

# 沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响\*

谢林好<sup>1</sup> 白玉洁<sup>1</sup> 张凤宝<sup>1, 2†</sup> 杨明义<sup>1, 2</sup> 李占斌<sup>1, 2, 3</sup>

(1 西北农林科技大学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)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

**摘要** 片沙覆盖黄土区是水蚀风蚀交错带内土壤侵蚀最为强烈的区域, 研究该区内土壤侵蚀特征可对水蚀风蚀交错带水土流失的预报及防治提供理论依据。采用室内模拟降雨, 研究黄土坡面不同覆沙厚度 (2 cm、5 cm 和 10 cm) 和沙层粒径组成 (100% < 0.25 mm、75% < 0.25 mm + 25% > 0.25 mm、50% < 0.25 mm + 50% > 0.25 mm、未处理原沙和 100% > 0.25 mm) 对坡面产流产沙的影响。结果表明, 覆沙黄土坡面较黄土坡面的初始产流时间明显延长, 产流速率和产流量减小, 产沙速率和产沙量增大, 降雨过程中产流产沙波动性增大, 且这些变化随覆沙厚度增加而明显加强; 沙层粒径组成在不同覆沙厚度下对坡面产流产沙的影响不同, 2 cm 覆沙厚度坡面在降雨前期随粒径变粗产流产沙呈增大趋势, 降雨后期无明显变化; 5 cm 覆沙厚度坡面随沙层粒径变粗产流速率呈增加趋势, 降雨前期上覆粗粒径沙层坡面的侵蚀速率高于细粒径沙层坡面, 降雨后期恰好相反; 10 cm 覆沙厚度的坡面产流产沙随沙层粒径组成变化不明显。典型覆沙黄土坡面的产流过程为雨水垂直入渗—沙土界面潜流—沙层边缘渗流—地表径流, 产沙过程为沙层边缘渗流侵蚀—沙层坍塌重力侵蚀—地表径流输移, 明显不同于无覆沙黄土坡面的超渗产流方式及溅蚀—片蚀—细沟侵蚀的侵蚀发展过程。

**关键词** 覆沙黄土坡面; 覆沙厚度; 粒径组成; 产流产沙

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

水蚀风蚀交错带是黄土高原土壤侵蚀最为强烈的区域<sup>[1-3]</sup>, 也是黄河下游河床粗泥沙的主要源区<sup>[4-5]</sup>。该区域冬春季以风蚀为主, 夏秋季以水蚀为主<sup>[6-7]</sup>, 土壤侵蚀在时间上交错, 空间上重叠。独特的多动力综合侵蚀条件和侵蚀特征形成了特殊的地貌类型, 其中以片沙覆盖黄土丘陵地貌最为特殊, 侵蚀产沙也最为强烈<sup>[8]</sup>。片沙覆盖黄土丘陵地貌因沙层和下伏黄土在入渗、容重、结构、孔隙度、机械组成、导水率和持水性等方面的差异, 沙层与黄土层之间存在明显的沙土界面, 呈典型的沙土二元结构, 目前这一特殊地貌类型土壤侵蚀过程及机理在坡面尺度上的研究相对薄弱。张丽萍

等<sup>[9-10]</sup>最早关注覆沙黄土坡面土壤侵蚀问题, 通过野外模拟降雨试验发现覆沙黄土坡面产生的径流量小, 若雨强小, 则无径流产生, 一旦产生径流, 则含沙量很大, 产流产沙过程是垂直渗流—坡面潜流—崩塌, 明显不同于单一黄土坡面的产流产沙过程。惠振江<sup>[11]</sup>在野外考察中发现覆沙黄土坡面存在沙土界面流, 并对其进行了定性描述。汤珊珊等<sup>[12-13]</sup>和 Xu 等<sup>[14]</sup>通过室内模拟降雨试验初步探讨了覆沙坡面的侵蚀—搬运过程、径流—产沙关系以及侵蚀泥沙颗粒分布情况, 但该试验覆沙厚度较薄 (小于 1.5 cm), 且未涉及覆沙层颗粒组成对产流产沙过程的影响。总之, 片沙覆盖黄土丘陵区沙

\* 国家自然科学基金项目 (41371283, 41571130082, 41330858) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41371283, 41571130082 and 41330858)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 谢林好 (1992—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为坡面土壤侵蚀。E-mail: xly1660014798@163.com

收稿日期: 2016-04-19; 收到修改稿日期: 2016-06-23; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-07-14

土二元结构坡面产流产沙的研究主要集中在定性的理论描述层面，定量化试验研究还很少，其坡面侵蚀形成的特征、过程及机理的研究有待进一步加强。

片沙覆盖黄土区分布范围广，因侵蚀动力条件、地貌条件及地表组成物质的差异，覆沙层厚度和沙层颗粒组成存在差异，由此导致坡面产流产沙特征不同。本文拟采用室内模拟降雨的方法，研究不同覆沙厚度和沙层粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响，揭示覆沙黄土坡面的侵蚀特征，为该区域水土流失的治理和预防提供理论依据。

## 1 材料与方 法

本试验于2015年6—9月在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行。试

验采用侧喷式人工模拟降雨系统，降雨器高度为16 m，可保证所有雨滴在降落时达到终点速度，降雨均匀度 > 80% [15]。基于武秀荣等 [16] 研究结果，试验模拟陕西省神木县六道沟流域（110°21'E ~ 110°23'E，38°46'N ~ 38°51'N）最为典型的上层为沙、下伏为老黄土（离石黄土）的沙土二元结构，试验用的老黄土和沙均取自神木六道沟流域，黄土粉粒和黏粒含量高，沙的砂粒含量高（表1）。黄土剔除根系杂物后过5 mm筛，沙剔除根系等杂物后，过筛分为 < 0.25 mm 和 > 0.25 mm 两类，并按不同质量含量百分比进行混合，即 a（100% < 0.25 mm）、b（75% < 0.25 mm + 25% > 0.25 mm）、c（50% < 0.25 mm + 50% > 0.25 mm）、d（未处理原沙）和 e（100% > 0.25 mm）5 个粒径组成。

试验土槽用长宽深为1.1 m × 0.8 m × 0.4 m 的可

表1 取样点黄土与沙的主要物理性质

Table 1 Physical properties of the soil and original sand at the sampling sites

| 材料类型<br>Material<br>type | 粒径组成 Particle size content (%) |                              |                           | 容重<br>Bulk density<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | 孔隙度<br>Porosity<br>(%) | 饱和导水率<br>Saturation conductivity<br>coefficient<br>(mm min <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|---|------------------------|--|
|                          | 砂粒 Sand (2 ~ 0.05 mm)          | 粉粒 Silt<br>(0.05 ~ 0.002 mm) | 黏粒 Clay<br>( < 0.002 mm ) |   |                        |  |
| 沙 Sand                   | 75.71 ± 3.06                   | 19.56 ± 2.17                 | 3.73 ± 1.70               | 1.60 ± 0.04                                 | 39.60 ± 2.40           | 1.40 ± 0.46  |
| 黄土<br>Loess soil         | 23.21 ± 2.09                   | 66.63 ± 2.55                 | 10.16 ± 0.47              | 1.43 ± 0.03                                 | 46.20 ± 1.40           | 0.05 ± 0.02  |

