

DOI: 10.11766/trxb201504220018

模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究*

汤珊珊 李鹏[†] 任宗萍 唐辉 王添

(西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048)

摘要 风水交错侵蚀是风蚀水蚀交错区土壤侵蚀的主要形式, 研究风水交错侵蚀对土壤颗粒的影响对于进一步研究风水交错侵蚀耦合机制及其对环境的影响有重要意义。采用人工模拟降雨试验, 研究不同雨强和覆沙厚度及长度) 条件下覆沙坡面侵蚀泥沙颗粒的变化特征。结果表明: 不同降雨条件下侵蚀泥沙颗粒中粉粒和砂粒的含量较高, 分别达到了48.86%、42.77%; 坡面覆沙后, 侵蚀泥沙中以粗颗粒居多, 以黄土作为供试土壤, 表层覆盖沙物质以后, 仅有黏粒的富集率大于1; 侵蚀泥沙的分形维数随着覆沙厚度和长度的增大而减小, d_{50} 则随着覆沙厚度和长度的增大而增大; 覆沙厚度和长度对分形维数和 d_{50} 的影响大于雨强。

关键词 覆沙坡面; 土壤侵蚀; 颗粒特征; 模拟降雨

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

黄土高原风蚀水蚀交错区是黄河粗沙的主要产区, 也是黄河下游粗泥沙的主要来源区之一^[1]。该区全年风蚀与水蚀交替进行, 冬季多大风沙尘暴, 夏秋季多暴雨, 二者在时间上互补, 在空间上相互叠加^[2-3]。风蚀为水蚀搬运提供了大量的粗颗粒泥沙, 贮存在坡面以及流域沟道中; 水蚀则形成富含泥沙的降雨径流, 提供了搬运粗泥沙颗粒的动力条件^[4]。侵蚀的发生总是伴随着泥沙细颗粒和养分富集现象的发生, 侵蚀泥沙中泥沙颗粒组成以0.002~0.05mm粒径范围的颗粒含量最高^[5], 有机质和全氮的富集率分别达到2.09、1.61^[6]。

土壤侵蚀与颗粒的关系一直是国内外学者关注的重点, 在颗粒富集方面, 由于土壤团聚体的作用, 侵蚀泥沙颗粒与原始土壤颗粒大小分布不同, 分散和未分散的泥沙颗粒大小不同^[7], 在泥沙侵蚀过程中, 雨滴的击溅使得黏粒优先被溅蚀^[8]。

目前, 针对土壤侵蚀和颗粒的关系的研究多集中于黄土区、紫色土区^[9-14], 而对风蚀水蚀交错区则鲜有研究, 且相关研究多集中于水蚀对风蚀的影响, 而风蚀沉积对水蚀的影响研究则很少涉及。在对泥沙颗粒分布的影响因素研究方面, 众多学者的关注点多放在雨强、坡度、产沙强度、产流强度以及降雨量等方面^[15-19]。这些研究从不同角度探讨了侵蚀泥沙颗粒与侵蚀的关系, 但针对粗泥沙颗粒含量高的疏松土壤的颗粒流失特征的研究还很少。

鉴于此, 本文利用人工模拟降雨试验, 分析不同雨强和不同覆沙条件下覆沙坡面侵蚀泥沙颗粒大小的分布情况以及变化过程, 探究覆沙坡面侵蚀泥沙的颗粒特征, 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制提供一定的科学依据。

* 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403302)和国家自然科学基金项目(41471226, 41330858)资助 Supported by the National Key Basic Research Development Plan (No.2011CB403302) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41471226 and 41330858)

[†] 通讯作者Corresponding author: 李鹏(1974—), 男, 山东烟台人, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: lipeng74@163.com

作者简介: 汤珊珊(1988—), 女, 宁夏灵武人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀动力学等方面的研究。E-mail: military1205@163.com

收稿日期: 2015-04-22; 收到修改稿日期: 2015-08-31

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在西安理工大学雨洪侵蚀大厅进行, 试验采用侧喷式降雨系统, 有效降雨高度为4 m。试验土槽为长13.2 m、宽1 m的可移动式钢制土槽

(图1)。每场试验以裸坡作为对照, 降雨坡度为12°。每次降雨前进行雨强率定, 降雨均匀度达到85%以上, 并对整套降雨系统配以稳压器, 以确保在整个降雨过程中雨强的稳定性。以黄土作为供试土壤, 并将其过10 mm筛后分层填入土槽中, 表层覆盖沙物质, 其土壤颗粒组成如表1所示。

表1 试验土壤颗粒组成

Table 1 Particle size composition of test soils (mm, %)

土壤类型 Soil type	黏粒 Clay (< 0.002)	粉粒 Silt (0.002 ~ 0.02)	砂粒 Sand (0.02 ~ 2)
黄土Loess	1.36	59.99	38.65
天然沙Natural sand	0.02	4.22	95.76

