

沙层特性对沙盖黄土坡面产流产沙变化 贡献的定量分析

曹晓娟^{1,5}, 谢林好², 张风宝^{1,3}, 杨明义^{1,3}, 李占斌⁴

(1. 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, 杨凌 712100;
2. 西安市水务局水利水土保持工作站, 西安 710018; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌
712100; 4. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 沙盖黄土坡面产流产沙方式独特, 侵蚀过程复杂, 量化降雨过程中该类坡面产流产沙变化影响因素贡献的大小对揭示其侵蚀机理具有重要的意义。基于室内模拟降雨试验, 定量分析沙层厚度(2 cm、5 cm 和 10 cm)和粒径组成(100%粒径 \leq 0.25 mm、75%粒径 \leq 0.25 mm + 25%粒径 $>$ 0.25 mm、50%粒径 \leq 0.25 mm + 50%粒径 $>$ 0.25 mm、未处理原沙和 100%粒径 $>$ 0.25 mm)在降雨过程中对产流产沙变化的影响和贡献。结果显示: 沙层厚度增加能明显延长产流时间, 减少总产流量, 增加总产沙量, 增大降雨过程中产流产沙的变异性; 随沙层粒径组成变粗, 初始产流时间和产沙量无明显变化规律, 产流量有增大趋势。沙层厚度、粒径组成及二者交互作用对初始产流时间变化的贡献率分别为 68.03%、15.77% 和 3.85%。沙层厚度对降雨不同时段 15 min 产流量和不同历时总产流量的贡献率分别在 23.89%~52.22% 和 41.10%~48.94% 之间, 对相应产沙的贡献率分别在 29.19%~62.01% 和 13.53%~30.31% 之间。整体上沙层粒径组成变化对产流产沙量变化的贡献率小于沙层厚度, 且无明显规律。沙层厚度和粒径组成交互作用对产流量和降雨中前期产沙量的影响显著($p < 0.05$), 其对产流产沙变化的贡献率分别在 13.12%~26.62% 和 3.22%~43.12% 之间, 不同降雨时段变化明显。研究结果说明, 沙层厚度决定沙盖黄土坡面产流产沙过程, 其和沙层粒径组成对产流产沙的影响和贡献随坡面沙层的侵蚀演化而动态变化, 且二者的交互作用也不容忽视。

关键词: 覆沙厚度; 粒径组成; 径流; 泥沙; 贡献率

DOI: 10.11821/dlxb201905010

1 引言

在中国, 水蚀风蚀交错带是沿着自东南向西北的半干旱气候带形成的^[1], 主要分布在北部山脉沿线、西北部的沙漠边缘, 与水蚀地区相接地区、中部河流沿岸地区和南部滨海滨湖地区。该区域属多动力综合作用区, 冬春季以风蚀为主且部分地区存在冻融侵蚀, 夏秋季以水蚀为主, 多侵蚀营力在时间上交错, 空间上叠加^[2-7]; 区域内风沙地貌和流水侵蚀地貌交错分布, 加之植被稀疏, 年际、年内气候变化剧烈^[7-8], 使得该区域土壤侵蚀过程非常复杂, 土壤侵蚀模数明显高于单一侵蚀的风蚀区和水蚀区^[9-11]。根据第二次

收稿日期: 2018-07-06; 修订日期: 2019-02-18

基金资助: 国家重点研发计划(2016YFC0402406); 国家自然科学基金项目(41371283, 41877080) [Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0402407; National Natural Science Foundation of China, No.41371283, No.41877080]

作者简介: 曹晓娟(1992-), 女, 山西吕梁人, 硕士生, 主要从事坡面土壤侵蚀研究。E-mail: caoxiaojuan16@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 张风宝(1980-), 男, 宁夏彭阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事坡面土壤侵蚀过程及机制研究。

E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

全国土壤遥感调查结果, 北方农牧交错带的风水蚀复合区2000年的水土流失面积为26.15万 km^2 , 占全区土地面积的61.4%^[12], 是典型的生态脆弱区。黄土高原的水蚀风蚀交错区主要分布在 $35^{\circ}25'N\sim 40^{\circ}38'N$ 、 $103^{\circ}00'E\sim 113^{\circ}53'E$ 之间的晋陕蒙接壤区^[13], 也是主要的农牧交错区, 主要由沙黄土、风成沙、老黄土及强烈风化的厚层沙岩和泥页岩等多种产沙地层组成^[14]。因此, 该区是黄土高原强烈侵蚀中心^[18, 15], 也是黄河下游河床粗泥沙颗粒的主要源区—多沙粗沙区^[16-17]。其中位于水蚀风蚀交错区的六道沟流域, 在第四纪时期以来经历了至少3次以上的新构造抬升运动, 地层结构较为复杂, 且由风力活动带来的沙层改变了该流域的地貌形态, 形成了风积沙和风成黄土, 其中风积沙由于风力、风速等原因呈片状点缀于黄土丘陵沟壑坡面^[18-19], 从而形成了沙层特性变化多样的片沙覆盖黄土坡面^[7, 16]。

片沙覆盖黄土地貌是水蚀风蚀交错区内多营力综合作用下形成的最为特殊的地貌单元, 上覆沙层和下伏黄土在容重、机械组成、孔隙、结构及导水性和持水性等方面差异显著, 存在明显的沙土界面^[20]。张丽萍等^[21]通过人工模拟降雨试验首先发现片沙覆盖黄土坡面侵蚀过程为降雨垂直渗流—形成沙土界面潜流—沙层崩塌, 明显不同于单一黄土坡面的侵蚀过程。Zhang等^[22-23]研究了覆沙厚度和坡度对沙盖黄土坡面产流产沙过程的影响及与一元黄土坡面产流产沙的不同。谢林好等^[24]探讨了覆沙厚度和粒径组成对沙盖黄土坡面产流产沙的影响。Xu等^[25]、汤姗姗等^[26-28]、Zhang^[29]等研究了较薄(小于1.5 cm)覆沙黄土坡面产流产沙特征、水沙关系及水动力学参数与径流产沙的关系等。目前这些研究主要集中在对比不同条件下沙盖黄土坡面产流产沙量的变化特征, 但对降雨过程中及不同降雨历时下各影响因子对产流产沙变化的影响程度及贡献大小还鲜有报道。因此, 本文拟利用室内模拟降雨的试验数据, 基于主效应分析和方差分析等数理统计方法, 研究沙盖黄土坡面侵蚀过程中覆沙厚度、粒径组成和厚度与粒径交互作用对产流产沙变化的贡献率及其变化特征, 量化覆沙厚度和沙层粒径组成对沙盖黄土坡面产流产沙的影响, 揭示沙盖黄土坡面的侵蚀特征, 为水蚀风蚀交错带水土流失治理、预防及预测预报提供基础数据支撑。

