北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

沙盖黄土坡面产流产沙对坡长和覆沙厚度的响应

王庆妮 曹晓娟 刘颖 张风宝

Response of runoff and sediment production on sand-covered loess slopes to slope length and sand covering thickness

Wang Qingni, Cao Xiaojuan, Liu Ying, Zhang Fengbao

引用本文:
王庆妮, 曹晓娟, 刘颖, 张风宝. 沙盖黄土坡面产流产沙对坡长和覆沙厚度的响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(10):81–89. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240229
Wang Qingni, Cao Xiaojuan, Liu Ying, Zhang Fengbao. Response of runoff and sediment production on sand–covered loess slopes to slope length and sand covering thickness[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10):81–89. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240229

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240229

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征

Effects of different vegetation slope patterns on infiltration and characteristics of runoff and sediment production in the loess area of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 85–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190231

晋西黄土区径流含沙量随坡长变化的试验研究

Experimental study on the variation characteristics of runoff sediment concentration with slope length in the loess region of western Shanxi Province of northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 148–155. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220454

径流含沙量测定方法研究

A simple method for estimating runoff sediment concentration

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 155–162. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180246

昕水河流域“水文法”基准期降水输沙相关关系统计方法研究

Exploration on statistical methods for analyzing correlations between rainfall and sediment discharge in base period by hydrologic method in the Xinshui River Basin, Shanxi Province of northern China

北京林业大学学报, 2020, 42(11): 91–104. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190125

北洛河上游县域土地利用时空变化及其对水沙的影响

Spatiotemporal variation of land use in counties of the upper reaches of the Beiluo River and its impact on runoff and sediment

北京林业大学学报, 2024, 46(2): 95–104. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230121

风沙环境下防风挡沙墙复变作用规律的风洞模拟

Wind tunnel simulation of complex deformation law on retaining wall under aeolian sand environment

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 108–117. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200339

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240229

沙盖黄土坡面产流产沙对坡长和覆沙厚度的响应

王庆妮[1] 曹晓娟[2,3] 刘 颖[1] 张风宝[1,2]
(1. 西北农林科技大学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. 中水北方勘测设计研究有限责任公司，天津 300222)

摘要:【目的】沙盖黄土坡面是黄土高原水蚀风蚀交错区多动力综合作用下形成的特殊地貌单元，存在特殊侵蚀方式。研究该类坡面产流产沙过程对坡长和覆沙厚度的响应，可为该区内水土流失预防预报提供理论依据。**【方法】**基于室内模拟降雨试验，以未覆沙黄土坡面为对照，定量分析坡长(1 和 3 m)和覆沙厚度(2、5 和 10 cm)对坡面产流产沙变化的影响。**【结果】**(1)覆沙较未覆沙黄土坡面初始产流时间延长 3 ~ 30.72 倍，平均产流速率降低 25% ~ 84%，平均产沙速率增大 3.03 ~ 15.91 倍，含沙量增加 3.38 ~ 18.07 倍，且都随覆沙厚度增加而加强。(2)1 m 坡长 10 cm 覆沙对产流速率减少作用强烈，3 m 坡长平均产流速率在不同覆沙厚度下变化较小；不管是否覆沙，3 m 坡长平均产沙速率和含沙量明显高于 1 m 坡长。(3)降雨过程中，坡长和覆沙厚度的增加能够协同增强产流产沙过程的变异性，1 m 坡长未覆沙坡面瞬时产流速率高于覆沙，3 m 坡长较厚覆沙坡面产流产沙陡增陡降，有明显峰值，瞬时径流系数出现大于 1 的现象。(4)结构方程模型分析表明，坡长对产流速率影响最大(路径系数为 0.65)，覆沙厚度对产沙速率影响最大(路径系数为 0.71)，坡长通过产流以间接正效应(路径系数为 0.40)影响产沙。**【结论】**坡长增加了坡面产流产沙率，覆沙厚度减少了产流率，增加了产沙率。坡长和覆沙厚度协同增强了产流产沙过程的变异性，使得降雨过程中产流产沙模式发生了明显变化。

关键词：产流；产沙；坡长；覆沙厚度；含沙量
中图分类号：S714.7 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)10−0081−09
引文格式：王庆妮，曹晓娟，刘颖，等. 沙盖黄土坡面产流产沙对坡长和覆沙厚度的响应［J］. 北京林业大学学报，2024，46(10)：81−89. Wang Qingni, Cao Xiaojuan, Liu Ying, et al. Response of runoff and sediment production on sand-covered loess slopes to slope length and sand covering thickness［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 81−89.

Response of runoff and sediment production on sand-covered loess slopes to slope length and sand covering thickness

Wang Qingni[1] Cao Xiaojuan[2,3] Liu Ying[1] Zhang Fengbao[1,2]
(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China;
3. China Water Resources Beifang Investigation, Design & Research CO.LTD, Tianjin 300222, China)

Abstract: ［**Objective**］Aeolian sand-covered loess slope is a special geomorphic landscape with a unique erosion pattern formed by multi-dynamic forces within the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau. Objectives of this study are to investigate the response of runoff and sediment production processes to slope length and thickness of sand covering on the aeolian sand-covered loess slopes, which can provide essential explanation for preventing and predicting soil erosion in this region. ［**Method**］The quantitative

收稿日期: 2024−07−18 **修回日期:** 2024−08−27
基金项目: 内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2024JBGS0023)，国家重点研发计划项目(2022YFF1300805)，国家自然科学基金项目(U22A20613)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023HHZX001)。

