侵蚀泥沙样品中的值,在满足混合模型应用条件下,计算得到覆沙层和黄土层对坡面出口处泥沙的相对贡献率,并评估每次计算混合模型的可行性,在

所有计算中 $MAF > 0.8$, 得到的结果可信。

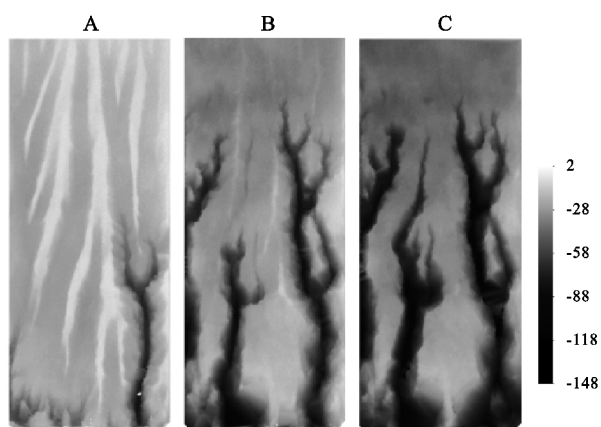


图4 覆沙坡面数字高程模型

在第一阶段 17~21 min(图 5A), 随着侵蚀量逐渐增大, 坡面下部覆沙是主要侵蚀来源, 覆沙层的泥沙

贡献率逐渐达到 99.6%, 黄土层的泥沙贡献仅为 0.4%。21 min 后, 随着降雨的进行, 覆沙层的泥沙贡献率出现了几个峰值, 陡涨陡落。第一阶段覆沙层的平均泥沙贡献率为 48.2%, 黄土层为 51.8%, 侵蚀量分别为 4.02 kg 和 5.20 kg(图 5B); 试验第二阶段(图 5C), 覆沙层的泥沙贡献率在 1~36 min 基本维持了第一阶段试验后期的趋势, 总体上逐渐降低, 黄土层的泥沙贡献率逐渐升高。36 min 后, 覆沙层的泥沙贡献率出现多个峰值, 在 53 min 时达 99%。此阶段覆沙层和黄土层的平均泥沙贡献率分别为 24.8% 和 75.2%, 侵蚀量分别为 9.12 kg 和 30.55 kg(图 5D); 覆沙层和黄土层的平均泥沙贡献率在第三阶段试验中(图 5E), 分别为 6.8% 和 93.2%(图 5F)。16 min 以后, 覆沙层的泥沙贡献率只占到 0~4%, 黄土层贡献了绝大部分泥沙。

表2 源地及泥沙中指纹因子的保守性检验和 Kruskal-Wallis H 检验结果

指纹因子	保守性	H 值	p 值	指纹因子	保守性	H 值	p 值
D_1	b	—	—	D_{16}	b	—	—
D_2	b	—	—	D_{17}	a	4.35484	0.036904 *
D_3	b	—	—	D_{18}	a	5.52983	0.015631 *
D_4	b	—	—	D_{19}	a	5.24542	0.019602 *
D_5	b	—	—	D_{20}	a	3.85714	0.039645 *
D_6	b	—	—	D_{21}	a	3.54142	0.023165 *
D_7	b	—	—	D_{22}	a	6.58923	0.006874 *
D_8	b	—	—	D_{23}	a	4.89741	0.049635 *
D_9	b	—	—	D_{24}	a	3.25931	0.010103 *
D_{10}	b	—	—	D_{25}	b	—	—
D_{11}	b	—	—	D_{26}	b	—	—
D_{12}	b	—	—	D_{27}	b	—	—
D_{13}	b	—	—	D_{28}	a	4.55136	0.046946 *
D_{14}	b	—	—	D_{29}	a	6.49756	0.019924 *
D_{15}	b	—	—	D_{30}	a	2.4	0.121335