2 材料与方法

2.1 试验设计与过程

试验在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅侧喷区进行。降雨器高度为16 m, 可满足雨滴在降落到地面之前已经达到终点速度的要求, 降雨均匀度 $> 80\%$ ^[30]。试验模拟陕西省神木县六道沟流域($110^{\circ}21'E\sim 110^{\circ}23'E$ 、 $38^{\circ}46'N\sim 38^{\circ}51'N$)最为典型的上层为沙、下伏老黄土(离石黄土)的沙土二元结构坡面(图1), 神木县年平均降水量为

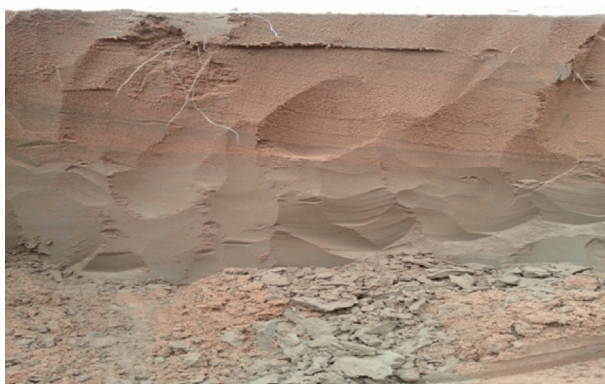


图1 六道沟流域沙盖黄土剖面图

Fig. 1 Soil profile of a sand-covered loess slope in the Liudaogou watershed

422.7 mm, 最大年降水量为818.1 mm, 最小年降水量为108.4 mm, 且一年中76.3%的降水集中在6-9月份^[9]。试验用沙和老黄土均采于神木县六道沟流域, 且风沙与老黄土分开采样, 其中老黄土采于山坡断层侧取中间土层($110^{\circ}21'37'E$, $38^{\circ}47'29'N$), 老黄土致

密、坚实；风沙采于当地的片沙覆盖黄土坡面的沙丘上（110°20′54″E，38°49′45″N）（图1）。风沙和老黄土的机械组成如表1所示。将风干后的老黄土过5 mm筛剔除根系杂物；风沙剔除根系等杂物后，过筛分为≤ 0.25 mm和> 0.25 mm两类，并将过筛后的两类风沙按不同质量含量百分比进行混合，由细到粗形成5个水平的组合，分别为1（100%粒径≤ 0.25 mm）、2（75%粒径≤ 0.25 mm+25%粒径> 0.25 mm）、3（50%粒径≤ 0.25 mm+50%粒径> 0.25 mm）、4（未处理原沙）和5（100%粒径> 0.25 mm）5个粒径组成。各粒径组合具体机械组成如表1所示。

表1 供试土壤及沙粒颗粒组成

Tab. 1 Particle size distribution of the soil and sand used in this study

材料类型	粒径组成(%)				几何平均粒径(mm)	
	砂粒(mm)		粉粒(mm) (0.05~0.002)	粘粒(mm) (<0.002)		
	2~0.25	0.25~0.05				
黄土	23.21±2.09		66.63±2.55	10.06±0.47	0.064	
沙	75.32±3.06	19.56±2.17	3.73±1.70	1±0.88	0.703	
沙层粒径 组成水平	1	0.00	80.52	15.36	4.12	0.181
	2	25.00	60.40	11.52	3.08	0.286
	3	50.00	40.26	7.68	2.06	0.451
	4	75.32	19.56	3.73	1.39	0.703
	5	100.00	0.00	0.00	0.00	1.125

试验用的可移动式变坡钢制土槽长宽深为1.1 m×0.8 m×0.4 m（图2），底部打直径2 mm和间距10 cm×10 cm的圆孔。土槽中间顺坡用隔板分开，形成两个宽为0.4 m的小土槽，布设平行试验作为一个重复。装土前，土槽底部铺纱布，纱布上铺10 cm河道粗砂，其上再铺纱布，分4层填装老黄土，每层5 cm厚，结合野外实验站长期观测结果及确保下垫面一致，老黄土层含水率控制在10%左右，根据武秀荣等^[13]的测定结果，老黄土容重控制在1.40 g/cm³左右。将准备好完全干燥的风沙自然倒在老黄土表层，沙层设置2 cm、5 cm和10 cm 3个厚度。模拟降雨的强度为1.5 mm/min，坡度为15°，降雨历时大于90 min。降雨开始前，率定雨强（通过设置3个雨量筒放置在土槽区，并且使得各个雨量筒所测雨强误差不超过0.1 mm/min），降雨开始后，记录初始产流时间。坡面开始产流后每隔3 min在径流出口接全样，称全样重，然后用烘干法测定泥沙量，并通过泥沙量计算产流量。

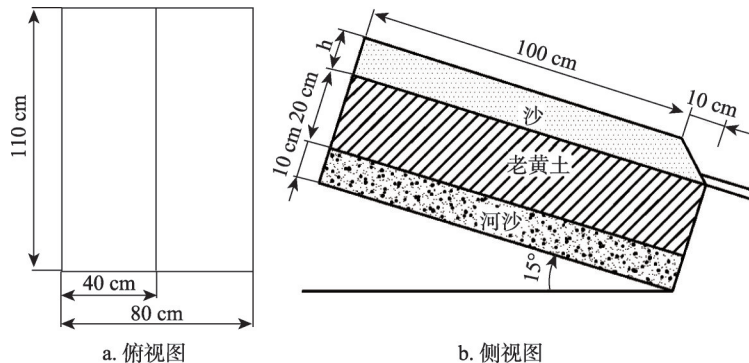


图2 实验布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental design with top view and side view

2.2 数据分析方法

根据降雨过程产流产沙的变化特征和图表的可读性确定按照 15 min 的间隔进行数据分析,用 Excel 计算出 0~15 min、15~30 min、30~45 min、45~60 min、60~75 min 和 75~90 min 不同时段产流产沙量和 0~15 min、0~30 min、0~45 min、0~60 min、0~75 min 和 0~90 min 不同降雨历时的总产流产沙量。利用 Minitab 软件分析各影响因子对初始产流时间、不同时段 15 min 产流产沙量及不同降雨历时的总产流产沙量的主效应(主效应是指不考虑其他研究变量的变化,或者将其他自变量的变化效应平均掉,单独考察一个自变量对因变量的变化效应),用 SigmaPlot 制图,SPSS 软件进行方差分析,得到各因子的显著水平,并结合公式(1)计算各因子的贡献率。因子贡献率(P_F)的计算公式^[31]为:

$$P_F = \frac{SS_F - (DOF_F \times V_{Er})}{SS_T} \times 100 \quad (1)$$

式中: P_F 为因子的贡献率(%); SS_F 为因子的 III 型平方和; DOF_F 为因子的自由度; V_{Er} 为误差平方和; SS_T 是总离差平方和。方差分析过程中,利用统计分析软件可直接计算 SS_F 、 DOF_F 、 V_{Er} 和 SS_T 的值,对其计算方法不再赘述。