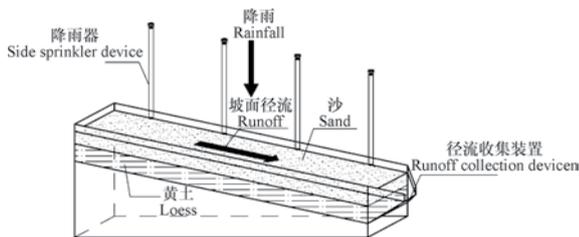


图1 模拟降雨试验装置图

Fig.1 Simulated rainfall experiment apparatus

土槽填土之前先铺设5 cm厚的细沙, 在沙层上覆盖一层纱布, 确保试验土层的透水状况接近供试土壤, 然后在沙层上填25 cm厚的试验用土。填土过程中为了保证试验土层容重均匀, 按5 cm分层填装, 每次在装下一层土前将表土打毛, 以消除两层土之间的垂直层理, 平均容重约控制在1.3 g cm⁻³, 土壤前期含水量约为20%。土槽装填完成后在土壤表面均匀洒水, 24 h后开始降雨。降雨产流后开始计时, 降雨历时30 min, 每隔1 min用取样桶及锥形瓶收集一次径流量和泥沙。试验结束后, 用量筒测定取样桶中径流样体积, 并将锥形瓶静置1 h后倒去上清液, 剩余泥水样转移至饭盒内, 放置105℃烘箱内烘干备用, 以作为分析侵蚀泥沙颗粒的样品。

通过对位于内蒙古达拉特旗境内的东柳沟流域不同时期风蚀沉积的沙层厚度以及侵蚀沟长度和坡度进行实地调查, 从雨强(1.0、1.5、2.0 mm min⁻¹)、覆沙厚度(0.5、1.0、1.5 cm)以及

覆沙长度(距坡底3.3、6.6、9.9 m和全坡覆沙)3方面进行设计(表2)。

1.2 泥沙粒度测定

泥沙样品经室内自然风干, 剔除杂草及根系, 全部过2 mm筛备用。采用激光粒度仪马尔文2000测量泥沙粒径的体积百分比。激光粒度仪测定的粒径范围为0~2 mm, 泥沙粒径分级以国际制为标准, 即0~0.002 mm为黏粒, 0.002~0.02 mm为粉粒, 0.02~2 mm为砂粒。

1.3 指标计算

采用Tyler等^[20]提出的以不同级别颗粒的体积分布表征土壤分形模型。土壤颗粒体积分布与平均粒径的分形关系式如下:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{V(\delta < \bar{d}_i)}{V_0} \quad (1)$$

$$D = 3 - \lg\left(\frac{V(\delta < \bar{d}_i)}{V_0}\right) / \lg\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \quad (2)$$

式中, \bar{d}_i 为相邻2个粒级 d_i 与 d_{i+1} 的平均粒径($d_i > d_{i+1}$, $i=1, 2, \dots$, mm); \bar{d}_{\max} 为最大粒径的平均粒径(mm); $V(\delta < \bar{d}_i)$ 为粒径小于 \bar{d}_i 颗粒累积体积; V_0 为各粒级颗粒的体积之和。其计算过程: 首先求出泥沙样品不同粒径(\bar{d}_i)的 $\lg(\bar{d}_i/d_{\max})$ 和 $\lg(\frac{V(\delta < \bar{d}_i)}{V_0})$ 的值, 其次以 $\lg(\bar{d}_i/d_{\max})$ 为横坐标, $\lg(\frac{V(\delta < \bar{d}_i)}{V_0})$ 为纵坐标, 使用最小二乘法进行直线拟合, 计算其斜率; 最后由斜率推算出分维数D。土壤颗粒分形维数不但可以用来进一步比较不同泥沙

表2 降雨试验设计方案

		Table 2 Design of the rainfall experiment		
场次 Screenings		雨强	覆沙厚度	覆沙长度
		Rainfall intensity (mm min ⁻¹)	Thickness of sand (cm)	Length of sand (m)
覆沙坡面 Sand slope	1	1.0	1.0	全坡覆沙 The whole slope covered with sand
	2	1.5	0.5	全坡覆沙 The whole slope covered with sand
	3	1.5	1.0	全坡覆沙 The whole slope covered with sand
	4	1.5	1.0	9.9
	5	1.5	1.0	6.6
	6	1.5	1.0	3.3
	7	1.5	1.5	全坡覆沙 The whole slope covered with sand
	8	2.0	1.0	全坡覆沙 The whole slope covered with sand
裸坡 Bare slope	9	1.0	0.0	0.0
	10	1.5	0.0	0.0
	11	2.0	0.0	0.0