注：表中数据为平均值 ± 标准差 Note: The data in the table are mean ± standard deviation

移动式变坡钢制土槽，底部10 cm × 10 cm的间距打孔，孔径为2 mm，以保证良好的渗透。土槽中间用隔板分开，形成两个宽为0.4 m的小土槽，布设平行试验。试验雨强为90 mm h<sup>-1</sup>，坡度为15°。装土前，土槽底部铺纱布，纱布上铺设10 cm的河道砂，保证良好的透水性，河道砂上再铺纱布，纱布上铺20 cm的黄土层，黄土层的含水率控制在10%左右（结合黄土高原神木试验站野外监测和室内前期准备结果而定），容重控制在1.40 g cm<sup>-3</sup>左右，接近野外自然状况，为精确控制容重，黄土按5 cm厚度分层装土。土槽四周尽量压实以防止边坡效应的发生。在黄土坡面上覆干沙层，干沙自然倒在黄土层上并抹平，为防止沙层滑塌，沙层最末端人为形成约30°的斜坡。沙层砂粒组成为5组，各组沙的粒径组成粗砂（2 ~ 0.25 mm）、

细砂（0.25 ~ 0.05 mm）、粉粒（0.05 ~ 0.002 mm）和黏粒（ < 0.002 mm）的比例分别为 a（0、80.52%、15.36%和4.12%）、b（25.00%、60.40%、11.52%和3.08%）、c（50.00%、40.26%、7.68%和2.06%）、d（75.71%、19.56%、3.73%和1.00%）和 e（100%、0、0和0），每个粒径组成下有3个覆沙厚度（2 cm、5 cm和10 cm），做一组无覆沙黄土坡面试验，共计16场试验。试验开始前进行雨强率定，先用遮雨布盖住土槽，在土槽四周均匀布设4个雨量筒，接3 min降雨量，率定雨强。雨强达到要求后，快速揭开覆盖土槽的遮雨布并用秒表记时。降雨过程中记录初始产流时间，产流后每3 min在径流出口接全样。降雨结束后称全样质量，放置24 h澄清，用虹吸法排除清水，然后称泥沙及剩余水的质量，再将泥沙

搅拌均匀并取少量代表样称重烘干,测定其含水量,以推算降雨过程的径流量和产沙量。

两个平行试验取平均值,利用Origin 8.0 软件作图,利用SPSS 19.0 软件进行单变量方差分析(ANOVA)。

## 2 结果

### 2.1 不同沙层厚度和粒径组成下的初始产流时间

不同覆沙厚度黄土坡面较无覆沙黄土坡面初

始产流时间均明显延后,2 cm、5 cm和10 cm覆沙厚度的初始产流时间分别较无覆沙黄土坡面的初始产流时间延长了6~10倍、12~20倍和16~26倍(图1)。初始产流时间随覆沙厚度的增加呈延长趋势,2 cm覆沙厚度的初始产流时间小于5 cm和10 cm覆沙厚度的初始产流时间。覆沙粒径较细的a、b和c处理,5 cm和10 cm覆沙厚度的初始产流时间相差不大,且为2 cm覆沙厚度的初始产流时间2倍以上。覆沙粒径较粗的d和e处理,5 cm覆沙厚度的初始产流时间约为2 cm覆沙厚度的2倍,10 cm覆

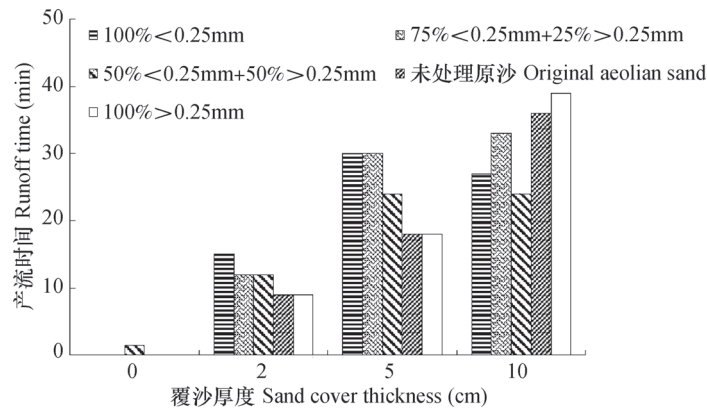


图1 不同覆沙厚度和粒径组成的初始产流时间

Fig. 1 Initial runoff time as affected by thickness and particle size of sand cover on slope

表2 基于方差分析的各因子对覆沙坡面初始产流时间、60 min 累积产流量和侵蚀量影响的显著性及贡献率

Table 2 ANOVA of significance and contribution rate of various factors affecting initial runoff time, 60 min runoff volume and sediment yield on loess slopes covered with aeolian sand

| 变量<br>Variable                        | 来源<br>Source     | 平方和<br>Sum of squares | 自由度 Degree<br>of freedom | 均方和<br>Sum of mean<br>squares | F值<br>F value | 显著性<br>Significance | 因子贡献率<br>Contribution rate of<br>each source (%) |
|---------------------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------|---------------------|--|
| 初始产流时间<br>Initial runoff<br>time      | 厚度 Thickness     | 2 226                 | 2                        | 1 113                         | 80.86         | 0.000               | 68.03  |
|                                       | 粒径 Particle size | 179.5                 | 4                        | 44.88                         | 3.26          | 0.041               | 3.85   |
|                                       | 交互 Interaction   | 620.0                 | 8                        | 77.50                         | 5.63          | 0.002               | 15.77  |
|                                       | 误差 Error         | 206.5                 | 15                       | 13.76                         |               |                     | 12.35  |
|                                       | 总计 Total         | 3 232                 | 29                       |                               |               |                     |  |
| 60 min产流量<br>60 min runoff<br>volume  | 厚度 Thickness     | 761.0                 | 2                        | 380.5                         | 52.89         | 0.000               | 48.94  |
|                                       | 粒径 Particle size | 399.0                 | 4                        | 99.76                         | 13.86         | 0.000               | 24.27  |
|                                       | 交互 Interaction   | 257.7                 | 8                        | 32.21                         | 4.48          | 0.006               | 13.12  |
|                                       | 误差 Error         | 107.9                 | 15                       | 7.19                          |               |                     | 13.68  |
|                                       | 总计 Total         | 1 526                 | 29                       |                               |               |                     |  |
| 60 min侵蚀量<br>60 min sediment<br>yield | 厚度 Thickness     | 139.4                 | 2                        | 69.68                         | 7.12          | 0.007               | 13.53  |
|                                       | 粒径 Particle size | 145.0                 | 4                        | 36.25                         | 3.70          | 0.027               | 11.96  |
|                                       | 交互 Interaction   | 454.1                 | 8                        | 56.76                         | 5.80          | 0.002               | 42.45  |
|                                       | 误差 Error         | 146.8                 | 15                       | 9.78                          |               |                     | 32.06  |
|                                       | 总计 Total         | 885.3                 | 29                       |                               |               |                     |  |

沙厚度的初始产流时间约为5 cm覆沙厚度的2倍。不同覆沙厚度下初始产流时间对沙层粒径组成变化的响应不同，2 cm和5 cm覆沙厚度随覆沙粒径的变粗初始产流时间整体均呈缩短趋势，10 cm覆沙厚度随覆沙粒径变粗初始产流时间反而延长（c除外）。方差分析结果显示，厚度、粒径及厚度与粒径的交互作用对初始产流时间均有显著影响（ $p < 0.05$ ）。厚度、粒径、厚度与粒径的交互作用及其他不可控因子对初始产流时间变化的贡献分别为68.03%、3.85%、15.77%和12.35%（表2），覆沙厚度控制初始产流时间，粒径组成对初始产流时间的影响较小。