3 结果与分析

3.1 沙层厚度和粒径组成对初始产流时间变化的主效应及贡献率

沙层厚度和粒径组成对初始产流时间的主效应如图 3 所示,随沙层厚度增加,初始产流时间明显延长,且延长幅度较大;粒径组成水平 1 和 2 的初始产流时间相接近,未处理原沙与粒径组成水平 3 和 5 的初始产流时间相差不大,整体上,较细沙层(粒径组成 1 和 2)的初始产流时间比未处理原沙及较粗沙层(粒径组成水平 3 和 5)的初始产流时间长,粒径组成水平 3 的初始产流时间最短。表 2 是基于方差分析的各因子对初始产流时间影响的贡献率。结果显示,沙层厚度、粒径组成和二者交互作用对初始产流时间均有显著影响($p < 0.05$)。各因素对产流时间的贡献率为沙层厚度>沙层厚度与粒径组成的交互作用>误差>粒径组成,分别为 68.03%、15.77%、12.35%和 3.85%。沙层厚度基本控制了产流时间,其他影响因素的贡献较小。

3.2 沙层厚度和粒径组成对产流量变化的主效应和贡献率

3.2.1 沙层厚度和粒径组成对产流量变化的主效应 图 4 是降雨过程中不同时段 15 min 产流量随沙层厚度和沙层粒径组成变化主效应图。随沙层厚度增加,除 0~15 min 时段内 5 cm 和 10 cm 覆沙坡面无产流外,其他各时段的产流量均明显减小;同一厚度下,随降雨

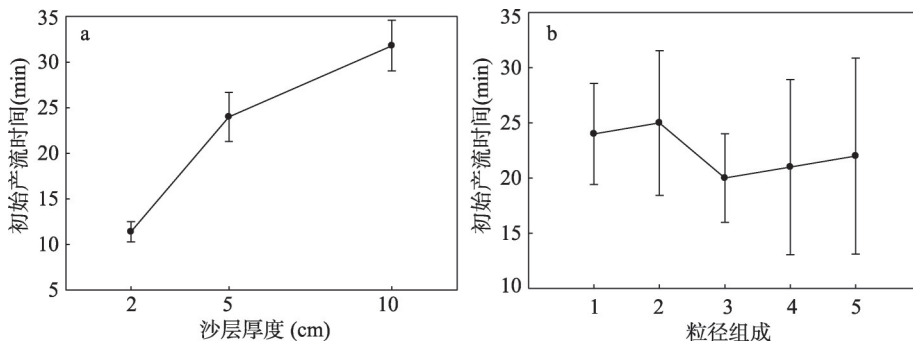


图 3 初始产流时间随覆沙厚度和粒径组成的变化

Fig. 3 The initiation time of runoff under sand layer of different thickness and size compositions (\pm means standard errors)

表2 基于方差分析的各因子对初始产流时间影响的显著性及贡献率

Tab. 2 Significance and potential contributions of different factors to initial runoff time based on ANOVA

变量	来源	平方和	自由度	均方和	F值	显著性	因子贡献率
初始产流时间	沙层厚度	2226.6	2	1113.3	80.87	0***	68.03
	粒径组成	179.53	4	44.9	3.26	0.041*	3.85
	厚度×粒径	620.07	8	77.5	5.63	0.002**	15.77
	误差	206.5	15	13.8			12.35
	总计	3232.7	29				

注：***表示 $p < 0.001$ ，**表示 $p < 0.01$ ，*表示 $p < 0.05$ 。

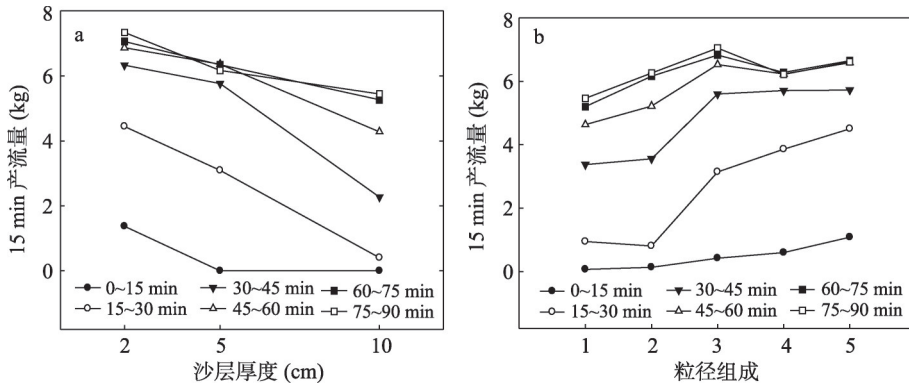


图4 沙层厚度和粒径组成对不同降雨时段 15 min 产流量的主效应图

Fig. 4 Main effect diagram of sand layer thickness and particle size composition on cumulative runoff of 15-min sub-rainfall during the rainfall

进行各时段产流量基本呈增大趋势，但 2 cm 和 5 cm 覆沙坡面在前 45 min 内相邻时段产流量相差较大，而后 45 min 内相邻时段产流量相差很小，10 cm 覆沙厚度在前 30 min 内相邻时段及后 30 min 内相邻时段的产流量都相差较小，而在降雨 15~60 min 内相邻时段的产流量变化较大。随沙层粒径组成变粗，降雨过程中 0~30 min 内的产流量呈增加趋势，30~90 min 内的产流量从粒径组成水平 1 到水平 3 是增加的，30~45 min 的产流量在粒径组成水平 3 后基本保持不变，45~90 min 各时段产流量从粒径组成水平 3 到水平 4 呈降低趋势，之后基本保持不变。就相同粒径组成而言，随降雨进行各时段产流量基本呈增大趋势，0~60 min 内产流增加较快，相邻时段差异明显，而 60~90 min 内相邻时段产流量非常接近，尤其是沙层粒径较粗（粒径组成水平 4 和 5）的坡面在降雨后期产流量基本相同。

针对不同降雨历时的总产流量而言（图 5），相同沙层厚度或粒径组成下，降雨历时对总产流量有绝对的影响。降雨历时短时，沙层较薄的覆沙坡面相邻历时产流量差值大于较厚坡面，粒径组成较粗坡面相邻历时产流量差值大于较细坡面。降雨历时较长时，不同沙层厚度或粒径组成坡面相邻历时产流量差值基本一致。相同降雨历时，随沙层厚度增加，总产流量降低；随沙层粒径组成变粗即沙层几何平均粒径越粗，总产流量先增加后趋于稳定，几何粒径小于 0.45 mm 时，粒径大小影响沙盖黄土的产流量，而当粒径大于 0.45 mm 后，粒径大小对产流量无明显影响。