的颗粒分布特征和质地均匀程度，还可以用来表征土壤的其他特征，如土壤沙化、土壤肥力、土地利用类型对质地的影响等^[21]。

富集率（ER）被广泛用于描述土壤侵蚀过程中的养分富集，同时也可以用来表征泥沙的颗粒分选及其严重程度。某一颗粒分级下颗粒的富集率等于侵蚀泥沙中此颗粒级泥沙含量和相同质量供试土壤中的此颗粒级别土壤含量的百分比（本文均采用体积百分含量）^[22]。

在颗粒级配曲线上与纵坐标50%相应的粒径称为中值粒径（ d_{50} ），在全部泥沙样品中，大于或小于这一粒径的泥沙在质量上刚好相等， d_{50} 越大颗粒越粗，反之则细。现有研究普遍将 d_{50} 作为评价样品粒度大小的平均粒径指标。

1.4 数据处理

借助马尔文2000计算样品的统计学指标，包括中值粒径 d_{50} 、最大粒径、平均粒径等。并计算分形维数及其富集率，运用SPSS18.0分析颗粒组成特征与 d_{50} 、分形维数以及富集率之间的相关性。

2 结果与讨论

2.1 侵蚀泥沙的颗粒组成及富集率

不同降雨条件下侵蚀泥沙颗粒含量及富集率平均值见表3。从表中可以看出，各场次降雨侵蚀

泥沙颗粒中粉粒和砂粒的含量较高，不同降雨条件下分别达到了48.86%、42.77%，这与供试土壤本身的颗粒组成有关，供试黄土中粉粒和砂粒含量分别为59.99%、38.65%，而供试沙物质中粉粒和砂粒含量则分别为4.22%、95.76%，说明降雨径流冲刷产生的泥沙颗粒具有与供试土壤颗粒相匹配的特征。由于本文的试验是在黄土坡面上覆盖沙层，因而在计算富集率时以黄土为供试土壤，表层覆盖沙物质。当以黄土为供试土壤时，黏粒和砂粒的富集率大于1，分别达到了6.18、1.11；而当黄土坡面表层覆沙后，黏粒和粉粒的富集率大于1，分别为457.1、11.57。因此进一步可以说明，侵蚀泥沙中黏粒含量占多数，这与一些学者得出的结论相一致。因为在降雨过程中，泥沙颗粒由于受到雨滴击溅作用使得大颗粒被打散成细小颗粒，增强了颗粒之间的黏结力，且以悬移的方式被径流搬运携带出坡面，因此侵蚀泥沙中细颗粒含量较高，使得黏粒的富集率大于1。

从表中还可以看出，坡面覆沙后，黏粒和粉粒的含量降低，分别降低了0~18%、11%~29%，而砂粒的含量增加了17%~48%；坡面覆沙后，黏粒和粉粒的富集率降低，分别降低了0.7%~17%、11%~29%，而砂粒的富集率增加了17%~51%。进一步说明，坡面覆沙后使得侵蚀泥沙中的粗颗粒增多，颗粒粗化。这是因为沙物质本身的孔隙度

表3 不同降雨条件下侵蚀泥沙颗粒含量及富集率

Table 3 Content and enrichment rate of silt in erosion sediment as affected by rainfall intensity

覆沙格局 Sand cover pattern		黏粒Clay			粉粒Silt			砂粒Sand		
		含量 Content (%)	富集率 Enrichment rate		含量 Content (%)	富集率 Enrichment rate		含量 Content (%)	富集率 Enrichment Rate	
			黄土-背 景值 ^①	沙-背景 值 ^②		黄土-背 景值 ^①	沙-背景 值 ^②		黄土-背 景值 ^①	沙-背景 值 ^②
裸坡 Bare slope	1.0 mm min ⁻¹	8.97	6.60	498.5	57.70	0.96	13.66	33.33	0.86	0.35
	1.5 mm min ⁻¹	8.73	6.42	485.1	57.26	0.95	13.56	34.01	0.88	0.36
	2.0 mm min ⁻¹	9.06	6.66	503.2	55.62	0.93	13.17	35.32	0.91	0.37
覆沙坡面 Sand-covered slope (mm min ⁻¹)	1.0 mm min ⁻¹	8.34	6.14	463.6	46.43	0.77	10.99	45.22	1.17	0.47
	1.5 mm min ⁻¹	7.32	5.39	406.8	42.17	0.70	9.98	50.5	1.31	0.53
	2.0 mm min ⁻¹	8.31	6.11	461.4	46.27	0.77	10.95	45.42	1.18	0.47
覆沙厚度 Thickness of sand cover	0 cm	8.73	6.42	485.1	57.26	0.95	13.56	34.01	0.88	0.36
	0.5 cm	8.53	6.28	473.9	47.86	0.80	11.33	43.61	1.13	0.46
	1.0 cm	7.32	5.39	406.8	42.17	0.70	9.98	50.5	1.31	0.53
	1.5 cm	7.85	5.78	436.2	42.96	0.72	10.17	49.19	1.27	0.51
覆沙长度 Length of sand cover	0 m	8.73	6.42	485.1	57.26	0.95	13.56	34.01	0.88	0.36
	3.3 m	8.92	6.56	495.3	45.35	0.76	10.74	45.74	1.18	0.48
	6.6 m	8.03	5.91	446.0	40.54	0.68	9.60	51.43	1.33	0.54
全坡覆沙 The whole slope covered with sand	9.9 m	9.86	7.25	403.0	51.13	0.85	12.1	39.68	1.03	0.01
	13.2 m	7.32	5.39	406.8	42.17	0.7	9.98	50.5	1.31	0.53