注: “*” 表示在 0.05 水平上显著; a 表示指纹因子通过保守性检验; b 表示指纹因子未通过保守性检验; “—” 为未检测。

3 讨论

3.1 覆沙坡面侵蚀过程对连续降雨的响应

覆沙坡面在连续的降雨过程中, 侵蚀特征有别于典型的黄土坡面。黄土坡面土壤表面易形成结皮, 降雨很快可以产流产沙^[31]。而覆沙坡面侵蚀开始试验初期的降雨大部分都用来入渗, 所以在前期也无侵蚀发生, 当沙土含水量达到最大持水能力, 径流开始产生, 沙土开始下泄或者出现坍塌下滑, 导致覆沙坡面开始出现剧烈的侵蚀; 并且由于覆沙处理使得坡面土壤含水量达到近饱和状态, 坡面水文条件利于侵蚀发育^[17]。第二阶段产沙强度和含沙量的平均值最大, 且显著高于第一阶段和第三阶段。其原因是第一阶段试验结束后(图 4A), 前期土壤含水量很高, 降雨开始后, 坡面在很短时间内产流产沙, 产流产沙时间显

著高于第一阶段; 第二是由于细沟开始发育, 最长细沟长度增加 25.1 cm, 平均深度增加 5.71 cm, 且在原有沟道的基础上又增加 2 条沟道, 形成 3 条主要细沟的相对稳定形态。第三阶段细沟发育逐渐达到稳定, 表面形态由剧烈变化向逐渐稳定转变产沙强度和含沙量的平均值分别由第二阶段的 0.44 kg/(min · m²), 0.29 kg/L 下降为 0.16 kg/(min · m²), 0.12 kg/L。多数研究表明对于坡面侵蚀来说细沟发育是侵蚀的重要组成部分, 故第二阶段中侵蚀量达到最大^[-32]。

“多峰多谷”的现象在三阶段试验中均有体现, 第一阶段是因为随着覆沙层和黄土层的含水量达到饱和, 水流会在沙土交界面形成径流, 减小了覆沙层和黄土层之间的摩擦力, 导致在交界面形成对覆沙层的滑片侵蚀^[1], 致使坡面中上部出现部分黄土出露, 下部则遭受更严重的侵蚀, 在黄土坡面形成深