3.2.2 沙层厚度和粒径组成对产流量变化的贡献率 降雨过程中沙层厚度、粒径组成和二者交互作用对降雨不同时段产流变化影响的显著性及贡献率分析表明（表 3），整个降雨过程中，沙层厚度和厚度与粒径组成的交互作用对不同时段内产流量有显著影响（ $p < 0.05$ ），粒径组成对 0~60 min 内各时段产流量有显著影响（ $p < 0.05$ ），而对 60~90 min 内

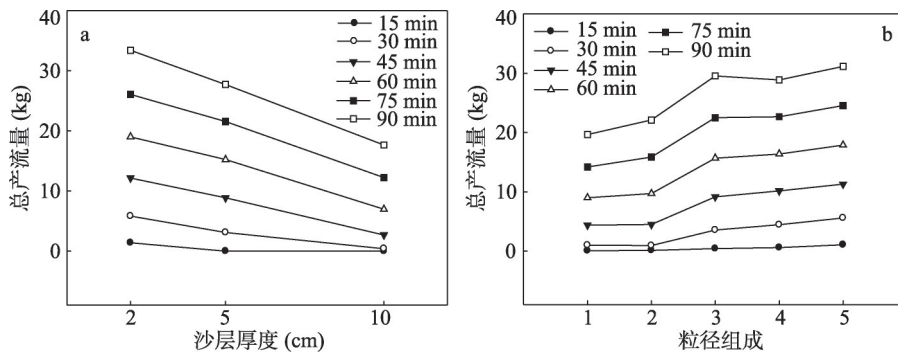


图5 覆沙厚度和粒径组成对不同降雨历时总产流量的主效应图

Fig. 5 Main effect of sand layer thickness and sand size composition on total runoff loss for different rainfall durations

表3 各因子对不同降雨时段15 min产流量影响的显著性及贡献率

Tab. 3 Significance and potential contributions of different factors to cumulative runoff of 15-min sub-rainfall during the rainfall

时间段(min)	沙层厚度(cm)		粒径组成(%)		交互作用		误差
	Sig	P_F	Sig	P_F	Sig	P_F	P_F
0~15	0.000***	46.62	0.001***	13.11	0.000***	26.22	14.05
16~30	0.000***	35.28	0.000***	27.62	0.000***	24.86	12.25
30~45	0.000***	52.22	0.000***	17.69	0.001**	18.24	11.85
46~60	0.000***	40.40	0.006**	16.65	0.025*	16.29	26.66
60~75	0.002**	23.89	0.068	10.03	0.028*	24.38	41.70
76~90	0.002**	28.01	0.106	7.88	0.048*	20.22	43.89

注: ***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.01$, *表示 $p < 0.05$ 。

各时段产流量的影响则不显著 ($p > 0.05$)。降雨过程中, 沙层厚度和粒径组成对各时段产流量变化的贡献率均呈先增大后减小的趋势, 但二者交互作用和误差项对各时段产流量变化的贡献率则呈相反趋势。整个降雨过程中沙层厚度对径流量变化的贡献大于粒径组成, 降雨前60 min内, 沙层厚度对各时段产流量的贡献最大, 降雨60 min后, 误差项对各时段径流量变化的贡献最大, 达到40%以上。

沙层厚度、粒径组成及二者交互作用对不同降雨历时下总产流量都有显著影响 ($p < 0.05$) (表4), 沙层厚度对不同降雨历时下总产流量变化的贡献最大, 在41.10%~48.94%之间波动, 无明显规律; 除15 min降雨历时的贡献率最小外, 其他降雨历时下沙层粒径组成的贡献居中, 且随着降雨历时的延长先减小后基本保持稳定; 交互作用项的贡献率在降雨前期减小, 后期基本保持稳定。误差项的贡献随降雨历时延长先减小后增大, 在11.74%~19.55%之间波动。

表4 各因子对不同降雨历时总产流量影响的显著性及贡献率

Tab. 4 Significance and potential contributions of different factors to total runoff for different rainfall durations

降雨历时(min)	覆沙厚度(cm)		粒径组成(%)		交互作用		误差
	Sig.	P_F	Sig.	P_F	Sig.	P_F	P_F
15	0.000***	46.62	0.001***	13.11	0.000***	26.22	14.05
30	0.000***	41.10	0.000***	27.87	0.001**	18.28	12.75
45	0.000***	47.05	0.000***	24.57	0.001**	16.63	11.74
60	0.000***	48.94	0.000***	24.27	0.006**	13.12	13.68
75	0.000***	46.63	0.000***	21.94	0.008**	14.63	16.80
90	0.000***	45.13	0.001**	19.68	0.011*	15.64	19.55

注: ***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.01$, *表示 $p < 0.05$ 。

3.3 沙层厚度和粒径组成对产沙量变化的主效应和贡献率

3.3.1 沙层厚度和粒径组成对产沙量变化的主效应 图6显示降雨过程中不同时段15 min产沙量随沙层厚度和沙层粒径组成变化的主效应。降雨前15 min内只有沙层较薄的2 cm覆沙坡面产沙, 5 cm和10 cm覆沙坡面均不产沙; 降雨15~45 min内, 沙层厚度从2 cm到5 cm, 产沙量增加, 而5 cm到10 cm产沙量是减少的; 降雨45 min之后, 产沙量与沙层厚度呈正相关关系, 相关系数在0.48~0.75之间。随降雨的进行, 2 cm和5 cm的覆沙坡面在前3个时段(0~45 min内)产沙量快速增加, 且在30~45 min时段侵蚀量达到最大, 之后呈降低趋势; 而10 cm覆沙坡面在降雨开始30 min内没有产流产沙, 在30 min后产沙量迅速增加并于60~75 min时段达到最大, 之后产沙量呈降低趋势, 与2 cm和5 cm覆沙坡面的产沙变化明显不同。沙层粒径组成对不同时段15 min产沙量的影响比较复杂。降雨前15 min, 各粒径组合下产沙量差异较小, 细粒径组合基本不产沙, 粗粒径组合产沙也很少; 15~30 min时段内产沙量随粒径变粗基本呈增加趋势; 降雨历时大于30 min后, 各时段产沙量随粒径变粗先增大后减小, 但在不同粒径组成坡面峰值出现的时间不同, 粒径组成水平4坡面的峰值出现在30~45 min时段内, 而45~90 min内各时段产沙峰值出现在粒径组成水平2坡面。整体而言, 沙层粒径组成对降雨过程中不同时段15 min产沙量的影响比较复杂。