①Loess-background value, ②Sand-background value

大,黏结力小,在降雨过程中,由于受到雨滴的打击及降雨的冲刷,使得坡面表层的粗颗粒物随着降雨大量向坡底输移并在出口断面富集。

2.2 土壤颗粒分形维数特征

2.2.1 不同雨强下分形维数变化特征

不同雨强条件下的土壤颗粒分形维数是不同的,3种雨强下土壤颗粒分形维数的平均值分别为2.88、2.84、2.89。图2为覆沙厚度为1.0 cm和全坡覆沙情况下,不同雨强降雨下径流侵蚀泥沙颗粒分形维数的变化,反映了3种雨强条件下土壤颗粒分形维数随时间的变化特征,从图中可以看出,随着降雨的进行(试验中坡面产流后每1 min取一次样),土壤颗粒分形维数变化可以划分为3个阶段:下降期(0~5 min)—上升期(5~10 min)—稳定期(10 min以后),且随着雨强的增大,分形维数变大;同时,将径流泥沙的颗粒分形维数与黄土及天然沙的背景值进行对比发现,在整个降雨过程中,

径流泥沙的颗粒分形维数基本上大于黄土背景值的分形维数(除产流开始0~7 min),根据分形维数的物理表征意义可以说明,径流泥沙中细颗粒物较多,即降雨径流冲刷带走坡面上大量的细颗粒物,在产流开始0~10 min内,径流泥沙的颗粒分形维数维持在黄土和沙背景值之间,可以初步说明坡面表层覆沙物质中的细颗粒被降雨径流大量携带至断面出口。

2.2.2 不同覆沙格局下分形维数变化特征

不同覆沙厚度下土壤颗粒的分形维数是有区别的,覆沙厚度0.5 cm、1.0 cm和1.5 cm下的颗粒分形维数平均值分别为2.90、2.88、2.82。图3为1.5 mm min⁻¹雨强和全坡覆沙条件下3种覆沙厚度下径流泥沙的颗粒分形维数的时间分布特征。从图中可以看出,不同覆沙厚度下分形维数变化表现出了与雨强一致的规律:衰减期(0~5 min)—增长期(5~10 min)—稳定期(10 min以后);同时,随着覆沙

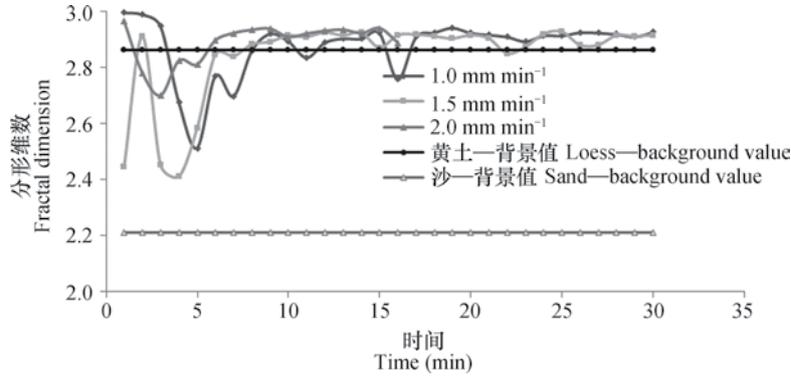


图2 不同雨强下分形维数的变化 (全坡覆沙、覆沙厚度1.0 cm)

Fig.2 Variation of fractal dimension with rainfall intensity (the whole slope covered with sand, thickness of the sand cover, 1.0 cm)