第一作者: 王庆妮。主要研究方向：坡面土壤侵蚀。Email: 2892290643@qq.com 地址：712100 陕西省咸阳市杨凌区西农路 26 号西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室。
责任作者: 张风宝，博士，研究员。主要研究方向：土壤侵蚀过程机理。Email: fbzhang@nwsuaf.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

analysis was based on observations of runoff and sediment production in indoor simulated rainfall experiments with the slope length (between 1 and 3 m) and thickness of sand covering (2, 5 and 10 cm). The effects of slope length and thickness of sand covering were analysed against a control group without sand covering. [**Result**] (1) Compared with the loess slope without sand covering, the time to runoff generation on the sand-covered slope was significantly extended by 3 to 30.72 times, the average runoff rate was reduced by 21% to 84%, the average sediment yield rate was increased by 2.99 to 10.66 times, and the sediment concentration was increased by 3.38 to 18.07 times, all of which were intensified as the thickness of sand covering increased. (2) The 1 m slope with a 10 cm sand layer exhibited a significant effect on reducing the runoff rate, while the average runoff rate with a 3 m slope demonstrated minor variations among different thicknesses of sand covering. Whether covered by sands or not, the average sediment yield rate and sediment concentration from 3 m slope were significantly higher than those from the 1 m slope. (3) The increases in slope length and thickness of sand covering enhanced the variability of instantaneous runoff and sediment yields during rainfall events. The instantaneous runoff rate of 1 m slope without sand covering was found to be higher than that with sand covering during rainfall. Notably, both runoff and sediment yields from 3 m slopes with a thicker sand covering showed a distinct peak, and some instantaneous runoff coefficients exceeded 1 during the rainfall events. (4) The structural equation model revealed that the slope length had the greatest influence on runoff rate (path coefficient = 0.65), and the sand thickness had the greatest influence on sediment yield rate (path coefficient = 0.71). The slope length exhibited an indirect positive effect (path coefficient = 0.40) on sediment yield through runoff production. [**Conclusion**] The slope length increases both runoff and sediment yield rates, while the thickness of sand covering reduces the runoff rate and increases sediment yield rate. The synergy of slope length and thickness of sand covering enhances the variability of runoff and sediment production processes, which makes the runoff and sediment production more changeable during rainfall.

Key words: runoff production; sediment production; slope length; sand covering thickness; sediment concentration

黄土高原水蚀风蚀交错带是一个多动力综合作用区，水蚀和风蚀作用在时间上交替发生，空间上相互叠加，形成了风沙地貌、流水侵蚀地貌交错、嵌套的地表景观[1]。此外，该区域还受到冻融和重力侵蚀的影响，这些因素共同作用导致该区域的土壤侵蚀强度显著高于其北部的风蚀区和南部的水蚀区，形成了黄土高原上的一个侵蚀高值区[2−4]，也成为黄河粗泥沙的主要源区[5]。黄河中游沙盖黄土侵蚀亚区占整个多沙粗沙区的 16.7%，该亚区内以风水相互作用形成的片沙覆盖黄土坡面为主，此类坡面呈现典型的沙土二元结构[6]。沙层和黄土层土壤性质相差较大，有明显的沙土界面，存在特殊的产流产沙模式[7−8]。目前针对沙盖黄土坡面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，对其进行系统探究，对深入理解该区域土壤侵蚀机制、演变过程及其对环境变化的响应具有重要意义。

张丽萍等[7−8]最早基于原位模拟降雨试验在六道沟小流域内开展了沙盖黄土坡面土壤侵蚀特征的研究，发现该类型坡面在一定程度上能够减小地表产流量，小雨强下无径流产生，一旦产生径流，则含沙量很大，明显不同于黄土坡面产流产沙过程。惠振江[9]定性描述了沙盖黄土坡面产流产沙过程特征，并提出沙土界面流和沙界面流侵蚀的概念。在野外自然条件下，由于水蚀和风蚀耦合作用及地形地貌、植被等的差异，沙盖黄土坡面的覆沙厚度从毫米级到米级不等[5−6]。Xu 等[10]发现沙层厚度对沙盖黄土坡面产流和产沙有一定影响，但该研究沙层较薄（≤ 1.5 cm），难以代表典型沙盖黄土坡面。Zhang 等[11−12]基于室内模拟降雨试验系统分析了覆沙厚度（0.5、2、5、10、15、20 和 25 cm）、坡度（18%、27%、36%、47% 和 58%）及二者交互作用对沙盖黄土坡面产流产沙过程及坡面形态演化的影响，发现沙层能够推迟产流时间，减少产流量，增加产沙量，增强降雨过程产流产沙的变异性；较薄沙层（小于 2 cm）的产流产沙模式与黄土坡面相似，但随覆沙厚度和坡度增加，沙盖黄土坡面产流产沙模式发生了质的变化，且存在临界覆沙厚度（5 ~ 10 cm）和临界坡度（47% ~ 58%）；同时发现较厚覆沙坡面降雨过程中瞬时径流系数出现大于 1 的现象（部分试验甚至大于 2）。此外，谢林妤等[13]、曹晓娟等[14]发现沙层粒径组成变化

对产流产沙过程影响显著，定量分析了沙层厚度、粒径组成及二者交互作用对产流产沙的贡献。Ren 等[15]发现较薄的覆沙能够加速细沟的形成与发展，进而增加侵蚀。也有学者从覆沙方式、覆沙坡面侵蚀动力参数变化及侵蚀泥沙粒径等方面对沙盖黄土坡面土壤侵蚀过程进行了研究[16−19]。总之，以上研究充分说明沙盖黄土坡面沙层显著改变了坡面产流产沙模式，各影响因子对沙盖黄土坡面侵蚀过程的影响明显不同于黄土坡面。沙盖黄土坡面产流产沙模式及对各影响因子的响应、过程及内在机理的研究还有待进一步深入。

坡长是影响坡面土壤侵蚀的主要因子，目前针对单一土壤一元结构坡面土壤侵蚀坡长效应的研究较多，且取得了大量成果[20−21]。然而，沙盖黄土坡面呈典型的沙土二元结构，且覆沙层薄厚不一，其侵蚀过程对坡长的响应与单一土壤一元结构坡面可能存在差异。同时，坡长与覆沙厚度可能存在交互作用，影响侵蚀产沙过程，但目前这方面的研究还鲜有报道。鉴于此，本研究拟采用室内人工模拟降雨试验，探究坡长对不同覆沙厚度沙盖黄土坡面产流产沙的影响，揭示坡长和覆沙厚度对沙盖黄土坡面土壤侵蚀的作用途径及机理。该研究有助于深入理解沙盖黄土区乃至整个水蚀风蚀交错带坡面土壤侵蚀特征，并为水蚀风蚀交错带水土流失防治提供基础数据和理论支撑。