### 2.2 不同沙层厚度和粒径组成下的产流过程

次降雨过程中，各覆沙厚度和粒径组成下产流速率随降雨历时明显呈现两个阶段（图2），第一阶段产流均呈迅速增大趋势，第二阶段呈稳定或波动产流。其中无覆沙黄土坡面的产流速率整体大于覆沙黄土坡面，无覆沙黄土坡面达到稳定产流的时间较覆沙坡面短，覆沙黄土坡面产流在第二阶段的波动性大于无覆沙黄土坡面。各粒径组成下的产流速率尽管存在波动交织，但在沙层粒径组成较细的a、b和c，2 cm覆沙厚度坡面的产流速率基本上大于5 cm和10 cm覆沙厚度的产流速率，5 cm覆沙厚度坡面的产流速率小于10 cm覆沙厚度的。覆沙粒

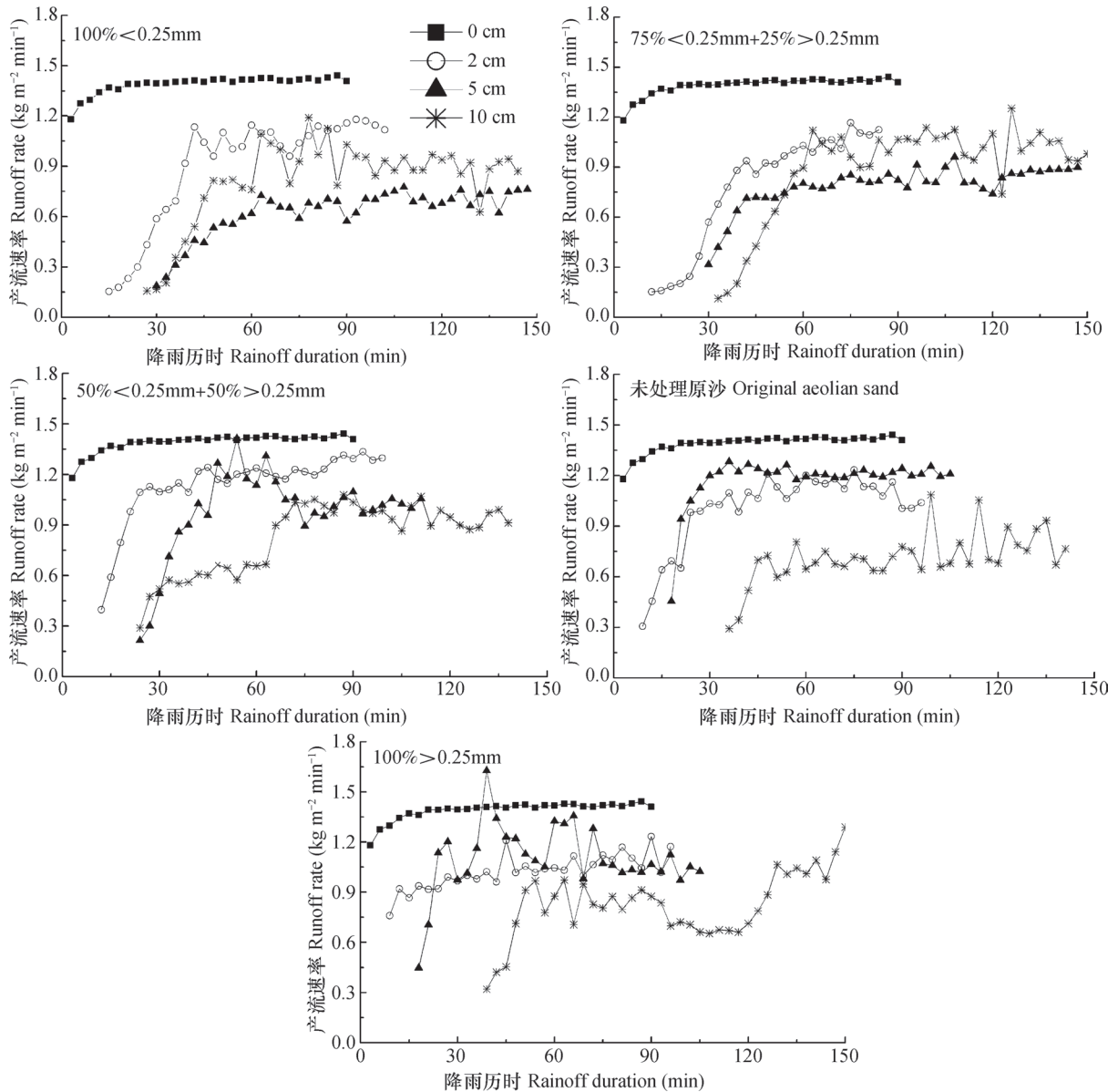


图2 相同粒径组成不同覆沙厚度下的产流速率

Fig. 2 Runoff yield rate on loess slopes the same in sand particle size composition, but different in thickness of sand cover



径组成为d和e条件下, 5 cm覆沙厚度坡面的产流速率和2 cm覆沙厚度的产流速率相接近, 大于10 cm覆沙厚度的产流速率, 且均有明显波动。5 cm厚度的覆沙粒径e出现产流速率大于无覆沙黄土坡面产流速率的情况, 5 cm和10 cm覆沙厚度坡面在降雨过程中产流速率的波动性大于2 cm覆沙坡面。

随覆沙粒径变粗, 2 cm和5 cm覆沙厚度下产流速率增大阶段的持续时间有缩短趋势, 粗粒径坡面的产流速率能快速达到准稳定阶段(图3)。整

个降雨过程中, 2 cm和10 cm覆沙厚度下不同粒径组成坡面产流速率的差异小于5 cm覆沙厚度坡面。2 cm覆沙厚度坡面在产流增加阶段不同粒径组成坡面的产流速率相差较大, 粗粒径覆沙(d和e)的产流速率明显大于细粒径覆沙(a和b)的产流速率, 而在产流达到准稳定阶段后, 不同粒径组成坡面的产流速率呈交织波动, 差异变小。5 cm覆沙厚度坡面在整个降雨过程中, 粗、细粒径覆沙坡面产流速率差异较大, 粗粒径(d和e)的产流速率明显大于