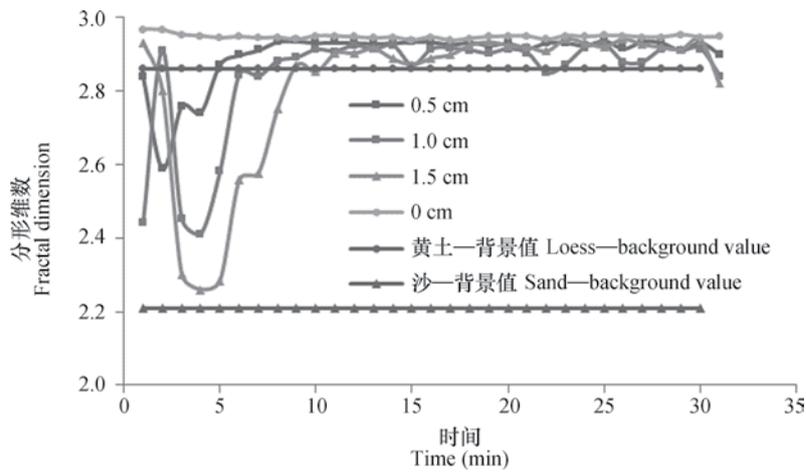


图3 不同覆沙厚度下分形维数的变化 (全坡覆沙、雨强1.5 mm min⁻¹)

Fig.3 The change of fractal dimension under different thickness (the whole slope sieved sand, 1.5 mm min⁻¹)

厚度的增加，土壤颗粒分形维数减小，相对于裸坡坡面（覆沙厚度0 cm），3种厚度下的分形维数均小于裸坡，初步说明，坡面覆沙使得细颗粒物质粗化，进而径流冲刷携带的细颗粒物质也变粗，但其粗化程度到底是多少还有待进一步研究；对比黄土及沙的背景值得出了与雨强相同的结论，即在产流中后期，径流泥沙颗粒的分形维数普遍高于黄土背景值。

图4绘制的是雨强1.5 mm min⁻¹和覆沙厚度1.0 cm下不同覆沙长度对应土壤颗粒分形维数随时间的变化曲线，从图中可以看出，分形维数在2.6~3之间波动，整体呈现出先下降后上升最后保持平稳变化的趋势，随着覆沙长度的延长，分形维数逐渐减小；同时将不同覆沙厚度下土壤颗粒的分形维数和黄土及沙背景值的分形维数进行对比发现，降雨使坡面表层的土壤颗粒细化，而坡面覆沙后，坡面表层的土壤粗化，但其粗化程度仍然小于沙子本身。

2.3 d₅₀的变化特征

图5~图7是不同降雨强度、覆沙厚度、覆沙长度下d₅₀（中值粒径）随时间的变化曲线。从图中可以看出，随着雨强的增大，d₅₀达到峰值的时间提前，而随着覆沙厚度（长度）的增加，d₅₀达到峰值的时间延迟；d₅₀值基本维持在0.01~0.02 mm之间，仅在产流开始后5~11 min出现极值点，这是由于坡面表层的砂粒在这一时间段开始大量被冲刷带走造成的；同时，将不同降雨条件下的d₅₀与黄土及沙的背景值对比得出，不同降雨条件下的d₅₀在降雨中后期（产流开始10 min以后）其值始终小于黄土的背景值，初步说明坡面降雨使坡面表层土壤细化，这与前文所得出的结论一致；此外，还可以得出，在产流开始5~10 min内，d₅₀在黄土和沙背景值之间变化，说明坡面覆沙后使坡面表层的土壤粗化，但其粗化程度仍小于沙，其超出沙背景值的部分可能是由于细沟形成以后，坡面表层的沙

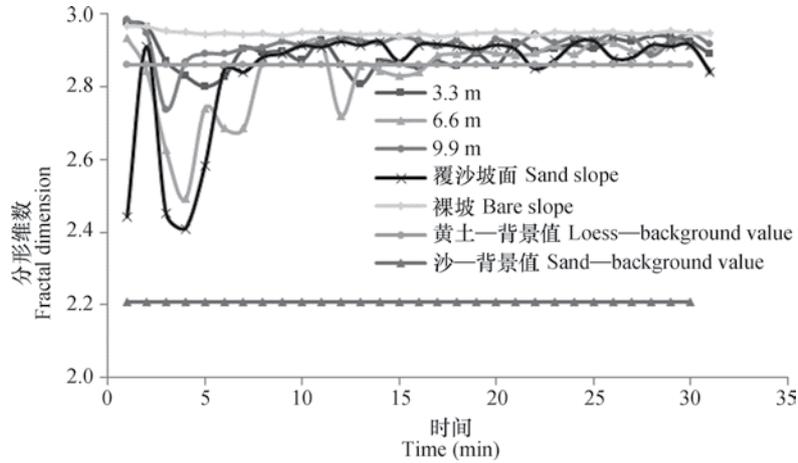


图4 不同覆沙厚度下分形维数的变化 (全坡覆沙、雨强 1.5 mm min^{-1})

Fig.4 Variation of fractal dimension with thickness of the sand cover (the whole slope covered with sand, rainfall intensity, 1.5 mm min^{-1})