1　材料与方法

1.1　试验设计

采用室内人工模拟降雨试验，基于实地调查、前人研究结果及试验执行的可行性[11−12,22]，试验设置了 2 个坡长（1 和 3 m）、3 个覆沙厚度（2、5 和 10 cm）、1 个雨强（1.5 mm/min）和 1 个坡度（27%），以未覆沙的黄土坡面为对照。模拟降雨试验中使用的金属土槽尺寸为 3.0 m × 1.0 m × 0.8 m 和 1.0 m × 1.0 m × 0.8 m。为确保降雨过程中沙层侵蚀泥沙能顺利流出，土槽下端底部到集水槽出口的深度设为 0.3 m。土槽底部打孔径为 2 mm、间距为 10 cm 的孔，以保证良好的渗透。试验设置重复通常可以确保测试结果的可靠性，并准确显示不同处理之间的差异。但对处理间差异比较明显的试验，重复之间的差异性比各种处理之间的差异更小[23]，是否设置重复对处理测量变量的变化趋势影响较小。因此，考虑到物力财力及处理差异较大，本试验未设置重复。

1.2　土槽装土

试验所用覆沙和黄土取自黄土高原水蚀风蚀交错带六道沟小流域（38°46′ ~ 38°51′N，110°21′ ~ 110°23′E），该小流域具有典型的沙盖黄土地貌特征[8]，属典型半干旱大陆性气候，年平均气温 8.9 ℃，年平均降水量 442.7 mm，其中 76.3% 为 6—9 月间的高强度暴雨。土壤侵蚀有明显的季节性变化，每年 6—9 月以水蚀为主，冬春季以风蚀为主，小流域内存在大量片沙覆盖黄土坡面。

基于调查，选取六道沟流域一典型剖面的老黄土作为下伏黄土，剖面附近沙丘的风沙土作为覆盖沙层，采样点老黄土和风沙土的物理特性如表 1 所示。剔除黄土中的植物根系及石块等杂物，过 4.0 mm 的筛网，使其保持合理数量的团聚体，将黄土的含水量调节至约 10%，并充分混合。根据野外实测，黄土层土壤容重控制在 1.45 g/cm^3 左右（表 1）。土槽装土前，先在底部铺上纱布，然后装 5 cm 的天然河道砂（粒径小于 3 mm），河道砂上再铺上纱布，在纱布上填装 25 cm 的黄土。为便于控制土壤容重和保持土层均一性，25 cm 黄土分 5 层填装，每层 5 cm，在填充上一层之前，轻轻刮毛下层黄土的表面，以减少层之间的不连续性，为防止边壁效应，尽量压实土槽四周。对最上层黄土表层压实刮平，将风干的沙按设置的厚度平铺至黄土层表面，对风积沙层的表面进行平整处理，以减少表面粗糙度的影响。为防止沙层滑塌，在集水槽处将覆沙层末端处理成坡度小于风沙休止角的斜面。在模拟降雨时，将准备好的土槽坡度调整为 27%。

1.3　模拟降雨

人工模拟降雨在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人工模拟降雨大厅的侧喷区进行，模拟降雨均匀度高于 80%，并表现出与自然降雨相似的雨滴大小和分布。本研究设计雨强为 90 mm/h，降雨开始前进行雨强率定，用遮雨布盖住土槽并在土槽四周均匀布

表 1　采样点黄土与沙的物理性质

Tab. 1　Physical properties of loess soil and sand at the sampling sites

材料类型 Material type	粒径组成 Particle size composition/%			土壤容重 Soil bulk density/(g·cm^{-3})	孔隙度 Porosity/%	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/(mm·min^{-1})
	砂粒 Sand（0.05 ~ 2 mm）	粉粒 Silt（0.002 ~ 0.05 mm）	黏粒 Clay（< 0.002 mm）			
沙 Sand	95.27 ± 3.06	3.73 ± 1.70	1.00 ± 0.88	1.60 ± 0.04	39.60 ± 2.40	1.40 ± 0.46
黄土 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

设 4 个雨量筒，接 3 min 降雨量以率定雨强。待雨强达到要求后，快速揭开土槽的遮雨布并用秒表计时。因每次试验很难精准控制，实际雨强为(90 ± 4) mm/h。不同坡长和覆沙厚度条件下产流时间差异较大，为了获取较为完整的坡面产流产沙过程，降雨历时以覆沙层基本侵蚀完为准，降雨历时存在差异，不同处理降雨历时从 60 ~ 144 min 不等。

降雨开始后，记录初始产流时间，产流后按 3 min 内连续接收径流泥沙量是否灌满 15 L 塑料桶为记时标准，如规定时间内塑料桶未接满，以 3 min 记时并更换塑料桶，如 3 min 内塑料桶接满，则以实际所用时间为准并换塑料桶，直到模拟降雨试验结束。降雨结束后，称接收径流泥沙塑料桶的总质量，静置 24 h 澄清，用虹吸法排除清液，再次称质量，并在虹吸后的沉积物中取样，利用烘干法测定含水量，进而计算径流速率、土壤流失率和泥沙浓度。

1.4 数据分析

本文利用 Excel 2021 进行数据整理分析、利用 Origin 2021 软件作图。在进行处理间总量比较时，统一以 60 min 降雨历时观测的平均值为准，在进行产流产沙过程分析时，以实际降雨历时为准。由于覆沙坡面降雨过程中变化存在连续性和局部不稳定性，易出现沙层坍塌，结构方程以捕捉瞬时产流产沙特征变化为主，因而结构方程利用过程数据，将降雨历时作为变量之一。结构方程模型使用加权最小二乘均值和方差调整估计(weighted least squares means and variance adjusted，WLSMV)进行拟合。拟合结果通过 Tucker-Lewis 指数(Tucker-Lewis index，TLI)、比较拟合指数(comparative fit index，CFI)、标准化均方根残差(standardized root mean square residual，SRMR)以及近似均方根误差(root mean square error of approximation，RMSEA)来评估。通常情况下，TLI > 0.90、CFI > 0.90、SRMR < 0.08 且 RMSEA < 0.05 被认为是良好的拟合。本研究使用 R 语言中“lavaan”包进行拟合。