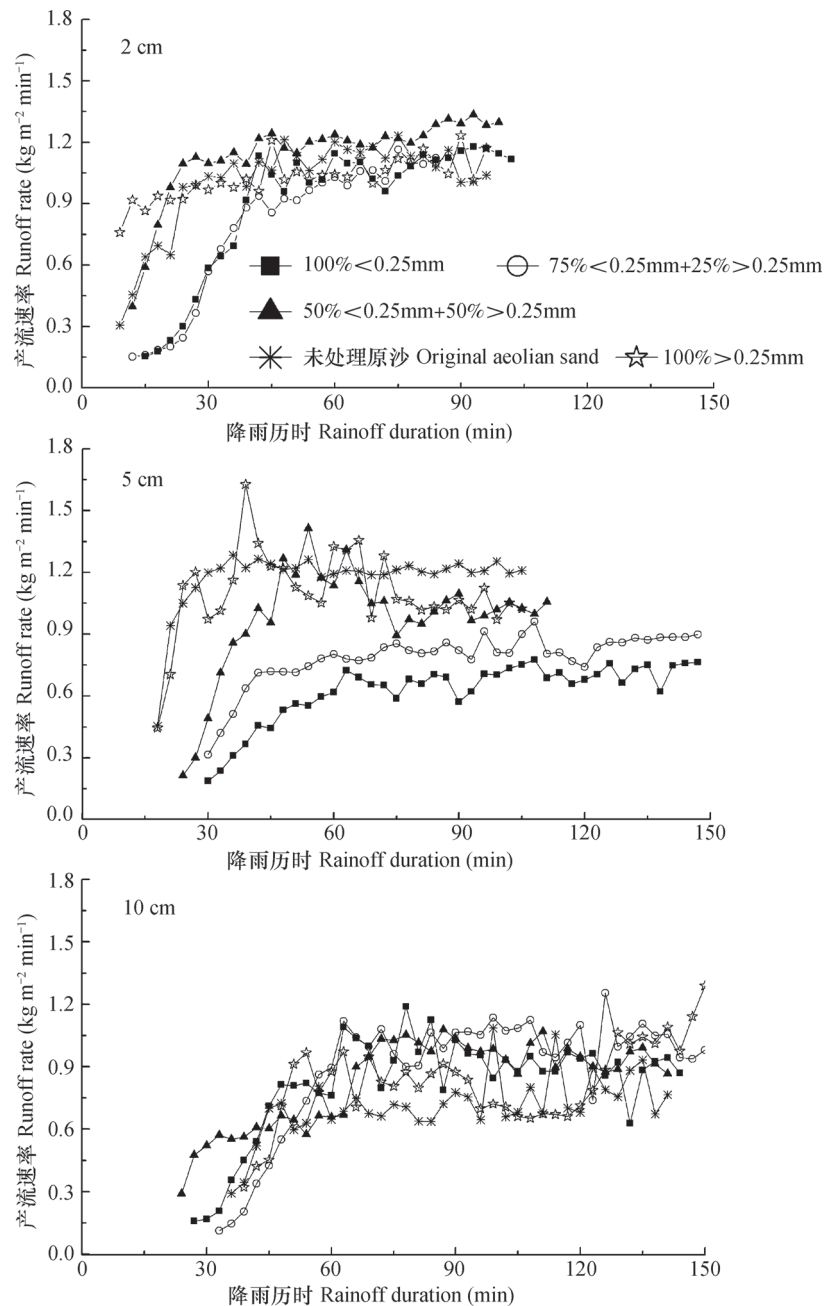


图3 相同覆沙厚度不同粒径组成下的产流速率

Fig. 3 Runoff yield rate on loess slopes the same in thickness of sand cover, but different in sand particle size composition

细粒径 (a和b) 的产流速率。10 cm覆沙厚度的坡面, 在不同覆沙粒径条件下, 产流速率在产流增加阶段的差异小于产流准稳定阶段, 在准稳定阶段, 覆沙粒径不同的坡面产流速率交织分布, 且波动较大, 整个降雨过程随粒径变化产流速率并无明显规律。

降雨60 min累积产流量进行的方差分析显示, 厚度、粒径及厚度与粒径的交互作用对降雨60 min累积产流量均有显著影响 ( $p < 0.05$ )。各因子对其变化的贡献率为厚度 > 粒径 > 不可控因子 > 厚度与粒径的交互作用, 分别为48.94%、24.27%、13.86%和13.12% (表2)。

### 2.3 不同沙层厚度和粒径组成下的产沙过程

无覆沙黄土坡面土壤侵蚀速率明显小于覆沙坡面侵蚀速率, 随覆沙厚度增加侵蚀速率呈增加趋

势, 整体表现为 $2\text{ cm} < 5\text{ cm} < 10\text{ cm}$  (图4)。坡面侵蚀速率在次降雨过程中呈先增大、到达峰值后又减小的变化模式。相对于2 cm覆沙厚度, 5 cm和10 cm覆沙厚度的坡面侵蚀开始较晚, 但其侵蚀速率在短时间内迅速增加达到峰值, 之后其侵蚀速率明显高于2 cm覆沙厚度的。覆沙粒径较细 (a和b) 时, 2 cm覆沙厚度的侵蚀速率稍低于5 cm覆沙厚度的, 但相差不大; 10 cm覆沙厚度侵蚀速率在产流开始后很短时间内迅速增大且明显大于2 cm和5 cm覆沙厚度时侵蚀速率。覆沙粒径变粗 (c, d和e), 2 cm覆沙厚度时的侵蚀速率明显小于5 cm和10 cm覆沙厚度的, 5 cm和10 cm覆沙厚度侵蚀速率的峰值基本接近, 但达到峰值后, 10 cm覆沙厚度侵蚀速率相对5 cm覆沙厚度减小较慢。各厚度和粒径下的侵蚀速率最终均有与一元坡面侵蚀速率一致

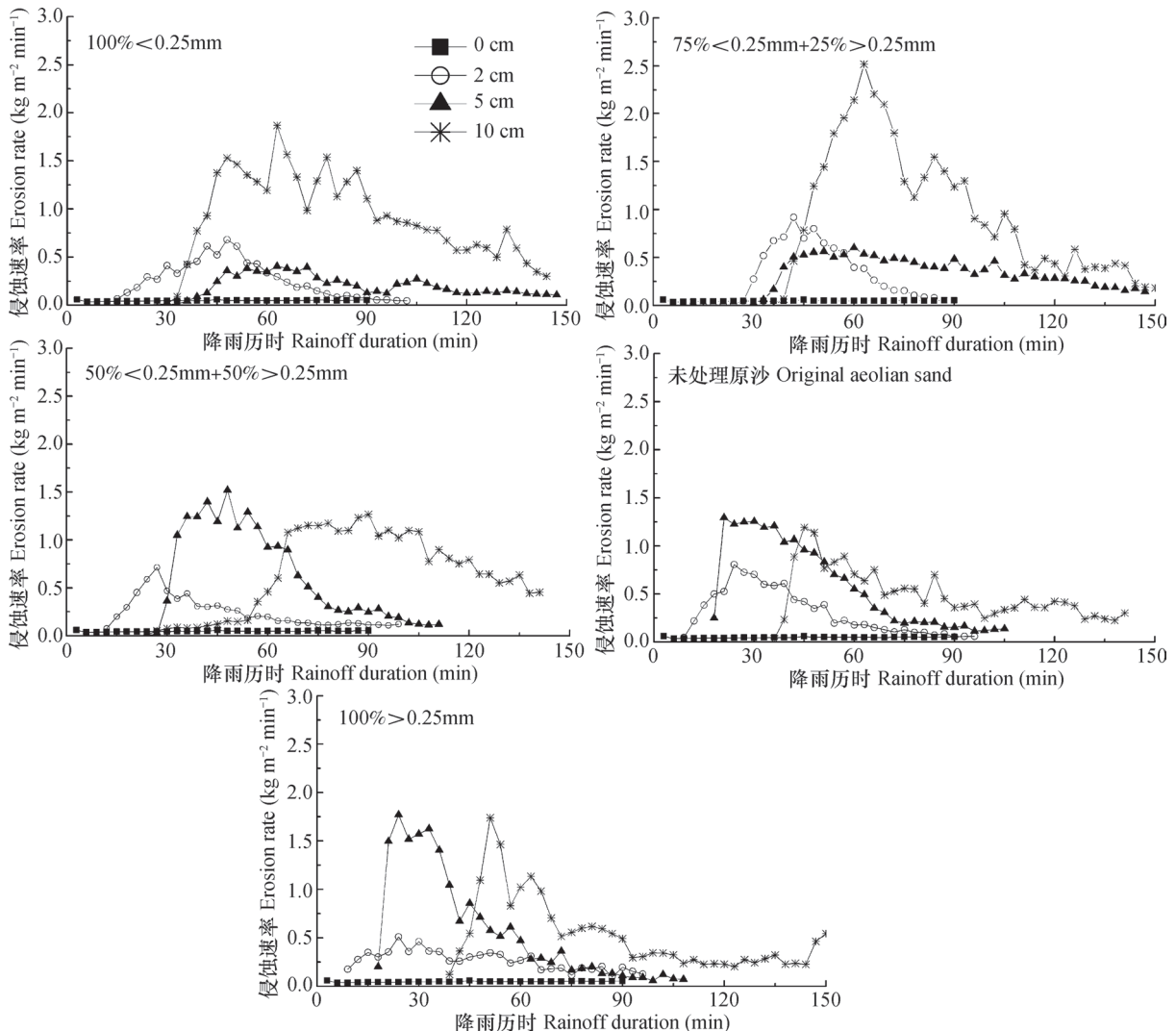


图4 相同粒径不同覆沙厚度下的侵蚀速率

Fig. 4 Erosion rate on loess slopes the same in sand particle size composition, but different in thickness of sand cover