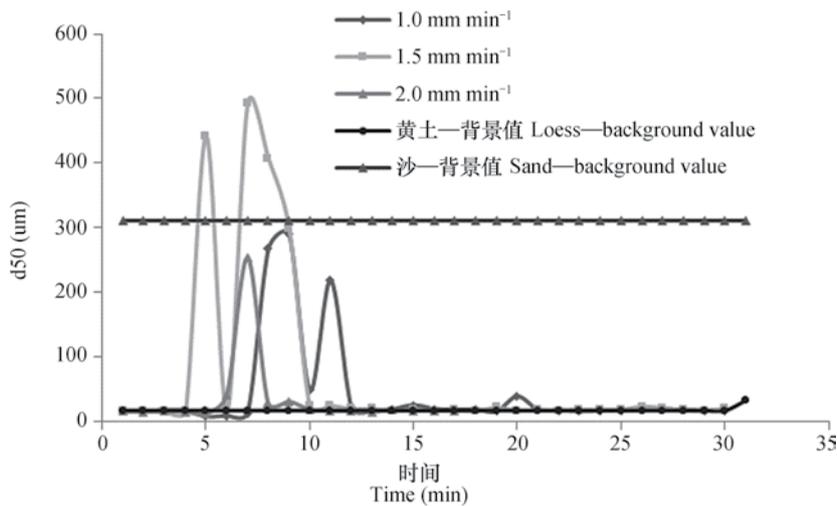


图5 不同雨强下 d_{50} 的变化 (全坡覆沙、覆沙厚度 1.0 cm)

Fig.5 Variation of d_{50} with rainfall intensity (the whole slope covered with sand, thickness of the sand cover 1.0 cm)

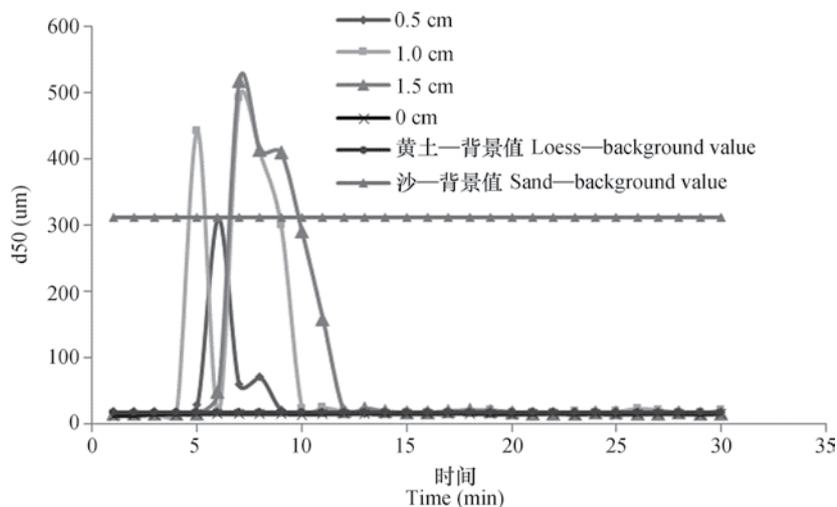


图6 不同覆沙厚度下 d_{50} 的变化 (全坡覆沙、雨强 1.5 mm min^{-1})

Fig.6 Variation of d_{50} with thickness of the sand cover (the whole slope covered with sand, rainfall intensity, 1.5 mm min^{-1})

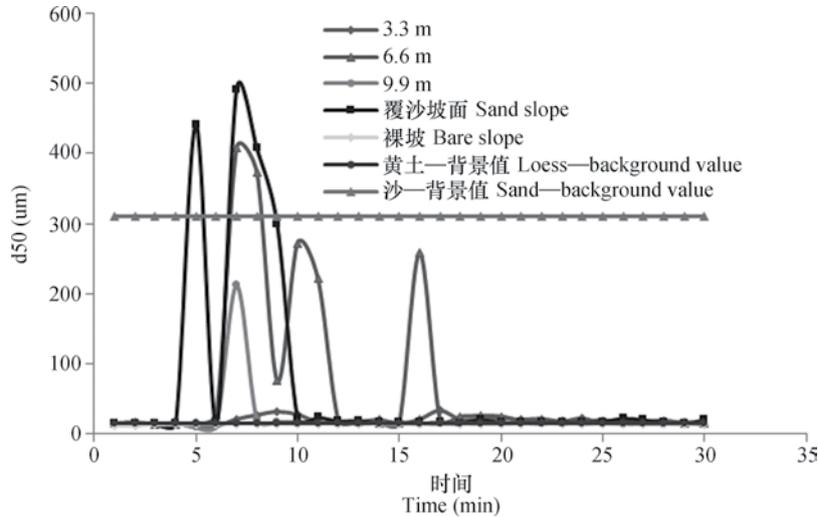


图7 不同覆沙长度下 d_{50} 的变化 (雨强 1.5 mm min^{-1} 、覆沙厚度 1.0 cm)