2 结果与分析

2.1 产流速率

与无覆沙坡面相比，沙层明显延长了初始产流时间(3 ~ 30.72 倍)，且随覆沙厚度增加，初始产流时间延长越明显(图 1)。1 m 坡长下无覆沙坡面和 10 cm 沙层坡面初始产流时间长于 3 m 坡长，而 3 m 坡长在 2 cm 和 5 cm 覆沙厚度下初始产流时间长于 1 m。相同覆沙条件下不同坡长初始产流时间相差在 0.21 ~ 10.50 min 之间。前 60 min 降雨过程中，1 m 和 3 m 坡长覆沙坡面平均产流速率分别为 12.62 ~ 46.64 mm/h 和 46.73 ~ 65.47 mm/h，较等坡长条件下无覆沙坡面(78.25 和 87.42 mm/h)分别降低了 40% ~ 84% 和 25% ~ 47%。不同坡长坡面平均产流速率对覆沙厚度的响应存在差异，较厚覆沙(10 cm)对 1 m 坡长产流速率的抑制作用最为显著(12.62 mm/h)，其次是 2 cm 覆沙(46.64 mm/h)；而 5 cm 覆沙在 3 m 坡长时减流效果最佳(46.76 mm/h)，其次是 10 cm 覆沙(55.20 mm/h)。1 m 坡长覆沙坡面减缓产流速率的效应较 3 m 坡长更为显著，且随覆沙厚度增加而增加。

坡长和覆沙厚度明显影响了降雨过程中的坡面产流模式(图 1)。不同坡长下无覆沙黄土坡面产流模式相似，表现为随降雨历时增加，产流速率快速达到准稳定状态，降雨过程中径流速率变异系数小于

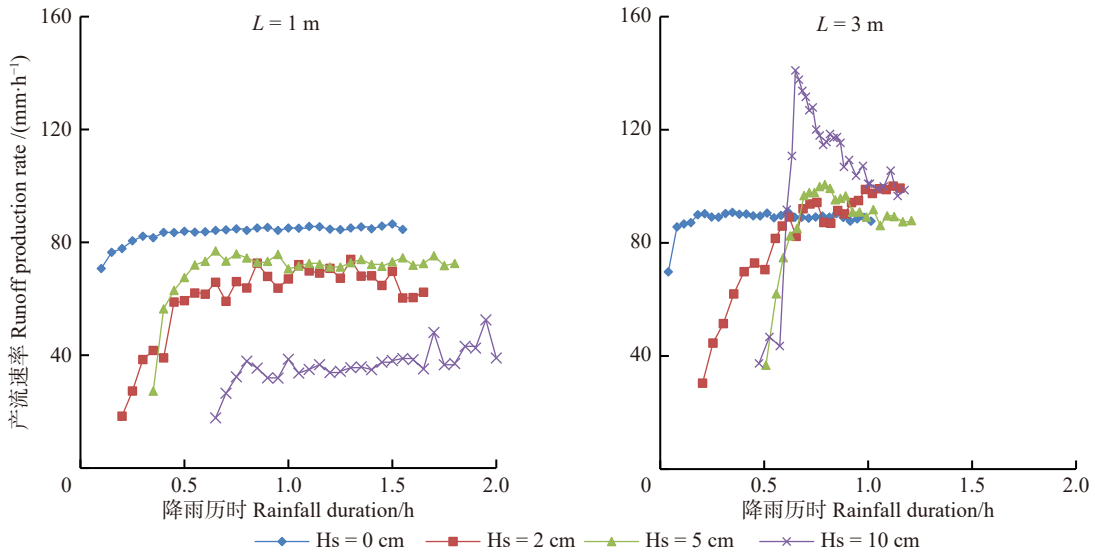


图 1 降雨过程中不同坡长(L)和覆沙厚度(Hs)下坡面产流速率的变化

Fig. 1 Variations in runoff production rate on slopes with different slope lengths (L) and sand covering thicknesses (Hs) during rainfall

5%。随着覆沙厚度的增加，不同坡长下产流特征发生了明显的变化，变异性明显增强。在整个降雨过程中，1 m 坡长无覆沙坡面产流速率整体高于覆沙坡面，且随覆沙厚度增加，产流速率呈降低趋势；由于覆沙层能够增加入渗且具有一定的蓄水功能，3 m 坡长坡面在降雨的前 40 min 无覆沙坡面产流速率明显高于覆沙坡面，而降雨 40 min后覆沙坡面产流速率高于未覆沙坡面，且 5 cm 和 10 cm覆沙坡面出现明显单峰，尤其 10 cm 覆沙坡面产流后产流速率迅速增大，瞬时产流量超过降雨量，达到峰值后快速减小，之后又趋于平缓，降雨后期不同覆沙厚度产流速率相差较小。降雨过程中 1 m 坡长 2、5 和 10 cm 覆沙厚度产流峰值分别为 73.97、76.97和 52.51 mm/h，3 m 坡长时分别为 100.08、100.61 和 140.97 mm/h，均大于试验设定雨强，说明降雨过程中 3 m 坡长覆沙坡面产流系数出现大于 1 的情况。整体上，降雨过程中不同覆沙厚度下 3 m 坡长坡面产流速率高于 1 m 坡长坡面。