沟;随着侵蚀量增加,大量的泥沙在出口处堆积堵塞,径流和泥沙量短时间减少,达到一定量后通过出口处,产沙量和含沙量出现峰值;第二、第三阶段试

验中,随着沟道的发育,沟壁的坍塌和溯源侵蚀对沟道长度的不断拓展,是这两个阶段侵蚀量突然加剧的主要原因。

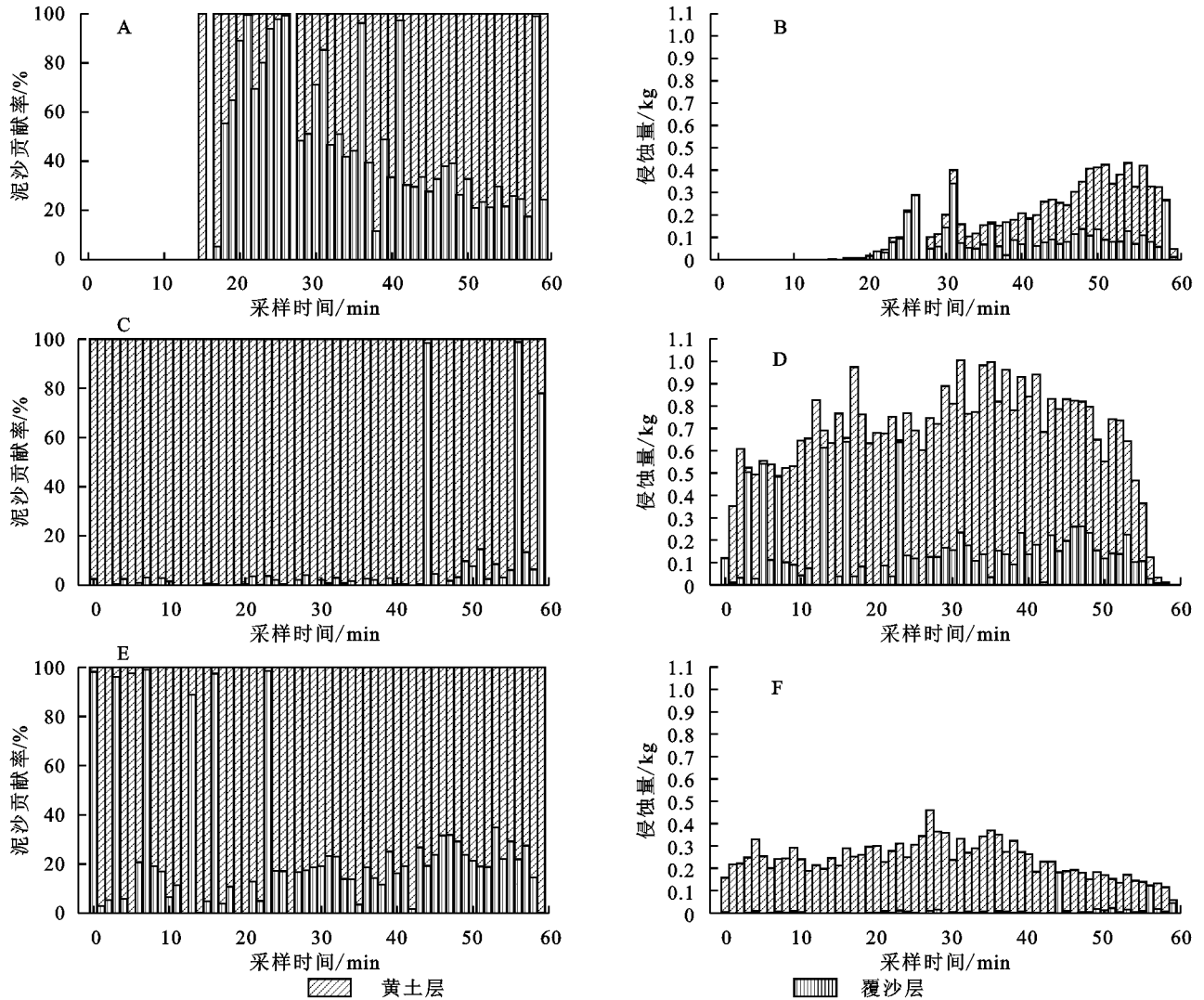


图5 泥沙来源贡献比例及侵蚀量

3.2 不同阶段侵蚀泥沙来源特征

目前地球化学元素,放射元素 ^{137}Cs , ^{226}Ra 以及土壤养分是主要的指纹因子,用来辨识侵蚀泥沙来源。在粒径区别较大的区域,分粒径追踪法被使用以减少判别误差,提高精度,泥沙被按粒径分为不同的粒径组分别计算^[33]。粒径本身也可以作为指纹因子,美国研究者 Klages 和 Hsieh 以泥沙颗粒作为指纹因子定量分析了加勒廷河各支流的泥沙贡献比例^[14]。本研究发现利用混合模型计算得到的结果和 DEM 的结果相吻合,进一步证明利用泥沙颗粒粒径作为复合指纹法计算的结果具有较高的准确性。因此,对于具有土壤不同粒径的侵蚀源区而言,不同粒级土壤颗粒也可以作为泥沙来源识别的指纹因子来识别侵蚀泥沙在不同时刻的来源特征。

由3个阶段试验的泥沙贡献率可以看出,不同阶

段坡面侵蚀泥沙来源有所差别;第一阶段试验覆沙层的泥沙贡献率随降雨时间的持续呈逐渐降低的趋势。主要是由于随着降雨时间的增加,覆沙层和黄土层的含水量逐渐达到饱和,径流量和输沙量大大增加,水流在沙土交界面流动加大,导致覆沙层的泥沙被大片带走^[34-35],形成图4A中上部表层的细沟发育初态,下部细沟中黄土开始出露。第二阶段以细沟发育为主,但是仍有部分覆沙留存在细沟之间的坡面,以细沟坍塌方式,被径流带走,因此在该阶段第37,44,53,55,57,60 min多个时间点覆沙层的泥沙贡献率大于95%。第三阶段试验中,覆沙层整体的泥沙贡献率只有6.8%,主要来源是第二阶段试验末期滞留在成形沟道中的泥沙和中下部、侧边高地留存的少许覆沙。总体上而言,覆沙层的泥沙贡献率逐渐降低,黄土层的泥沙贡献率逐渐升高。

4 结论

(1) 3个阶段的平均产沙强度为 $0.14 \sim 0.44 \text{ kg}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$, 平均含沙量 $0.14 \sim 0.29 \text{ kg/L}$ 。且在3个阶段试验中, 产沙强度第二阶段 $>$ 第三阶段 $>$ 第一阶段。显著性检验表明, 产沙强度第二阶段显著高于第一阶段和第三阶段($p < 0.05$); 第一和第三阶段产沙强度相似, 没有显著差异($p > 0.05$), 含沙量与产沙强度的变化趋势基本一致。