Fig.7 Variation of d_{50} with length of the sand cover (rainfall intensity, 1.5 mm min^{-1} ; thickness of the sand cover 1.0 cm)

受到降雨冲刷,大量被携带至断面出口,使得这一时期的径流泥沙中生物质的含量增加;图中双峰的出现多是由于坡面上出现两条细沟引起的,这与试验过程中所观察到的现象基本一致。

2.4 不同覆沙条件与颗粒特征的相关性

表4是不同覆沙条件下,分形维数和 d_{50} 与雨强、覆沙厚度以及覆沙长度的关系。从表中可以看出,分形维数和 d_{50} 与雨强均没有相关性;分形维数与覆沙厚度呈极显著负相关($p < 0.01$),而 d_{50} 与覆沙厚度则呈极显著正相关($p < 0.01$);覆沙长度方面,分形维数与其呈显著负相关($p < 0.05$), d_{50} 与其呈显著正相关($p < 0.05$)。说明坡面覆沙以后,薄层沙物质的存在使得坡面土壤颗粒粗化,侵蚀泥沙中粗颗粒物增多。

3 结论

坡面覆沙后侵蚀泥沙仍以细颗粒为主;综合分析分形维数和 d_{50} 的时间分布特征说明覆沙坡面从产流开始后 $5 \sim 11 \text{ min}$ 径流开始携带大量泥沙;坡面覆沙后,覆沙厚度(长度)与分形维数表现出负相关,而与 d_{50} 表现出正相关,且覆沙厚度对分形维数和 d_{50} 的影响作用大于覆沙长度。

参考文献

- [1] 脱登峰,许明祥,郑世清,等.黄土高原风蚀水蚀交错区侵蚀产沙过程及机理.应用生态学报,2012,23(12);3281—3287

表4 不同覆沙条件与分形维数和 d_{50} 的相关关系

Table 4 Relationships of sand cover with fractal dimension and d_{50}

	雨强 Rainfall intensity	覆沙厚度 Thickness of sand	覆沙长度 Length of sand
分形维数 Fractal dimension	-0.004	-0.364**	-0.278*
d_{50}	0.006	0.240**	0.194*

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Tuo D F, Xu M X, Zheng S Q, et al. Sediment-yielding process and its mechanisms of slope erosion in wind-water erosion crisscross region of Loess, Northwest China (In Chinese). China Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (12); 3281—3287

- [2] 海春兴,史培军,刘宝元,等.风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容.水土保持学报,2002,16(2);50—52,56

Hai C X, Shi P J, Liu B Y, et al. Research status of wind and water double erosion and its main study content in future (In Chinese). Journal of Soil and Conservation, 2002, 16 (2); 50—52, 56

- [3] Xu J X. The wind-water two-phase erosion and sediment-producing processes in the middle Yellow River basin, China. Science in China, 2000, 43 (2); 176—186