2.2　产沙速率

次降雨过程中产沙速率随覆沙厚度和坡长变化如图 2 所示。不管坡面是否覆沙，降雨过程中 1 m 坡长坡面产沙速率(1.99 ~ 77.52 kg/(m^2·h))均小于 3 m 坡长坡面产沙速率(7.99 ~ 355.79 kg/(m^2·h))。降雨过程中产沙速率的变化明显受坡长和覆沙厚度影响。无覆沙坡面，1 m 坡长坡面产沙速率随降雨历时增加呈缓慢增加的趋势(开始产流时的异常值除外)，而 3 m 坡长坡面产沙速率先缓慢增大后又波动减小。覆沙坡面产沙速率随降雨历时增加呈明显的单峰分布，即先快速增加而后减小，最终趋于稳定。峰值随覆沙厚度增加而增大，降雨过程中 1 m 坡长 2、5、10 cm 覆沙厚度下产沙速率峰值分别为 48.37、77.52、71.49 kg/(m^2·h)，3 m 坡长的分别为 46.23、143.85、355.79 kg/(m^2·h)，较厚覆沙下坡长增加产沙速率峰值明显增加。次降雨条件下，3 m 坡长坡面平均产沙速率是相同条件下 1 m 坡长坡面的 1.29 ~ 5.57 倍。坡长变化显著改变了覆沙厚度对产沙速率的影响，无覆沙 1 m 和 3 m 坡长坡面平均产沙速率分别为 2.61 和 10.08 kg/(m^2·h)，1 m 坡长 2 cm、5 cm 和 10 cm 覆沙坡面平均产沙速率分别为 23.18、41.58 和 17.92 kg/(m^2·h)，3 m 坡长分别为 30.60、53.48 和 99.83 kg/(m^2·h)，覆沙坡面平均产沙速率是未覆沙坡面的 3.03 ~ 15.91 倍。

2.3　含沙量

降雨过程中不同坡长和覆沙厚度坡面径流含沙量变化如图 3 所示。1 m 和 3 m 坡长无覆沙坡面平均径流含沙量分别为(33.65 ± 3.97) kg/m^3 和(110.62 ± 8.34) kg/m^3。降雨诱发高含沙径流，1 m 坡长 2、5 和 10 cm 覆沙坡面平均泥沙含量分别为(273.18 ± 200.88) kg/m^3、(629.75 ± 148.43) kg/m^3 和(586.12 ± 255.28) kg/m^3，3 m 坡长的覆沙坡面分别为(394.69 ± 121.42) kg/m^3、(688.83 ± 259.90) kg/m^3 和(986.85 ± 244.28) kg/m^3。覆沙坡面平均含沙量比无覆沙坡面高 3.38 ~ 18.07 倍，随覆沙厚度和坡长增加，含沙量呈增加趋势。降雨过程中不同坡长覆沙坡面径流含沙量变化趋势存在明显差异，1 m 坡长覆沙坡面径流含沙量随降雨历时呈先增大后减少的趋势，而 3 m 坡长覆沙坡面在产流初期径流含沙量高，随后逐渐减小，不同坡长覆沙坡面径流含沙量峰值随覆沙厚度增加而增大。降雨过程中，除 2 cm 覆沙厚度的产流中期和 10 cm 覆沙厚度产流后期，3 m 坡长坡面

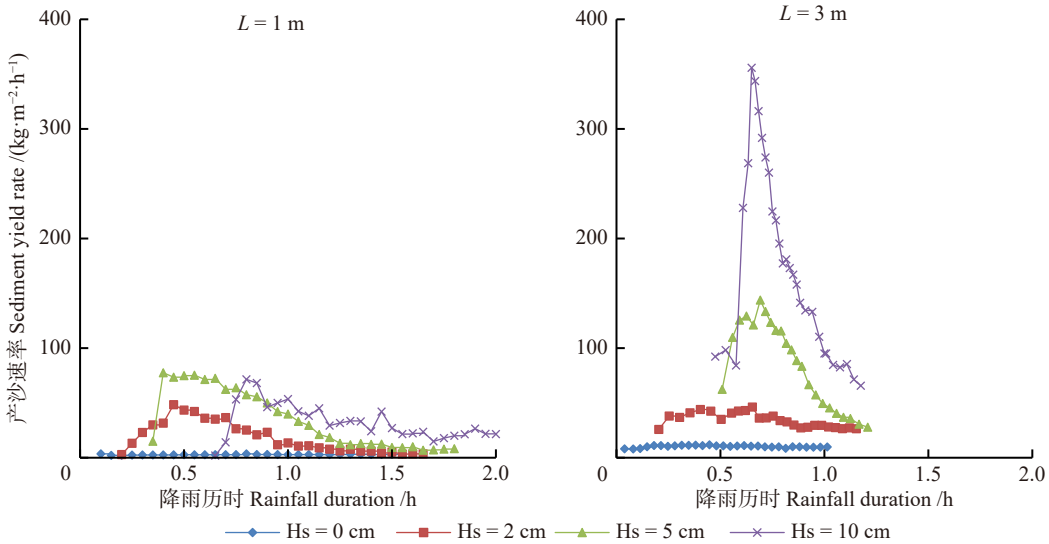


图 2　降雨过程中不同坡长(L)和覆沙厚度(Hs)坡面产沙速率的变化

Fig. 2　Variations in sediment yield rate on slopes with different slope lengths (L) and sand covering thicknesses (Hs) during rainfall