(2) 将覆沙坡面的覆沙层和黄土层作为2个泥沙源地, 选取不同粒径组的泥沙作为指纹因子, 筛选出3种因子可作为识别覆沙层和黄土层侵蚀泥沙的最佳指纹因子组合。通过拟合优度检验, MAF的值均大于0.8, 表明不同粒径组的泥沙作为指纹因子适用于定量研究覆沙坡面的泥沙来源。

(3) 通过多元线性混合模型计算得出, 三阶段试验覆沙层的平均泥沙贡献率 $6.8\% \sim 48.2\%$, 且第一阶段 $>$ 第二阶段 $>$ 第三阶段; 侵蚀量分别为 4.02 kg , 9.12 kg 和 0.61 kg 。第一阶段覆沙层的泥沙贡献率呈现先升高后降低的趋势, 且因滑片侵蚀和沟道泥沙堆积存在多个贡献率突增的变异点; 第三阶段试验16 min以后, 覆沙层的泥沙贡献率只占到 $0 \sim 4\%$, 黄土层贡献了绝大部分泥沙。混合模型计算结果与DEM进行对比, 两者结果相吻合, 复合指纹法具有较好的适用性。

参考文献:

- [1] Xu G, Tang S, Lu K, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2523-2530.
- [2] Zhang F B, Bai Y J, Xie L Y, et al. Runoff and soil loss characteristics on loess slopes covered with aeolian sand layers of different thicknesses under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 244-251.
- [3] 高学田, 唐克丽. 风蚀水蚀交错带侵蚀能量特征[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(3): 27-31, 60.
- [4] Zhang J, Yang M, Sun X, et al. Estimation of wind and water erosion based on slope aspects in the crisscross region of the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4): 1620-1631.
- [5] Zhang J, Yang M, Zhang F, et al. Fingerprinting sediment sources in the water-wind erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 649-663.
- [6] Li M, Li Z B, Liu P L, et al. Using Cesium-137 technique to study the characteristics of different aspect of soil erosion in the Wind-water Erosion Crisscross Region on Loess Plateau of China[J]. *Appl Radiat Isot*, 2005, 62(1): 109-113.
- [7] 宋阳, 刘连友, 严平. 风水复合侵蚀研究述评[J]. *地理学报*, 2006, 61(1): 77-88.
- [8] 武秀荣, 张凤宝, 王占礼. 片沙覆盖黄土坡面沙土二元结构剖面土壤物理性质变化研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 190-210.
- [9] 谢林好, 白玉洁, 张凤宝, 等. 沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 60-72.
- [10] Zhang X, Li Z, Peng L, et al. Influences of sand cover on erosion processes of loess slopes based on rainfall simulation experiments[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(1): 39-52.
- [11] 曹晓娟, 谢林好, 张凤宝, 等. 沙层特性对沙盖黄土坡面产流产沙变化贡献的定量分析[J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 962-974.
- [12] 李月, 周运超, 白晓永, 等. 径流小区法监测水土流失的百年历程(1915—2014年)[J]. *中国水土保持*, 2014(12): 63-66.
- [13] 杨明义, 徐龙江. 黄土高原小流域泥沙来源的复合指纹识别法分析[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 30-34.
- [14] Klages M G, Hsieh Y P. Suspended solids carried by the Gallatin River of Southwestern Montana: II. Using mineralogy for inferring sources[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1975, 4(1): 68-72.
- [15] Zhang X C J, Zhang G H, Liu B L, et al. Using cesium-137 to quantify sediment source contribution and uncertainty in a small watershed[J]. *Catena*, 2016, 140: 116-124.
- [16] Kimoto A, Nearing M A, Shipitalo M J, et al. Multi-year tracking of sediment sources in a small agricultural watershed using rare earth elements[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 31(14): 1763-1774.
- [17] Zhang J, Yang M, Zhang F, et al. Revealing soil erosion characteristics using deposited sediment sources in a complex small catchment in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2020, 379: 114634.
- [18] 郑良勇, 李占斌, 李鹏, 等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 87-91.
- [19] Hancock G J, Revell A T. Erosion source discrimination in a rural Australian catchment using compound-specific isotope analysis (CSIA) [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(6): 923-932.
- [20] Blake W H, Ficken K J, Taylor P, et al. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments[J]. *Geomorphology*, 2012, 139: 322-329.
- [21] Niu B, Qu J, Zhang X J, et al. Quantifying provenance