的趋势，随覆沙厚度增加，达到与一元坡面侵蚀速率一致所需时间明显延长。

2 cm和5 cm覆沙厚度时，随覆沙粒径变粗，侵蚀开始时间和侵蚀速率达到峰值的时间均提前，10 cm覆沙厚度随粒径组成变化无明显规律（图5）。2 cm覆沙厚度侵蚀开始阶段，细粒径覆沙坡面侵蚀速率明显小于粗粒径覆沙坡面。随着降雨的进行，细粒径覆沙坡面侵蚀速率逐渐增大，且大于粗粒径覆沙坡面侵蚀速率；各粒径组成在降雨70 min后，侵蚀速率基本相同。5 cm覆沙厚度在降雨约60 min

之前，粗粒径覆沙坡面侵蚀速率大于细粒径覆沙坡面侵蚀速率，各粒径组成在降雨90 min后，侵蚀速率趋于稳定，但较细覆沙坡面（a和b）的侵蚀速率稍高于其他粒径组成。10 cm覆沙厚度坡面侵蚀速率随粒径变化无明显规律，各粒径组成在降雨120 min以后，侵蚀速率开始相近并趋于稳定。覆沙厚度越大，降雨过程中的侵蚀速率波动越明显。

降雨60 min累积侵蚀量的方差分析结果显示，厚度、粒径及厚度与粒径的交互作用对降雨60 min累积侵蚀量的变化均有显著影响（ $p < 0.05$ ），厚

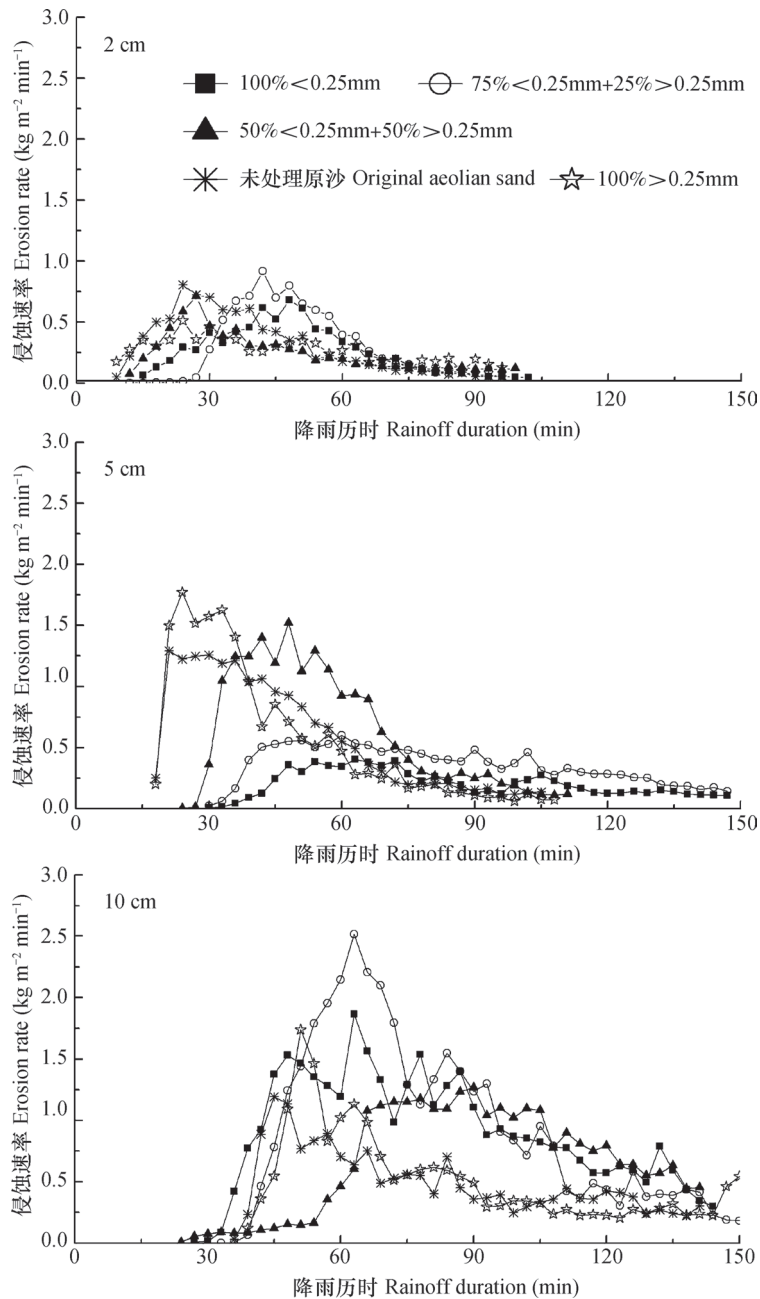


图5 相同厚度不同粒径组成下的侵蚀速率

Fig. 5 Erosion rate on loess slopes the same in thickness of sand cover, but different in sand particle size composition

度、粒径、二者交互作用及不可控因子对60 min累积侵蚀量变化的贡献率分别为13.53%、11.96%、42.45%和32.06%（表2）。

### 3 讨 论

#### 3.1 沙层厚度和粒径组成对初始产流时间的影响

无覆沙黄土坡面黏粒含量高、容重大、导水率小，降雨时易形成结皮，属超渗产流，初始产流时间很短<sup>[17-18]</sup>。覆沙坡面沙层入渗明显大于黄土层，降雨过程中沙层入渗快，存储雨水，延缓产流，导致产流时间延长。随覆沙厚度增加，需湿润沙层的水量和沙层蓄水总量均增加，降雨初期水分垂直到达黄土层时间延长，因此延长了产流时间。试验结果与汤珊珊等<sup>[12]</sup>研究的结果一致。在2 cm和5 cm覆沙厚度条件下，随覆沙粒径变粗，大孔隙增加，水流通道易形成，沙层蓄水沿水流通道的优先路径流出，因此产流时间提前。10 cm覆沙厚度粒径较细的a、b和c，产流时间与5 cm覆沙厚度相同粒径组成的产流速率相差不大，可能是因为10 cm覆沙厚度较厚，a、b和c粒径组成存在较多的细颗粒，垂直入渗过程中淋溶使细颗粒垂直迁移，导致沙层孔隙堵塞，雨水不能很快渗入到沙土界面，在沙土表层形成少量径流。试验过程中也发现这一现象，表层径流使初始产流时间相对提前，且与5 cm覆沙厚度的初始产流时间相差不大。覆沙粒径较粗（d和e）时，初始产流时间为 $e > d$ ，且初始产流时间较5 cm覆沙厚度的明显延长，可能是因为覆沙厚度对初始产流时间起了较明显作用。沙层较厚且粒径较粗时，降雨垂直入渗的淋溶作用不足以堵塞孔隙，垂直入渗的路径长，湿润消耗雨水多，不能形成地表径流，而形成的是沙土界面流，属于渗流范围。渗流流速相对于地表径流很慢，且需要达到一定的水力坡度后才能产流，因此初始产流时间明显延长。此外，随厚度增加，水分在沙层中的运移过程更为复杂，偶然性和随机性增加，可能导致出现10 cm覆沙厚度下c粒径组成时初始产流时间明显小于其他粒径组成。