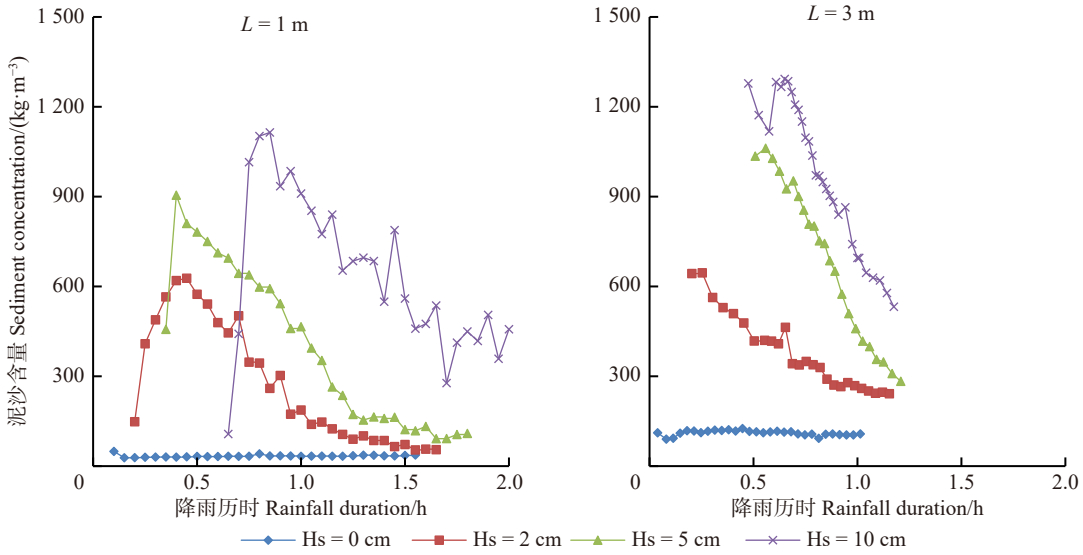


图 3 降雨过程中不同坡长(L)和覆沙厚度(Hs)坡面径流含沙量的变化

Fig. 3 Variations in sediment content on slopes with different slope lengths (L) and sand covering thicknesses (Hs) during rainfall

含沙量始终大于 1 m 坡长。覆沙坡面在大多数情况下，径流泥沙含量大于 200 kg/m^3，属于高含沙水流，说明特殊的覆沙地貌是该区域高含沙水流形成的主要原因之一。

2.4 沙盖黄土坡面产流产沙变化的解析

坡长和覆沙厚度改变了降雨过程中产流和产沙之间的关系(图 4)。在无覆沙、1 m 坡长覆沙和 3 m 坡长 2 cm 覆沙坡面，降雨过程中产流和产沙无明显相关性。而 3 m 坡长 5 和 10 cm 覆沙坡面产流产沙峰值前后呈明显正相关，产流和产沙速率有明显峰值，且达到峰值的时间较为接近。如不考虑坡长和覆沙厚度变化，在产流速率大于 90 mm/h，即大于雨强时，产流产沙之间正相关明显。

图 5 是基于结构方程解析降雨过程中各影响因素对坡面瞬时产流产沙速率变化的影响。对产流速率而言，坡长影响最大(0.65)，其次是覆沙厚度(−0.22)，降雨历时(0.09)对产流的影响相对较小。对产沙速率而言，覆沙厚度影响最大，其次为产流速率、降雨历时和坡长，总效应分别为 0.71、0.61、−0.35 和 0.32。覆沙厚度和产流速率以直接正效应影响产沙速率(0.84 和 0.61)；降雨历时以直接负效应(−0.40)为主，而坡长以产流速率为中介的间接正效应(0.40)为主，坡长对产沙的作用主要通过影响产流来实现。

3 讨 论

3.1 坡长和覆沙厚度对坡面产流产沙速率的影响

沙盖黄土坡面是水蚀风蚀交错带多动力侵蚀条件下形成的一种特殊地貌景观[5]。沙层与下伏黄土

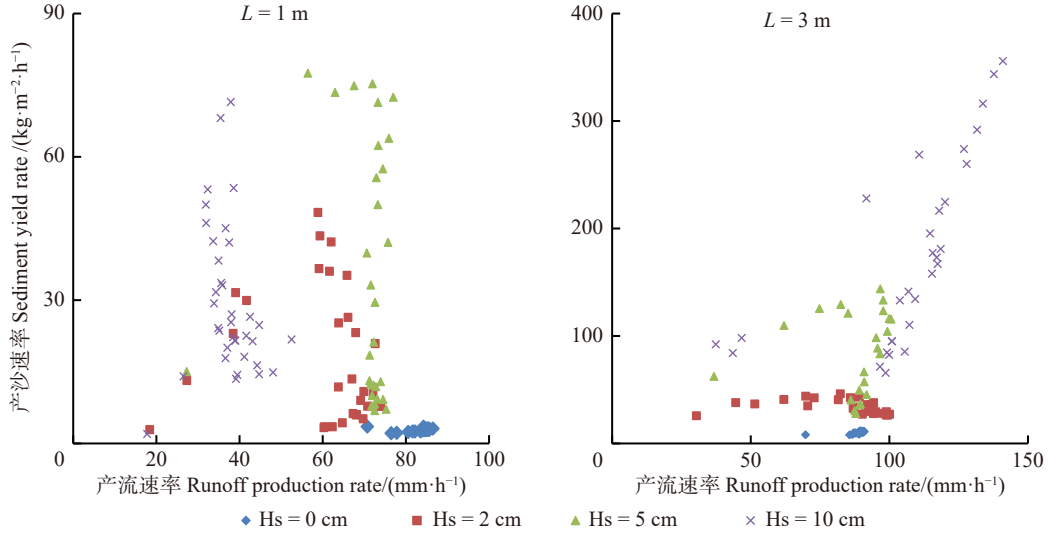
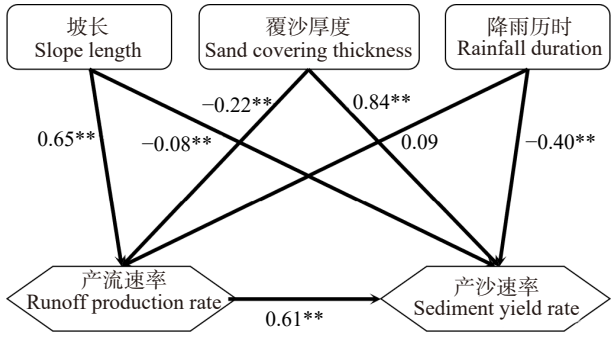


图 4 降雨过程中不同坡长(L)和覆沙厚度(Hs)坡面产流产沙的关系

Fig. 4 Relationship between runoff production rate and sediment yield rate on slopes with different slope lengths (L) and sand covering thicknesses (Hs) during rainfall



TLI = 1.00 CFI = 1.00 SRMR = 0 RMSEA = 0

代表极显著性水平（$P < 0.01$）。TLI. Tucker-Lewis 指数；CFI. 比较拟合指数；SRMR. 标准化均方根残差；RMSEA. 近似均方根误差。 represents extremely significant level ($P < 0.01$). TLI, Tucker-Lewis index; CFI, comparative fitting index; SRMR, standardized root mean square residual; RMSEA, root mean square error of approximation.