- [4] 脱登峰,许明祥,马昕昕,等.风水交错侵蚀条件下侵蚀泥沙颗粒变化特征.应用生态学报,2014,25(2);381—386

Tuo D F, Xu M X, Ma X X, et al. Impact of wind-

- water alternate erosion on the characteristics of sediment particles (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (2); 381—386
- [5] 李光录, 姚军, 庞小明, 等. 黄土丘陵区土壤和泥沙不同粒径有机碳分布及其侵蚀过程. *土壤学报*, 2008, 45 (4); 740—744
Li G L, Yao J, Pang X M, et al. Distribution and erosion processes of organic carbon in the different particle size fractions in loess hills region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (4); 740—744
- [6] 张兴昌, 邵明安. 侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究. *应用生态学报*, 2001, 12 (4); 541—544
Zhang X C, Shao M A. Enrichment of organic matter and nitrogen in eroded bedloads (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (4); 541—544.
- [7] Meyer L D, Line D E, Harmoon W C. Size characteristics of sediment from agricultural soils. *Soil and Water Conservation*, 1992, 47 (1); 107—111
- [8] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究. *土壤学报*, 2013, 50 (5); 900—908
Nie X D, Li Z W, Wang X Y, et al. Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil and organic carbon enrichment in sediment (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5); 900—908
- [9] 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. *泥沙研究*, 2003 (5); 64—68
Xiao P Q, Zheng F L. Effects of up-slope runoff and sediment on rill erosive sediment particle size distribution (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2003 (5); 64—68
- [10] 张冠华, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土丘陵区两种典型灌木群落坡面侵蚀泥沙颗粒组成及养分流失的比较. *水土保持通报*, 2009, 29 (1); 1—6
Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Comparison of particle composition and nutrient contents in sediment between two typical shrub lands in loess hills area (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29 (1); 1—6
- [11] 王晓燕, 陈洪松, 田均良, 等. 侵蚀泥沙颗粒中¹³⁷Cs的含量特征及其示踪意义. *泥沙研究*, 2005 (2); 61—65
Wang X Y, Chen H S, Tian J L, et al. Character of ¹³⁷Cs concentration in erosive sediment and its tracing meaning (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2005 (2); 61—65
- [12] 吴新亮, 魏玉杰, 李朝霞, 等. 亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性. *土壤学报*, 2014, 51 (5); 1223—1233
Wu X L, Wei Y J, Li C X, et al. Composition of sediments of erosion from different red soil slopes in subtropical area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5); 1223—1233
- [13] 郭进, 文安邦, 严冬春, 等. 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
Guo J, Wen A B, Yan D C, et al. Particle characteristics of eroded purple soil from slope land in the Three Gorge Reservoir region (In Chinese). *Journal of Soil and Conservation*, 2012, 26 (3); 18—21
- [14] 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. *土壤学报*, 2012, 49 (5); 1235—1240
Wu F Z, Shi Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (5); 1235—1240
- [15] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等. 紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素. *水土保持通报*, 2010, 30 (2); 142—144
Peng Y, Wang Y K, Fu B, et al. Particle characteristics and influencing factors of eroded purple soil (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30 (2); 142—144
- [16] 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. *环境科学*, 2012, 33 (7); 2497—2502
Wu F Z, Shi Z H, Fang N F, et al. Temporal variations of clay content in eroded sediment under different rainfall condition (In Chinese). *Environmental Science*, 2012, 33 (7); 2497—2502
- [17] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspension sediment in hillslope runoff and stream flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22; 705—719
- [18] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (5); 974—982
Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of benggang (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5); 974—982
- [19] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and erosion; A laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 35 (12); 1456—1467

- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53; 987—996
- [21] 徐国策, 李占斌, 李鹏, 等. 丹江中游典型小流域土壤颗粒及分形特征. *中国水土保持科学*, 2013, 11 (5); 28—35
Xu G C, Li Z B, Li P, et al. Soil particles and fractal features in a typical watershed of the middle reach of the Dan River (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11 (5); 28—35
- [22] 胡宏祥, 洪天求, 马友华, 等. 土壤及泥沙颗粒组成与养分流失的研究. *水土保持学报*, 2007, 21 (1); 26—29
Hu H X, Hong T Q, Ma Y H, et al. Study on soil and sediment particle size distribution and nutrient loss (In Chinese). *Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (1); 26—29

Particle Size Composition of Sediment from Sand-covered Slope under Simulated Rainfall

TANG Shanshan LI Peng[†] REN Zongping TANG Hui WANG Tian

(*Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract Wind-water alternate erosion was the main form of soil erosion in the regions subjected to wind and water alternate erosion. The knowledge of effects of wind-water alternate erosion on soil particle size composition is very important to further in-depth research on coupling mechanism of the wind-water alternate erosions and its impact on the environment. In this paper, a simulated rainfall experiment was carried out in the State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering at the Xi'an University of Technology in China from July to August 2013, and particle size composition of the sediments down the sand-covered slope, as affected by rainfall intensity and thickness and length of the sand cover, was analyzed from September to October 2013, in order to further illustrate sediment yielding process of the erosion on sand-covered slopes. The study on variation of the particle size composition of the sediments down the sand-covered slope, as affected by rainfall intensity and thickness and length of the sand cover, was done with the aid of the statistic indices of the Malvern 2000 calculation samples, including the median particle diameter d_{50} , maximum particle diameter and mean, particle diameter. Enrichment rate and fractal dimension were worked out, and SPSS18.0 was used to analyze relationships of the characteristics of their particle size composition with d_{50} , fractal dimension and enrichment rate. Results show that after the slope was covered with sand, clay and silt decreased by 0 ~ 18% and 11% ~ 29% in content, and by 0.7% ~ 17% and 11% ~ 29%, in enrichment rate, respectively, while sand increased by 17% ~ 48% in content and by 17% ~ 51% in enrichment rate. The erosion sediment was dominated with coarse particles. In the two test soils (loess and sand), only the clay enrichment rate was higher than 1 and with the sand cover increasing in thickness (length), fractal dimension of the erosion sediment decreased, but d_{50} increased; on the sand-covered slope, the initial 0 ~ 10 minutes of runoff flow contained a large volume of silt and sand; and thickness (length) of the sand cover on the slope was higher than rainfall intensity in effect on fractal dimension and d_{50} .

Key words Sand-covered slope; Soil erosion; Characteristics of particle size composition; Simulated rainfall

(责任编辑: 檀满枝)