#### 3.2 沙层厚度和粒径组成对产流的影响

相对于黄土坡面，覆沙坡面沙层颗粒吸附及渗流流速缓慢延长了入渗黄土层的时间，减少了径流量；覆沙坡面以产生沙土界面流为主，属渗流，径流从坡脚沙层坍塌处流出，部分存储在沙层中，随

沙层溯源侵蚀而释放，典型沙盖黄土坡面产流过程为雨水垂直入渗—沙土界面潜流—沙层边缘渗流—地表径流，不同于黄土坡面的超渗产流，因此，覆沙黄土坡面较黄土坡面可明显降低产流速率。覆沙厚度和沙层粒径组成对坡面产流的影响存在交互作用，覆沙厚度较薄或较厚时，沙层粒径变化对产流的影响不明显。覆沙较薄坡面（如2 cm）产流初始阶段，粗粒径组成因孔隙大，垂直入渗很快到达沙土界面，易形成沙土界面流，水流易流出且产流速率大。相反，细粒径组成坡面不易快速产流，且流速不大，部分雨水蓄积在沙层，但随降雨的进行，薄覆沙坡面在沙层的蓄水达到饱和，开始全坡面产流，沙粒组成变化对产流速率已无明显影响，不同粒径组成坡面产流速率较为接近。覆沙较厚坡面（如10 cm），覆沙厚度对产流的影响掩盖了粒径组成变化对产流的影响，导致整个降雨过程中不同粒径组成坡面产流速率相差不大，且无明显规律性。粒径组成变化对5 cm覆沙厚度坡面产流有明显影响，降雨过程中粗粒径坡面产流速率大于细粒径组成坡面产流速率。说明沙层粒径组成对不同厚度覆沙坡面产流的影响可能存在临界下线和临界上线，较临界下线薄或者较临界上线厚的覆沙坡面，粒径组成变化对产流速率的影响均不能被完全体现出来。

不同覆沙厚度和粒径组成下产流特征及方式的变化直接影响产流速率。对于薄覆沙坡面，产流早且沙层易饱和导致全坡面蓄满产流，能维持较高的产流速率；对于厚覆沙坡面，雨水入渗，主要形成沙土界面流，产流较晚，产流开始是从坡脚沙土界面处渗出，部分雨水存储在沙层，但随着侵蚀的开始，沙层坍塌、溯源后退，出露的黄土坡面产流快且量大，加之沙层蓄水的释放，也能够维持较高的产流速率，这种情况可能弱化了覆沙厚度对产流速率的影响。对于粒径组成的变化，粗粒径覆沙坡面雨水容易下渗、出流，沙层的坍塌后退较快，能够维持较高产流速率。细粒径覆沙坡面尽管入渗慢，但能产生部分的地表径流，与沙层渗流相结合，也能维持较高的产流速率，从而弱化了粒径组成变化对于产流速率的影响。覆沙厚度和粒径组成及二者交互作用决定沙层蓄水量、产流方式和产流时间，各因子对产流量的贡献均较大且显著（表2）。此外，覆沙黄土坡面不同于无覆沙黄土坡面，沙层无黏结性，且能存贮一定的雨水，在湿润过程沙层基



质吸力变化不同于黏性土壤,在水力和本身重力作用下,坍塌或发生重力侵蚀具有偶然性或随机性,阻止或汇集径流,尤其覆沙较厚时更为明显,这使得产流速率变化的波动性比较大,甚至出现一些接近或者大于黄土坡面的产流速率的值。

### 3.3 沙层厚度和粒径组成对产沙的影响

黄土具有一定的结构和黏性,降雨过程中黄土坡面受雨滴击溅和径流冲刷,遵循溅蚀—片蚀—细沟侵蚀的过程,降雨侵蚀力和径流侵蚀力一方面要克服土壤之间的黏聚力,将土壤颗粒从土体中分离出来,另一方面要从坡面输移出已分离的土壤颗粒<sup>[19-20]</sup>。覆沙黄土坡面的沙层颗粒之间基本无黏性,大孔隙多,降雨在沙层垂直入渗形成沙土界面流,基本不形成或形成少量地表径流。在坡脚沙层和黄土层接触边缘,沙土界面流只要满足沙粒启动条件,就能发生侵蚀,径流挟带沙粒输移出坡面。此外沙层自然休止角小,内部无黏聚力,在沙土界面流的作用下易侵蚀。典型覆沙坡面遵循垂直入渗—潜流—渗流侵蚀—坍塌的侵蚀过程,这与张丽萍等<sup>[9]</sup>的野外试验结果一致。沙层越厚越易发生坍塌,为径流输移提供了大量的沙源,尽管覆沙黄土坡面产流晚,产流量小,但其侵蚀量大于无覆沙黄土坡面,且随覆沙厚度增加,侵蚀量明显增大。方差分析显示厚度与粒径组成对60 min累积侵蚀量变化的贡献率较低,而交互作用和误差项的贡献明显较大(表2),首先是因为覆沙厚的坡面产流晚,侵蚀时间短,沙层溯源侵蚀量相对小,不同降雨历时不同因子的贡献可能存在差异;其次是泥沙的输移受到径流影响明显,而在方差分析时未考虑径流的作用,径流贡献被归到了误差项。此外,沙层无黏性,厚度与粒径不同组合下的摩擦力、内应力、颗粒成拱、渗流力及自身重力变化复杂,沙层侵蚀具有随机性和不确定性。

覆沙厚度和粒径组成变化导致坡面产流方式和侵蚀方式变化,直接影响侵蚀速率的变化。薄覆沙坡面是蓄满产流,侵蚀动力以径流为主,且易发生全坡面侵蚀。随覆沙厚度增加,沙层本身重力对于沙层坍塌贡献增大,产流以沙层前缘出渗和释放坍塌体蓄存雨水为主,侵蚀以沙层坍塌后退溯源侵蚀为主。粗粒径覆沙坡面,易形成沙土界面流,侵蚀以沙层坍塌后退溯源侵蚀为主,侵蚀速率增加较快。此外,粗覆沙坡面,雨水下渗的淋溶作用导致大量细颗粒在沙层中垂向迁移,易在沙土界面形成

一个泥浆层,泥浆层极有利于泥沙的输移。沙土界面形成泥浆层的现象在覆沙较厚或较薄的坡面表现均不明显,沙层较薄,易于蓄满而导致全坡面产流和侵蚀,而沙层过厚,垂直淋溶的细颗粒物不易到达沙土界面,都难以在沙土界面形成泥浆层,这可能是覆沙层粒径组成变化对产流产沙的影响在5 cm覆沙厚度下比在2 cm和10 cm覆沙厚度下更为明显的主要原因。对于细粒径覆沙坡面,降雨后难以很快形成沙土界面流,而形成的表层径流量少且较晚,使得坍塌后退的溯源侵蚀和表层径流的侵蚀均不强烈,因此,侵蚀开始阶段,细粒径覆沙坡面的侵蚀速率小于粗粒径覆沙坡面。随着降雨的进行,粗粒径覆沙坡面的沙层后退,泥沙输移距离明显加长,侵蚀速率开始降低;相反,细粒径覆沙坡面的沙土界面流开始加强,沙面形成一些小的细沟,坡面径流的汇集和沙层中水向细沟中释放,导致侵蚀力加强,细颗粒又容易被携带,加之沙层蓄水增多,孔隙水压增大,渗流侵蚀增大,沙层稳定性减弱,因此侵蚀量开始增加,并高于粗粒径覆沙坡面的侵蚀量。降雨后期,坡面覆沙被侵蚀,覆沙厚度和沙层粒径组成对侵蚀速率的影响基本消失,坡面侵蚀逐渐趋于一致。次降雨过程中,10 cm覆沙厚度坡面侵蚀速率与产流速率相似,对沙粒粒径组成变化的响应不明显,这主要是因为10 cm覆沙厚度改变了产流方式和侵蚀方式,加之沙层厚度增加,重力作用明显且具有偶然性和随机性,沙层前缘随机坍塌直接影响其沙源供应,导致侵蚀出现明显的波动性和不确定性。这也说明不同覆沙厚度下沙层粒径组成对于覆沙坡面侵蚀影响的不一致,二者存在明显交互作用。覆沙太薄或太厚时,粒径组成变化的作用体现不明显。粒径组成对于坡面侵蚀的影响存在一个合理的覆沙厚度范围。