图7是沙层厚度和粒径组成对不同降雨历时总产沙量的主效应。随降雨历时延长,

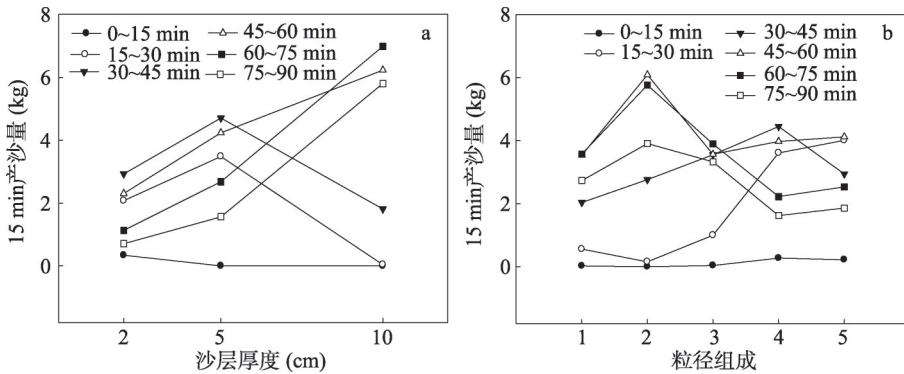


图6 覆沙厚度和粒径组成对不同降雨时段15 min产沙量的主效应图

Fig. 6 Main effect of sand layer thickness and particle size composition on cumulative sediment yield of 15-min sub-rainfall during the rainfall

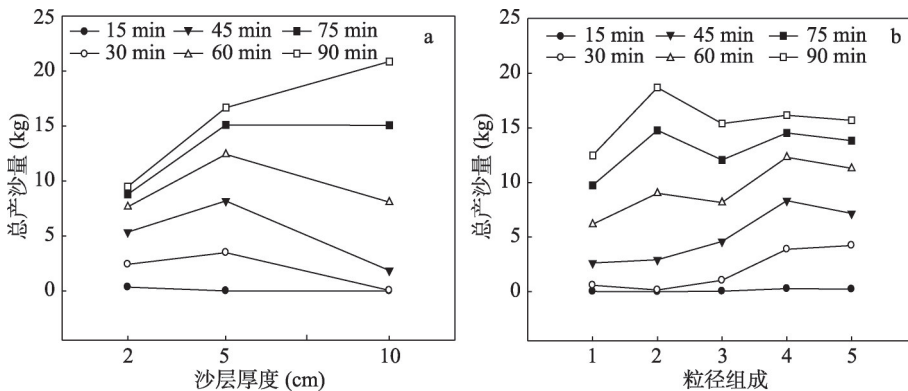


图7 覆沙厚度和粒径组成对不同降雨历时总产沙量的主效应图

Fig. 7 Main effect of sand layer thickness and particle size composition on sediment yield for different rainfall durations

总产沙量逐渐增大,但不同沙层厚度对其响应存在差异,降雨历时短时,薄覆沙坡面相邻降雨历时之间总产沙量差值较大,而厚覆沙坡面差值较小,随降雨历时增加,结果正好相反。随着覆沙厚度增加,降雨历时为15 min时,只有2 cm覆沙坡面产沙,降雨历时在15~60 min时,5 cm覆沙坡面总产沙量最大;降雨历时大于60 min时,总产沙量随着厚度的增加而增加。粒径组成对总产沙量的影响随降雨历时的延长而变化,降雨历时<30 min时,随粒径组成变粗,总产沙量增大;降雨历时大于30 min,随粒径组成变粗,总产沙量呈波动状变化;降雨历时为30~60 min时,沙层粒径组成水平4坡面总产沙量最大;降雨历时>60 min时,粒径组成水平2坡面的总产沙量最大,粒径组成水平4与5的总产沙量几乎相等。

3.3.2 沙层厚度和粒径组成对产沙变化的贡献率 表5是各影响因素对降雨过程中不同时段产沙量变化影响的显著性和贡献率。沙层厚度对降雨过程中不同时段产沙量变化的影响极显著($p < 0.01$),而沙层粒径只有对15~30 min和60~75 min时段的产沙量影响显著($p < 0.05$),其他时段内影响不显著($p > 0.05$)。沙层厚度对降雨过程中不同时段产沙量变化的贡献率随降雨进行先减小后明显增大,最小值出现在30~45 min时段,最大值出现在75~90 min时段。沙层厚度与粒径组成交互作用对产沙的贡献正好与覆沙厚度的相反,呈先增大后明显减小的趋势,其最大值出现在15~30 min,最小值出现在75~90 min时段。沙层粒径组成对不同时段产沙量变化的贡献无明显规律,误差项对不同阶段产沙量的贡献率除15~30 min时段为最小的3.61%外,之后整体呈减小趋势。

沙层厚度、粒径组成、二者的交互作用和误差项对不同降雨历时总产沙量变化的贡献变化较为复杂(表6)。沙层厚度对不同降雨历时总产沙量有极显著影响($p < 0.01$),其贡献率随降雨历时的延长先增大后减小再增大,贡献率在14%~30%之间变化。粒径组成对降雨历时大于15 min的总产沙量的贡献率随降雨历时延长有减小的趋势,降雨历时为75~90 min,粒径组成的贡献基本被其他因素掩盖,不能完全体现出来。沙层厚度与粒径组成的交互作用对不同降雨历时总产沙量有显著影响($p < 0.05$)且贡献较大,尤其是降雨历时在30~75 min时,贡献率超过34.88%。误差项对总产沙量的贡献率占很大的比例,最大值达到44.26%,在降雨初期(降雨历时为15 min)和降雨后期(降雨历时>60 min)贡献率均大于40%。

表5 各因子对不同降雨阶段15 min产沙量影响的显著性及贡献率

Tab. 5 Significance and potential contributions of different factors to cumulative sediment yield of 15-min sub-rainfall during the rainfall

时间段(min)	沙层厚度(cm)		粒径组成(%)		交互作用		误差 P_F
	Sig	P_F	Sig	P_F	Sig	P_F	
0~15	0.001**	29.19	0.061	10.26	0.038*	20.52	40.03
15~30	0.000***	23.21	0.000***	30.06	0.000***	43.12	3.61
30~45	0.003**	21.71	0.135	5.85	0.010*	32.97	39.48
45~60	0.001**	25.70	0.175	4.45	0.011*	31.12	38.73
60~75	0.000***	54.60	0.016*	11.01	0.053	10.52	23.87
75~90	0.000***	62.01	0.097	5.58	0.273	3.22	29.19

注:***表示 $p < 0.001$,**表示 $p < 0.01$,*表示 $p < 0.05$ 。

4 讨论

覆沙层改变了坡面的入渗过程,覆沙层较黄土孔隙大,入渗快,且能存储部分雨水,且随沙层厚度增厚,沙层总孔隙增加,需要湿润沙层的水量和沙层孔隙容水总量均

表6 各因子对不同降雨历时总产沙量影响的显著性及贡献率
 Tab. 6 Significance and potential contributions of different factors to total sediment yield for different rainfall durations