图 5　降雨过程中产流产沙速率的结构方程解析

Fig. 5　Structural equation analysis of runoff production rate and sediment yield rate during rainfall

层在土壤容重、孔隙度、导水性、黏聚力等性质上差异明显，形成特殊的产流产沙过程，导致不同影响因素对沙盖黄土坡面产流产沙的作用与未覆沙坡面明显不同[6−9]。本研究聚焦于坡长和覆沙厚度变化对覆沙坡面产流产沙过程的影响。未覆沙坡面产流产沙过程对坡长的响应与以往研究结果基本一致[20]，不管是瞬时还是 60 min 内平均产流产沙速率，都随坡长增加而增大。未覆沙坡面平均产流速率大于而平均产沙速率小于覆沙坡面[11−12]。对覆沙坡面而言，长坡坡面平均产流产沙速率整体上高于短坡坡面，这与已有大部分单一结构坡面坡长影响产流产沙速率的结果一致[20,24]。然而，不同坡长次降雨平均产流产沙速率和瞬时产流产沙速率对覆沙厚度的响应存在一定差异。覆沙厚度明显降低了短坡次降雨平均产流速率，增加长坡次降雨平均产沙速率。覆沙厚度对长坡面降雨过程瞬时产流产沙的响应较为剧烈，增强了降雨过程产流产沙的变异性，较厚覆沙坡面产流产沙出现明显单峰现象，甚至出现瞬时产流系数大于 1 的现象。这与 Zhang 等[11−12]发现的覆沙厚度对坡面产流产沙过程的影响一致。而短坡长下，瞬时产流速率基本保持先增加后稳定，且一直小于未覆沙坡面，但瞬时产沙速率基本大于未覆沙坡面，这与相似坡长下谢林妤等[13]的研究结果相似。

不同覆沙厚度坡面产流产沙对坡长响应差异主要与沙土二元结构坡面产流过程的特殊性及坡长增加汇流面积有关。由于下伏黄土入渗小，相当于弱透水层[6,25]，导致覆沙坡面产流模式以蓄满产流或壤中流（沙层内）为主，沙层内达到一定的水头后才能产生径流[26−27]，进而导致初始产流时间长，入渗量大，最终平均产流速率低于未覆沙坡面。对于短坡面而言，汇流面积小，沙层储水少，沙层内水力坡度小，渗流侵蚀弱，产流后径流先升高后逐渐趋于平稳；沙层因结构性差，黏聚力弱，容易侵蚀，产流后产沙速率迅速增大，随着沙层后退，因坡长短，沙层储水少，水力坡度小，产沙速率缓慢降低，即使相对较厚沙层，也不易出现明显的沙层滑塌现象。但长覆沙坡面因汇流面积大，沙层储水多，沙土界面水头迅速增高，在流出覆沙与黄土界线的地方出现较大水头损失，形成较陡水力坡度，产生很强的侵蚀能力。此外，沙层的结构性差，黏聚力弱，使沙层前沿的饱水部分不断被冲刷，饱气部分不断地坍塌。整个覆沙边缘不断被侵蚀后退，沙水合为一体，由水携沙，以沙带水，不断地将覆沙向坡下搬运输移。较厚沙层易出现沙层坍塌现象，导致产流后产沙速率激增。随着沙层后退，产沙速率快速下降，最后缓慢下降，瞬时产沙减小（图 1 和图 2）。长坡因沙层储水较多，沙层后退快，导致瞬时产流系数出现大于 1 及瞬时产流产沙速率在降雨过程中陡增陡降的现象。结构方程分析显示，坡长主要通过影响产流来间接影响产沙（图 5）。

3.2　坡长和覆沙厚度对坡面径流含沙量的影响

研究结果显示，降雨过程中覆沙坡面径流含沙量远高于未覆沙坡面，且随覆沙厚度增加而增加，这归功于沙层提供了易侵蚀的物源[7]。相同覆沙条件下长坡瞬时最小和最大泥沙含量都高于短坡，长坡瞬时最大含沙量在产流后立刻出现，短坡含沙量是产流后先增加，达到峰值后又降低。主要是因为长坡面受雨面积和汇流面积大，产流前沙层储水大且沙层易滑塌[22]。覆沙坡面长坡次降雨平均含沙量（373.61 ~ 982.96 kg/m^3）高于短坡（271.70 ~ 607.76 kg/m^3），属高含沙水流范畴，但仍然小于张丽萍等[7]在神木六道沟覆沙坡面的野外模拟降雨试验的平均含沙量（1 110 ~ 1 310 kg/m^3），主要与野外坡面坡度大（大于 28°），覆沙层较厚，且小区面积较大有关（1.5 m × 5.0 m），也进一步证实坡面尺度对覆沙坡面产流产沙过程影响明显。李永山等[28]发现黄河毛布拉孔兑支沟苏达尔沟洪水泥沙含量峰值平均约 1 200 kg/m^3，最大达 1 500 kg/m^3，本研究较厚沙层坡面降雨过程瞬时含沙量处于这个范围之内。许炯心[29]在研究高含沙洪水与风水两相复合侵蚀的关系认为风沙淤积和洪水冲刷模式是形成高含沙洪水的重要因素，同时侵蚀产沙与高含沙水流之间存在着因果与互馈关系，强烈的侵蚀作用促进了高含沙水流的形成。本文研究结果进一步从坡面尺度上证实，该区域高含沙水流形成的主要原因是风蚀过程。这一