总之,片沙覆盖黄土坡面是水蚀风蚀交错带存在的一种特殊的沙土二元结构坡面,其产流产沙过程和机理与一元结构坡面明显不同。结合已有研究<sup>[9-14]</sup>和本次试验结果发现,片沙覆盖黄土坡面产流方式多样且随厚度变化而变化,沙层蓄满产流、沙土界面流(渗流)及沙层溯源侵蚀后出露黄土坡面上的地表径流都可能单独或同时发生,产流过程及径流动力机制比较复杂,产流速率及产流量在不同条件下存在多变性;同样片沙覆盖坡面产沙机理尚不明确,降雨过程中,沙层的正压力、摩擦力、有效应力、渗流力和孔隙水压力等对沙层共

同作用, 渗流侵蚀、径流侵蚀、重力坍塌、沙层溯源侵蚀相互交织发生, 侵蚀动力系统复杂多样, 产沙速率的规律性较差, 利用现有一元结构坡面的侵蚀理论很难完全解释。此外, 覆沙层基本无黏性, 相当于颗粒物质体系, 研究发现, 尽管单个颗粒(沙粒)是以固体存在的, 但颗粒物质的集体行为表明, 它具有独特的运动规律, 能形成颗粒流<sup>[21-23]</sup>, 颗粒流不同于固体、液体和气体, 用经典力学和流体力学很难解释。颗粒体系中颗粒之间的摩擦力和成拱主导其运动性质, 而摩擦力和成拱具有很大的不确定性; 颗粒体系中应力分布不均, 存在力链, 力链或拱上颗粒的一些局部微小变动都可能引起整个颗粒体系的崩塌<sup>[24]</sup>。针对片沙覆盖黄土坡面侵蚀而言, 干沙时沙粒之间无黏附力, 存在摩擦力和颗粒拱, 随降雨进行沙粒之间能够形成液桥黏附力, 液桥黏附力随饱和度的增加, 先增大, 后减小, 饱和度大于100%时, 颗粒间黏附力又消失<sup>[25]</sup>, 同时摩擦力和颗粒拱也相应发生了变化, 降雨湿润过程沙层受力体系变化相当复杂; 降雨导致产流后, 发生侵蚀, 产生固-液两相流体, 它涉及的问题要比单纯的流体和颗粒流更为复杂, 包含众多相互作用的非线性系统, 在降雨条件相同时, 沙层前缘不同位置引发侵蚀的概率不一致, 因此, 片沙覆盖黄土坡面产流产沙过程是复杂的非线性系统, 具有很大的不确定性, 机理比较复杂。本研究从现象上描述了覆沙厚度和沙层粒径组成对于片沙覆盖黄土坡面产流产沙过程的影响, 对比了不同厚度和粒径组成下产流产沙特征的差异, 但因观测手段限制, 未涉及覆沙厚度和粒径组成对沙层内部摩擦力、有效内应力、孔隙水压力及渗流力等作用力的影响, 导致无法系统揭示片沙覆盖黄土坡面侵蚀过程的动力学机制。未来研究应利用先进观测手段结合仿真模拟技术, 从沙层内部水分运动、沙层颗粒体系受力特征及径流动力特征等方面入手, 系统分析片沙覆盖黄土坡面侵蚀过程的动力变化特征, 揭示其动力学机制。

## 4 结 论

覆沙黄土坡面较无覆沙黄土坡面能明显延长初始产流时间, 减少产流量, 增加侵蚀量。典型覆沙黄土坡面产流过程为雨水垂直入渗—沙土界面滞流—沙层边缘渗流—地表径流, 产沙过程为沙层边

缘渗流侵蚀—沙层坍塌重力侵蚀—地表径流输移, 明显不同于无覆沙黄土坡面的超渗产流方式及溅蚀—片蚀—细沟侵蚀的侵蚀发展过程。覆沙厚度影响覆沙坡面产流产沙方式, 随厚度增加产流量减少, 侵蚀量增大。在不同覆沙厚度下, 覆沙粒径组成对坡面产流产沙的影响存在差异。覆沙厚度、粒径组成及厚度与粒径交互作用对初始产流时间、60 min累积产流量和累积产沙量均具有显著影响。初始产流时间和60 min累积产流量的变化主要受覆沙厚度变化的控制, 而对60 min累积产沙量变化贡献较大的为覆沙厚度与粒径交互作用和不可控因素, 这也充分说明覆沙黄土坡面产沙影响因子的复杂性和不确定性。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 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. 陕西杨凌: 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993: 2—15  
Tang K L, Hou Q C, Wang B K, et al. The environment background and administration way of wind-water erosion crisscross region and shenmu experimental area on the Loess Plateau (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Memoir of NISWC, Academia Sinica and Ministry of Water Resources, 1993: 2—15
- [ 2 ] 查轩, 唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究. 自然资源学报, 2000, 15(1): 97—100  
Cha X, Tang K L. Study on comprehensive control model of small watershed eco-environment in water and wind crisscrossed erosion zone (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2000, 15(1): 97—100
- [ 3 ] 唐克丽. 黄土高原生态环境建设关键性问题的研讨. 水土保持通报, 1998, 18(1): 2—8, 26  
Tang K L. Discussion on key problem of eco-environment construction on Loess Plateau (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1998, 18(1): 2—8, 26
- [ 4 ] 徐建华, 吕光圻, 甘枝茂. 黄河中游多沙粗沙区区域界定. 中国水利, 2000, 12: 37—38  
Xu J H, Lü G X, Gan Z M. Definition of coarse silt and silty area in the middle reach of Yellow River (In Chinese). China Water Resources, 2000, 12: 37—38
- [ 5 ] 田杏芳. 黄河中游地区开发建设项目新增水土流失研究. 南京: 河海大学, 2005  
Tian X F. Study on treatment direction of coarse sand area in middle reaches of Yellow River (In Chinese). Nanjing: Hohai University, 2005
- [ 6 ] 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
- Song Y, Liu L Y, Yan P. A review on complex erosion by wind and water research (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61 (1): 77—88
- [ 7 ] 史培军, 王静爱. 论风水两相作用地貌的特征及其发育过程. *内蒙古林学院学报*, 1986, 8 (2): 88—89
- Shi P J, Wang J A. The landform features and development of aeolian-fluvial interactions (In Chinese). *Journal of Inner Magnolia Forestry College*, 1986, 8 (2): 88—89
- [ 8 ] 吴成基, 甘枝茂, 孙虎, 等. 黄河中游多沙粗沙区亚区划分. *人民黄河*, 1999, 21 (12): 22—24
- Wu C J, Gan Z M, Sun H, et al. Division of sub-regions of coarse silt and silty area in the middle reach of Yellow River (In Chinese). *Yellow River*, 1999, 21 (12): 22—24
- [ 9 ] 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): 40—45
- Zhang L P, Tang K L, Zhang P C. Soil water erosion processes in loess hilly-gully region covered with sheet sand (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5 (1): 40—45
- [ 10 ] 张丽萍, 倪含斌, 吴希媛. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同下垫面土壤水蚀特征实验研究. *水土保持研究*, 2005, 12 (5): 130—131
- Zhang L P, Ni H B, Wu X Y. Soil water erosion processes on sloping land with different material in the wind-water interaction zone in the Loess Plateau (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12 (5): 130—131
- [ 11 ] 惠振江. 陕北毛乌素沙地与黄土区过渡地带荒漠化研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2001
- Hui Z J. Desertification in the transition zone between Mowusu sandy land and loess hill region (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2001
- [ 12 ] 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
- Tang S S, Li Z B, Ren Z P, et al. Experimental study on the process of runoff and sediment yield on sand-covered slope (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (5): 25—28
- [ 13 ] 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
- Tang S S, Li P, Ren Z P, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1): 39—47
- [ 14 ] 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
- [ 15 ] 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
- Zheng F L, Zhao J. Introduction of the artificial rainfall simulation and rain markers (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11 (4): 177—178
- [ 16 ] 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
- Wu X R, Zhang F B, Wang Z L. Variation of sand and loess properties of binary structure profile in hilly region covered by sand of the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (6): 190—193
- [ 17 ] 卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究. *土壤学报*, 2009, 46 (1): 16—23
- Bu C F, Cai Q G, Zhang X C, et al. Mechanism and erosion effect of development of soil crust of loess (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (1): 16—23
- [ 18 ] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌, 等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究. *水土保持学报*, 2005, 19 (2): 5—8
- Chen H S, Shao M A, Zhang X C, et al. Field experiment on hillslope rainfall infiltration and runoff under simulated rainfall conditions (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (2): 5—8
- [ 19 ] 田凤霞, 王占礼, 牛振华, 等. 黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究. *干旱地区农业研究*, 2005, 23 (6): 145—150
- Tian F X, Wang Z L, Niu Z H, et al. Experimental research on soil erosion process in loess hill slope (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23 (6): 145—150
- [ 20 ] 王文龙, 雷阿林. 黄土性质与土壤侵蚀的关系初探. *水土保持通报*, 1998, 18 (7): 81—83
- Wang W L, Lei A L. Relations between loess properties and soil erosion (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, 18 (7): 81—83
- [ 21 ] 陆坤权, 刘寄星. 颗粒物(上). *物理*, 2004, 33 (9): 629—635
- Lu K Q, Liu J X. Static and dynamic properties of granular matter (I) (In Chinese). *Physics*, 2004, 33 (9): 629—635
- [ 22 ] 陆坤权, 刘寄星. 颗粒物(下). *物理*, 2004, 33