降雨历时(min)	沙层厚度(cm)		粒径组成(%)		交互作用		误差
	Sig	P_F	Sig	P_F	Sig	P_F	P_F
15	0.001**	29.19	0.061	10.26	0.038*	20.52	40.03
30	0.000***	23.14	0.000***	32.99	0.000***	39.94	3.93
45	0.000***	30.31	0.000***	22.30	0.000***	34.88	12.51
60	0.007**	13.53	0.027*	11.96	0.002**	42.45	32.06
75	0.007**	17.08	0.280	2.30	0.006**	39.38	41.24
90	0.001**	29.92	0.459	-0.26	0.027*	26.08	44.26

注: ***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.01$, *表示 $p < 0.05$ 。

增加,雨水到达沙土界面时间延长,导致初始产流时间明显延长,这和已有的研究结果一致^[22-23, 25, 32-33]。沙层粒径组成变化对产流时间的贡献总体上很小,但值得关注的是沙层厚度和沙层粒径组成的交互作用对初始产流时间的影响较大。沙层粒径组成较粗时(4和5组合),沙层孔隙较大,大孔隙水流通道易形成优先路径,雨水能较快到达沙土界面,但因导水率差异无法完全入渗到老黄土层内,进而形成沙土界面流,且相对于粒径组成较细的覆沙坡面,粒径组成较粗的沙层内流速较大,因此产流时间相对提前;在沙层粒径组成较细时(1和2组合),沙层孔隙度较大,能存储较多雨水,但大孔隙少,沙层中水流速率相对较慢,不易产生沙土界面流,因此产流时间延长。对于粒径组成水平3,可能存在一个合理的粒径组合,沙层颗粒级配最优,沙层中气孔率超低,入渗过程细颗粒堵塞孔隙,在沙层内形成较密的弱透水层,此时,界面流的产生不再是沙土界面,而是沙层新形成的弱透水层,弱透水层相对于沙土界面削减了沙层厚度,因此产流时间最短。研究表明,沙层厚度对沙盖黄土坡面产流时间起主导作用,沙层粒径组成的直接作用较小,但其与沙层厚度的交互作用对沙盖黄土坡面初始产流时间的影响不容忽视。

较厚覆沙黄土坡面,在产流前存储较多水量,沙土界面流移动过程中渗入黄土层水量增加,导致降雨过程不同时段产流量及不同历时总产流量随覆沙厚度增加而减少和不同覆沙厚度下到达稳定产流量的时间不同(图2),这与现有研究结果相一致^[22, 24, 34]。沙层粒径组成越粗,水流在沙层内流动阻力小,同一时段产流量较大(图2),也导致不同降雨历时下粒径组成粗的沙层总产流量较大(图3)。整个降雨过程中,产流量变化及各种因素对其变化贡献的变化是覆沙黄土坡面沙层形态侵蚀演化的反应,在降雨初期,坡面覆沙面积大,沙层内水流缓慢,沙层厚度及沙层厚度与粒径组成的交互作用控制初始产流时间,导致这一时段产流量较少;随降雨进行(15~45 min),坡面沙层被侵蚀输移,沙层蓄水释放,裸露黄土坡面面积增加,沙层厚度、沙层粒径组成及二者交互作用对产流的作用进一步加强,坡面存在沙层渗流和黄土坡面超渗产流,产流量逐渐增加;在降雨中后期(降雨历时> 45 min),覆沙坡面大量沙被侵蚀输移出坡面,黄土裸露面积增大,坡面产流方式与一元黄土坡面类似,导致降雨中后期不同时段产流量相差较小,且沙层厚度、粒径组成及二者交互作用对产流量变化的影响减少,因此使得误差项贡献率增大,甚至超过40%。但就不同降雨历时总产流量而言,表现的是降雨过程的累积值,因此沙层厚度的作用一直保持最大。对比降雨过程中不同时段和不同降雨历时下产流量对影响因素变化的响应,发现降雨过程中不同时段产流量对影响因素的变化更为敏感。

由于沙层结构松散,颗粒内部无粘聚力,可蚀性大,沙土界面流只要满足了沙粒的临界启动条件,就很容易被侵蚀。沙层厚度增厚代表着易侵蚀物源量的增加,但因厚度增加延迟产流,导致在降雨中前期薄覆沙坡面不同时段产沙量及不同历时总产沙量都大

于厚覆沙坡面,而在降雨后期则相反,薄覆沙坡面的产沙量减少,厚覆沙坡面产沙量快速增加,因此沙层厚度对不同时段产沙量变化的贡献率随降雨延长呈增加的趋势。沙层厚度对降雨过程不同时段及不同降雨历时总产沙量的影响,也与覆沙盖黄土坡面产流产沙方式有关。对薄覆沙坡面而言,属于蓄满的全坡面产流,因而降雨前期产沙量较大,而厚覆沙坡面,很难形成蓄满产流,一般都是形成沙层潜流且在沙层边缘以渗流形式流出,产流慢,且前期产流能力较弱,因而厚覆沙坡面降雨中前期产沙量小,随降雨进行,薄覆沙坡面逐渐演变为黄土坡面,抗侵蚀能力增强,产沙量减弱,而厚覆沙坡面则以渗流侵蚀和坍塌后退的方式进行,因此一旦侵蚀开始,产沙量就快速增加,产沙能力远大于薄覆沙坡面。粗粒径组成的覆沙坡面产流早,且在降雨前期产沙量大(图4),而随降雨历时延长细粒径沙盖黄土坡面的产沙量逐渐增大且超过粗粒径坡面(图5)。整体而言,粒径组成变化对产沙量变化的贡献小,规律不明显且变化较大,但沙层厚度和粒径组成交互作用对中前期坡面产沙有显著影响($p < 0.05$),且其贡献率变化的波动大于对产流量变化的贡献率。

从整个降雨过程来看,同时段产流量与产沙量并不总是保持一致。在降雨中前期(降雨历时 < 45 min)径流量和产沙量一致性较好,都呈增大趋势,降雨后期的一致性较差,产流量趋于稳定,而产沙量呈降低趋势,主要是因为沙层被大量侵蚀输移,沙盖黄土坡面已逐渐演变为一元黄土坡面。片沙覆盖黄土坡面产流过程表现为雨水垂直入渗—沙土界面潜流—沙层边缘渗流—地表径流,产沙过程表现为沙层边缘渗流侵蚀—沙层坍塌重力侵蚀—地表径流输移^[20]。沙层厚度和粒径组成决定了坡面产流产沙的方式,而坡面产流产沙的方式反过来又影响了沙层厚度、粒径组成及二者交互作用对产流产沙量变化的贡献。

5 结论

(1) 沙层厚度、粒径组成和二者交互作用对初始产流时间变化的贡献率分别为68.03%, 15.77%和3.85%,且均影响显著($p < 0.05$)。沙层厚度基本决定初始产流时间,沙层厚度越厚,初始产流时间越长;粒径组成变粗,初始产流时间有变短趋势。