- of reservoir sediment using multiple composite fingerprints in an arid region experiencing both wind and water erosion[J]. *Geomorphology*, 2019,332:112-121.
- [22] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2005,344:159-184.
- [23] Wilkinson S N, Hancock G J, Bartley R, et al. Using sediment tracing to assess processes and spatial patterns of erosion in grazed rangelands, Burdekin River basin, Australia[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013,180:90-102.
- [24] Chen F, Zhang F, Fang N, et al. Sediment source analysis using the fingerprinting method in a small catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016,16(5):1655-1669.
- [25] Franz C, Makeschin F, Weiß H, et al. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil: Using the fingerprint approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2014,466:513-523.
- [26] Zhang X C J, Liu B L. Using multiple composite fingerprints to quantify fine sediment source contributions: A new direction[J]. *Geoderma*, 2016,268:108-118.
- [27] Xiang Y, Sun D Y, Fan W, et al. Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model[J]. *Physics Letters A*, 1997,233(3): 216-220.
- [28] Lacey J P, Olley J. An examination of geochemical modelling approaches to tracing sediment sources incorporating distribution mixing and elemental correlations [J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(6):1669-1685.
- [29] Huang D, Du P, Walling D E, et al. Using reservoir deposits to reconstruct the impact of recent changes in land management on sediment yield and sediment sources for a small catchment in the Black Soil region of Northeast China[J]. *Geoderma*, 2019,343:139-154.
- [30] 郝福星,黄炎和,林金石,等.指纹法研究花岗岩区典型崩岗小流域悬浮泥沙来源[J].*水土保持学报*,2017,31(2):45-49,102.
- [31] Quan X, He J, Cai Q, et al. Soil erosion and deposition characteristics of slope surfaces for two loess soils using indoor simulated rainfall experiment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,204:104714.
- [32] Ren Z, Zhang X, Zhang X J, et al. Sand cover enhances rill formation under laboratory rainfall simulation[J]. *Catena*, 2021,205:105472.
- [33] Pulley S, Foster I, Collins A L. The impact of catchment source group classification on the accuracy of sediment fingerprinting outputs[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017,194:16-26.
- [34] 汤珊珊,李占斌,任宗萍,等.覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J].*水土保持学报*,2015,29(5):25-28.
- [35] Fang H, Sun L, Tang Z. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils[J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(11):2649-2658.

~~~~~

(上接第33页)

- [12] Peng X H, Zhu Q H, Zhang Z B, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017,109:81-94.
- [13] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986,50(3):627-633.
- [14] Liu S, Guo Z C, Pan Y B, et al. Rare earth oxides for labelling soil aggregate turnover: Impacts of soil properties, labelling method and aggregate structure[J]. *Geoderma*, 2019,351:36-48.
- [15] 杨小丽,崔森,杨梅,等.碱熔离子交换-电感耦合等离子体质谱法测定多金属矿中痕量稀土元素[J].*冶金分析*,2011,31(3):11-16.
- [16] 周一杨,王恩姮,陈祥伟.模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J].*水土保持学报*,2008,22(6):176-179.
- [17] 胡伟,郑粉莉,边锋.降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J].*生态学报*,2016,36(15):4708-4717.
- [18] 刘婧芳,胡斐南,杨志花,等.土粒表面电场对土壤团聚体破碎及溅蚀的影响[J].*农业工程学报*,2020,36(7): 149-156.
- [19] Saedi T, Shorafa M, Gorji M, et al. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soil of the central Zagroess, Iran: A laboratory study[J]. *Geoderma*, 2016,271(6):1-9.
- [20] Gilley J E, Finkner S C. Estimating soil detachment caused by raindrop impact [J]. *Transactions of the Asae-American Society of Agricultural Engineers*, 1985,28(1):140-146.
- [21] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J].*土壤学报*,1997,34(4):359-366.