- (10) : 713—721
- Lu K Q, Liu J X. Static and dynamic properties of granular matter ( II ) ( In Chinese ) . *Physics*, 2004, 33 ( 10 ) : 713—721
- [ 23 ] 栗苏文, 夏建新, 曹斌. 颗粒流动特殊现象探析. 泥沙研究, 2005, 127 ( 6 ) : 65—69
- Li S W, Xia J X, Cao B. Review of special phenomena in granular flow ( In Chinese ) . *Journal of Sediment Research*, 2005, 127 ( 6 ) : 65—69
- [ 24 ] 麻土华, 郑爱平, 李长江. 降雨型滑坡的机理及其启示. 科技通报, 2014, 30 ( 1 ) : 39—43, 71
- Ma T H, Zheng A P, Li C J. Mechanism of rainfall-induced landslides and its implications to landslide prediction ( In Chinese ) . *Bulletin of Science and Technology*, 2014, 30 ( 1 ) : 39—43, 71
- [ 25 ] 孙其诚, 金峰. 颗粒物质的多尺度结构及其研究框架. 物理, 2009, 38 ( 4 ) : 225—232
- Sun Q C, Jin F. The multiscale structure of granular matter and its mechanics ( In Chinese ) . *Physics*, 2009, 38 ( 4 ) : 225—232

## Effects of Thickness and Particle Size Composition of Overlying Sand Layer on Runoff and Sediment Yield on Sand-covered Loess Slopes

XIE Linyu<sup>1</sup> BAI Yujie<sup>1</sup> ZHANG Fengbao<sup>1, 2†</sup> YANG Mingyi<sup>1, 2</sup> LI Zhanbin<sup>1, 2, 3</sup>

( 1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China )

( 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China )

( 3 Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China )

**Abstract** 【Objective】 The region of loess slopes covered with sporadic aeolian sand is the most serious erosion-stricken area in the aeolian-water erosion interlaced zone of the Loess Plateau. This project is oriented to study characteristics of the soil erosion in this region in an attempt to provide some principal theory for prediction and control of soil erosion in the aeolian-water erosion interlaced zone. Observations in this special region found that aeolian sand-covered loess slopes were different in runoff production pattern and erosion process from ordinary loess slopes. So far, a little has been reported about studies on soil erosion on this special type of slopes. 【Method】 An indoor experiment with simulated rainfalls on soil erosion on sand-covered loess slopes was carried out. The experiment was designed to have only one rainfall intensity ( 90 mm h<sup>-1</sup> ), one slope gradient ( 15° ), three levels of thickness for overlying aeolian sand ( 2 cm, 5 cm and 10 cm ) and five patterns of particle size composition ( 100% < 0.25 mm, 75% < 0.25 mm + 25% > 0.25 mm, 50% < 0.25 mm + 50% > 0.25 mm, original aeolian sand and 100% > 0.25 mm ). 【Result】 Results show that overlying aeolian sand layers delayed the initiation of runoff and reduced the generation rate and volume of runoff, but increased the yielding rate and volume of sediment on loess slopes. The initiation of runoff on slopes covered with 2 cm, 5 cm and 10 cm thick of aeolian sand was 6 ~ 10 times, 12 ~ 20 times and 16 ~ 26 times later than that on the ordinary loess slope, respectively. Thickness of the aeolian sand layer is the main factor affecting delayed runoff and sediment yield. The thicker the overlying sand layer, the later the initiation of runoff, the lower the runoff rate and runoff volume and the higher the yielding rate and volume of sediment yield. During the rainfall process, runoff and sediment fluctuated sharply in rate and volume and the fluctuation intensified with the aeolian sand layer increasing in thickness. The effect of particle size composition of the sand layer on runoff and sediment yield varied with thickness of the sand layer. On slopes covered with a sand layer 2 cm in thickness, runoff and sediment yield tended to increase with the sand layer increasing in particle size during the initial period of rainfall, but no such a tendency was observed



during the late period of rainfall. On slopes covered with a sand layer 5 cm in thickness, runoff increased in rate with the sand layer increasing particle size. The slopes covered with coarse sand was higher in erosion rate than the slopes covered with fine sand during the initial period of rainfall, and it went reversely in the late period of rainfall. On slopes covered with a sand layer 10 cm in thickness, runoff and sediment yield did not vary much with particle size composition of the sand layer. There might be a reasonable range of aeolian sand thickness in which the influence of particle size composition of the sand layer on runoff and sediment yield existed. In short, thickness, particle size composition and their interaction significantly ( $p < 0.05$ ) influence the initiation of runoff, 60 min runoff volume and 60-min sediment yield. 【Conclusion】 The runoff production process on aeolian sand-covered loess slopes goes as vertical infiltration of rainwater-flow at the interface between sand layer and loess layer-seepage at the toe of the sand layer-overland runoff, while the erosion process goes as seepage erosion at the toe of the sand layer-retrogressive collapse caused by gravity and flow-surface runoff transport, which are completely different from the pattern of runoff yield under excessive infiltration and the erosion development process of splash erosion-sheet erosion-rill erosion on bare loess slopes.

**Key words** Aeolian sand-covered loess slope; Aeolian sand thickness; Particle size composition; Runoff and sediment

(责任编辑: 陈荣府)