(2) 降雨中前期(降雨历时 < 60 min),沙层厚度、粒径组成及二者交互作用对不同时段15 min产流量和不同降雨历时下总产流量都有显著影响($p < 0.05$),而降雨后期(降雨历时 > 60 min)粒径组成对不同时段15 min产流量不显著。沙层厚度增厚,产流量减小,尤其是降雨中前期,沙层厚度基本控制产流量,沙层厚度对15 min产流量和不同降雨历时总产流量的贡献率分别在23.89%~52.22%和41.10%~48.94%之间。沙层粒径组成对产流量变化的作用有限。

(3) 沙层厚度对沙盖黄土坡面产沙影响显著($p < 0.05$)。沙层厚度对不同时段产沙量变化的贡献随降雨进行先减小后明显增大,而沙层厚度与粒径组成交互作用的贡献率变化趋势正好相反。沙层粒径组成对降雨过程不同时段产沙量变化的贡献无明显规律。

本研究表明沙层特性是沙盖黄土坡面产流产沙的主要影响因素之一。降雨过程中,沙盖黄土坡面随沙层厚度变化其产流产沙方式发生改变。沙层厚度较薄时,坡面产流产沙与一元黄土坡面类似,随沙层变厚,产流过程变为雨水垂直入渗—沙土界面流—沙层边缘渗流—地表径流,侵蚀过程降雨前期表现为边缘渗流侵蚀—径流输移,降雨中期表现为沙层储水增加失稳,导致沙层坍塌,沙层内储水释放径流携带大量泥沙,发生渗流、重力和径流混合侵蚀,侵蚀量增大,降雨后期沙层基本被侵蚀输移,坡面侵蚀相当

于一元黄土坡面, 侵蚀量降低。降雨过程中产流方式和侵蚀方式的多变性和复杂性是沙盖黄土坡面产流产沙波动性较大的主要原因, 也是导致降雨过程中不同因子对产流产沙变化的贡献率发生变化的主要原因。本研究为我们进一步进行沙土二元结构坡面侵蚀模型的研究奠定基础, 但沙盖黄土坡面侵蚀机理及二元结构坡面侵蚀模型的建立还有待于进一步深入研究。

参考文献(References)

- [1] Song Yang, Liu Lianyou, Yan Ping. A review on complex erosion by wind and water research. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 77-88. [宋阳, 刘连友, 严平. 风水复合侵蚀研究述评. *地理学报*, 2006, 61(1): 77-88.]
- [2] Gao Xuertian, Tang Keli. Study on alternate action of wind erosion and water erosion in Shenfu-Dongsheng coal mining area. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(4): 2-8. [高学田, 唐克丽. 神府—东胜矿区风蚀水蚀交互作用研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(4): 2-8.]
- [3] Zhang Pingcang. Spatial and temporal variability of erosion by water and wind in water-wind erosion crisscross region: Taking Liudaogou Watershed in Jin-Shaan-Meng contiguous areas as an example. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(3): 93-94. [张平仓. 水蚀风蚀交错带水风两相侵蚀时空特征研究: 以神木六道沟小流域为例. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(3): 93-94.]
- [4] Zhang Liping, Tang Keli, Zhang Pingcang. Research on soil wind erosion laws in Loess Hilly-Gully Region covered by sheet sand. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(3): 8-12. [张丽萍, 唐克丽, 张平仓. 片沙覆盖的黄土丘陵区土壤风蚀特征研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(4): 8-12.]
- [5] Xu J X. The wind-water two-phase erosion and sediment-producing processes in the middle Yellow River basin, China. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2000, 43: 176-186.
- [6] Xu J X. Influences of coupled wind-water processes on suspended sediment grain size: An example from tributaries of the Yellow River. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2005, 50: 881-895.
- [7] Xu J X, Yang J S, Yan Y X. Erosion and sediment yields as influenced by coupled eolian and fluvial processes: The Yellow River, China. *Geomorphology*, 2006, 73(1/2): 1-15.
- [8] Wu Shengyong. The analysis of variation of weather of Shenmu county in the past 55 years. *Climate Shaanxi*, 2013(2): 20-23. [吴胜勇. 神木县近55年气候特征及变化分析. *陕西气象*, 2013(2): 20-23.]
- [9] Zhang J Q, Yang M Y, Deng X X, et al. Beryllium-7 measurements of wind erosion on sloping fields in the wind-water erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 240-252.
- [10] Hai Chunxin, Shi Peijun, Liu Baoyuan, et al. Research status of wind and water double erosion and its main study content in future. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 50-52, 56. [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.]
- [11] Tuo Dengfeng, Xu Mingxiang, Zheng Shiqing, et al. Sediment-yielding process and its mechanisms of slope erosion in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau, northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(12): 3281-3287. [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.]
- [12] Yao Zhengyi, Qu Jianjun, Zheng Xinming, et al. Present status, characteristic of distribution and development tendency of soil and water loss of wind-water erosion of agriculture-animal husbandry intercrossed area in north. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12): 63-66. [姚正毅, 屈建军, 郑新民, 等. 北方农牧交错带风蚀复合区水土流失现状、分布特点及发展趋势. *中国水土保持*, 2008(12): 63-66.]
- [13] Tang Keli. Importance and urgency of harnessing the interlocked area with both water and wind erosion in the Loess Plateau. *Soil and Water Conservation in China*, 2000(11): 11-12. [唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性. *中国水土保持*, 2000(11): 11-12.]
- [14] Tang Keli, Hou Qingchun, Wang Binke, et al. The environment background and administration way of Wind-water Erosion Crisscross Region and Shenmu Experimental Area. *Memoir of NISWC, Academia Sinica and Ministry of Water Resources*, 1993(2): 14. [唐克丽, 侯庆春, 王斌科, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(神木水蚀风蚀交错带生态环境整治技术及试验示范研究论文集)*, 1993(2): 14.]
- [15] Zhang Q Y, Fan J, Zhang X P. Effects of simulated wind followed by rain on runoff and sediment yield from a sandy loessial soil with rills. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(9): 2306-2315.
- [16] Liu J H, Wang G Q, Li H H, et al. Water and sediment evolution in areas with high and coarse sediment yield of the

- Loess Plateau. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(4): 448-457.
- [17] Zhang Shengli, Chen Fazhong. Influence of sand yield by wind erosion on coarse sediment in the muddy and coarse sand area of middle Yellow River. *Soil and Water Conservation in China*, 1997(9): 17-22, 65-66. [张胜利, 陈发中. 黄河中游多沙粗沙区风蚀产沙对黄河粗泥沙影响分析. *中国水土保持*, 1997(9): 17-22, 65-66.]
- [18] Stokes S, Goudie A S, Colls A E L, et al. On the timing of dune construction in the northernmost RubAl-Khali, United Arab Emirates//Dubai International Conference on Desertification, February 2000, Dubai, Abstracts Volume, 2002: 34.
- [19] Stokes S, Goudie A S, Colls A E L, et al. Optical dating as a tool for studying dune reactivation, accretion rates and desertification over decadal, centennial and millennial timescales//Alsharhan A S, Wood W W, Goudie A S, et al. *Desertification in the Third Millennium*. Balkema, Rotterdam, 2003: 57-66.
- [20] Wu Xiurong, Zhang Fengbao, Wang Zhanli. Variation of sand and loess properties of binary structure profile in hilly region covered by sand of the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 190-193, 210. [武秀荣, 张风宝, 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. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 190-193, 210.]
- [21] Zhang Liping, Tang Keli, Zhang Pingcang. Soil water erosion processes in loess hilly -gully region covered with sheet sand. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(1): 41-46. [张丽萍, 唐克丽, 张平仓. 片沙覆盖的黄土丘陵区土壤水蚀过程研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(1): 41-46.]
- [22] 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. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 244-251.
- [23] Zhang F B, Yang M Y, Li B B, et al. Effects of slope gradient on hydro-erosional processes on an aeolian sand-covered loess slope under simulated rainfall. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 447-456.
- [24] Xie Linyu, Bai Yujie, Zhang Fengbao, et al. Effect of thickness and particle size composition of overlying sand layer on runoff and sediment yield on sand-covered loess slopes. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(1): 60-72. [谢林妤, 白玉洁, 张风宝, 等. 沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响. *土壤学报*, 2017, 54(1): 60-72.]
- [25] Xu G C, Tang S S, Lu K X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2523-2530.
- [26] Tang Shanshan, Li Zhanbin, Li Cong, et al. Runoff and sediment yield process on sand covered slope under simulated rainfall. *Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2016, 44(5): 139-146. [汤珊珊, 李占斌, 李聪, 等. 模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(5): 139-146.]
- [27] Tang Shanshan, Li Zhanbin, Lu Kexin, et al. Relationship between hydrodynamic parameters and runoff and sediment yield on sand-covered slope in rainfall simulation study. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(20): 136-143. [汤珊珊, 李占斌, 鲁克新, 等. 覆沙坡面水动力学参数与径流产沙的关系. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 136-143.]
- [28] Tang Shanshan, Li Peng, Ren Zongping, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1): 39-47. [汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 等. 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.]
- [29] Zhang X, Li Z B, Li P, et al. Influences of sand cover on erosion processes of loess slopes based on rainfall simulation experiments. *Journal of Arid Land*, 2018, 10: 39-52.
- [30] Zheng Fenli, Zhao Jun. Introduction of the artificial rainfall simulation and rain markers. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 177-178. [郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 177-178.]
- [31] Aber S, Salari D, Parsa M R. Employing the Taguchi method to obtain the optimum conditions of coagulation-flocculation process in Tannery wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 162(1): 127-134.
- [32] Zhang Hui, Li Peng, Tang Shanshan, et al. Experimental study on runoff and sediment yield characteristics on sand-covered slope under the condition of repetitive rainfall. *Journal of Sediment Research*, 2016(6): 59-65. [张辉, 李鹏, 汤珊珊, 等. 多场次降雨条件下覆沙坡面的径流产沙特性试验研究. *泥沙研究*, 2016(6): 59-65.]
- [33] Zhang Yang, Li Zhanbin, Niu Wen, et al. Runoff and sediment yield process on the sand-covered loess slopes under simulated runoff conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 6-10, 31. [张洋, 李占斌, 牛雯, 等. 模拟径流条件下覆沙黄土坡面产流产沙过程. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 6-10, 31.]
- [34] Tang Shanshan, Li Zhanbin, Ren Zongping, et al. Experimental study on the process of runoff and sediment yield on sand-covered slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 25-28. [汤珊珊, 李占斌, 任宗萍, 等. 覆沙坡面产流产沙过程试验研究. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 25-28.]

Quantifying the contributions of sand layer characteristic to variations of runoff and sediment yields from sand-covered loess slopes during simulated rainfall

CAO Xiaojuan^{1,5}, XIE Linyu², ZHANG Fengbao^{1,3}, YANG Mingyi^{1,3}, LI Zhanbin⁴

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi China; 2. Xi'an Workstation of Soil and Water Conservation, Xi'an 710018, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 4. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Loess slopes covered with aeolian sand are unique geomorphic features in the wind-water erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau. On these loess slopes, runoff and sediment production patterns are unique and complex and the thickness of covering sand and its interaction with other factors may largely interfere soil erosional responses. Therefore, quantifying the variations of runoff and sediment yields and assessing the possible factors are of great importance to understand the erosion mechanism in such unique landscapes. To quantify the effects of sand layer thickness and sand size composition on runoff generation and sediment yield, sand-covered loess slopes with 15° were subject to simulated rainfall events (intensity 1.5 mm/min) in this study. Sand layers of three different thicknesses, 2 cm, 5 cm and 10 cm, were respectively placed on loess surface. For each sand thickness, there were five kinds of compositions, i.e. 100% sand diameter ≤ 0.25 mm, 75% sand diameter ≤ 0.25 mm + 25% sand diameter > 0.25 mm, 50% sand diameter ≤ 0.25 mm + 50% sand diameter > 0.25 mm, untreated sand, and 100% sand diameter > 0.25 mm. Our results show that as sand thickness increased, it prolonged initiation time of runoff, reduced runoff yield, increased sediment yield and enhanced the variability in runoff and soil loss rates during rainfall. Our findings also indicate that with coarser sand, the total runoff loss tended to increase even though the initiation time of runoff and sediment yield was not obviously changed. The sand layer thickness, sand size composition, and their interactions respectively contributed 68.03%, 15.77%, and 3.85% to the variation of initiation time of runoff ($p < 0.05$), respectively. For the runoff production, the sand layer thickness can explain 23.89% to 52.22% of the variation of runoff rates during a 15-min rainfall sub-rainfall, and 41.10% to 48.94% of total runoff loss for different rainfall durations. For the sediment production, the sand layer thickness can explain 29.19% to 62.01% of the variation of soil loss rates during a 15-min rainfall sub-rainfall, and 13.53% to 30.31% the total sediment yield for different rainfall durations. Moreover, the sand size composition had less impact on runoff and sediment yields than the thickness of the sand layers. Their combined effects were significant during the early and intermediate stages ($p < 0.05$), and contributed to 13.12%-26.62% of runoff loss and 3.22%-43.12% of sediment yield. Overall our observations suggest that runoff and sediment generation on sand-covered loess slopes were mainly affected by the sand layer thickness rather than sand size composition, and their combined effects also varied as erosion proceeded.

Keywords: sand layer thickness; particle size composition; runoff; sediment; contribution rate