过程在黄土坡面形成覆沙层，为水蚀提供了侵蚀物源。从坡面尺度上深化了对水蚀风蚀交错带土壤侵蚀特征，以及该区域高含沙水流形成机理的认识。这些发现为区域土壤侵蚀预报和治理提供了理论支撑。

本研究为室内模拟试验，坡面尺度较小，覆沙厚度相对较薄，但已经明显展示了坡长变化以及坡长与覆沙厚度相互作用对覆沙坡面产流产沙过程的影响。在野外较大尺度坡面，极端降雨事件下，坡长和覆沙厚度对覆沙坡面侵蚀过程的影响可能更为剧烈。未来研究应进一步加强野外原位观测试验，从沙层内部水分运动、径流动力特征等方面入手，系统分析沙盖黄土坡面侵蚀过程的动力变化特征，揭示其动力学机制。目前，在全球气候变化的影响下，近十年来黄土高原极端降雨事件频繁，且该区域常以高强度暴雨为主[30]，沙盖黄土坡面是潜在的侵蚀灾害源。因此，加强该区域沙盖黄土坡面土壤侵蚀防治尤为重要，对减少黄河泥沙和保障黄河安澜运行具有重要意义。

4 结　　论

本研究采用室内人工模拟降雨试验，结合加权最小二乘法和方差调整估计拟合的结构方程模型，定量分析了坡长和覆沙厚度对覆沙坡面产流产沙过程的影响。黄土坡面覆沙较未覆沙能明显延长初始产流时间，减小平均产流速率而增大产沙速率和含沙量，且都随覆沙厚度的增加而加强。覆沙厚度影响覆沙坡面产流产沙过程，且不同覆沙厚度下坡长对覆沙坡面产流产沙的影响存在差异。短坡产流速率随覆沙厚度增加明显降低，长坡产沙速率随覆沙厚度增加迅速增大。无论是否覆沙，长坡含沙量明显高于短坡，较厚沙层坡面产流产沙出现明显的峰值，且瞬时含沙量波动范围高于短坡。坡长是调控产流速率的主要因素，覆沙厚度对产沙速率的影响最大，坡长通过增加产流速率影响产沙速率。整体而言，坡长增大了沙盖黄土坡面的产流产沙速率，覆沙厚度在一定程度上减小了产流速率而增大了产沙速率，二者协同增强了坡面产流产沙的变异性。本研究是室内模拟降雨试验，与实际情况相比，存在一定局限性，但研究结果已充分展示坡长和覆沙厚度及二者协同作用对沙盖黄土坡面产流产沙的影响，也意味着在野外较大尺度坡面和极端降雨事件下坡长和覆沙厚度对产流产沙的效应可能更加剧烈，因此，在气候变化的大背景下，未来加强该区沙盖黄土坡面土壤侵蚀的防治尤为重要。

参 考 文 献

[1] 唐克丽, 周佩华. 黄土高原土壤侵蚀研究若干问题的讨论 [C]// 张兴昌. 中国科学院西北水土保持研究所集刊. 杨凌: 水土保持研究, 1988: 1−4.
Tang K L, Zhou P H. Discussion on problems of soil erosion in Loess Plateau[C]// Zhang X C. Memoir of NISWC, Academia Sinica. Yangling: Research of Soil and Water Conservation, 1988: 1−4.

[2] 张卓佩, 牛健植, 樊登星, 等. 黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化及动态驱动力分析 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 85−96.
Zhang Z P, Niu J Z, Fan D X, et al. Analysis of spatial and temporal evolution and dynamic driving force of soil water erosion in the middle reaches of the Rellow River in the rich and coarse sediment area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 85−96.

[3] 秦富仓, 杨振奇, 李龙. 砒砂岩区土壤侵蚀机理与生态修复技术研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(12): 142−150.
Qin F C, Yang Z Q, Li L. Research progress on soil erosion mechanism and ecological restoration technology in feldspathic sandstone region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(12): 142−150.

[4] 索安宁, 赵文喆, 王天明, 等. 近 50 年来黄土高原中部水土流失的时空演化特征 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 90−97.
Suo A N, Zhao W Z, Wang T M, et al. Spatial-temporal succession characteristics of soil and water loss in the central Loess Plateau during the last 50 years[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(1): 90−97.

[5] 徐建华, 吴成基, 林银平, 等. 黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 6−9, 14.
Xu J H, Wu C J, Lin Y P, et al. Definition on source area of centralized coarse sediment in middle Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 6−9, 14.

[6] 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 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 190−193, 210.
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[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 190−193, 210.

[7] 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 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 41−46.
Zhang L P, Tang K L, Zhang P C. Soil water erosion processes in loess hilly-gully region covered with sheet sand[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(1): 41−46.

[8] 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 [J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 130−131, 196.
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[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 130−131, 196.

[9] 惠振江. 陕北毛乌素沙地与黄土区过渡地带荒漠化研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
Hui Z J. Desertification in the transition zone between Maowusu

Sandy Land and loess hill region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2001.

[10] 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[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2523−2530.

[11] 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.

[12] 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[J]. Journal of Hydrology, 2017, 553(Suppl. C): 447−456.

[13] 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 [J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 60−72.
Xie L Y, Bai Y J, Zhang F B, et al. Effects of thickness and particle size composition of overlying sand layer on runoff and sediment yield on sand-covered loess slopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 60−72.

[14] 曹晓娟, 谢林妤, 张风宝, 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.
Cao X J, Xie L Y, Zhang F B, et al. Quantifying the contributions of sand layer characteristic to variations of runoff and sediment yields from sand-covered loess slopes during simulated rainfall[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 962−974.

[15] Ren Z P, Zhang X, Zhang X C, et al. Sand cover enhances rill formation under laboratory rainfall simulation[J/OL]. Catena, 2021, 205: 105472[2023−01−23]. 10.1016/j.catena.2021.105472

[16] 冯昭阳, 汤珊珊, 李鹏, 等. 不同覆沙方式下的坡面侵蚀产沙特性研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(6): 183−191.
Feng Z Y, Tang S S, Li P, et al. Characteristics of slope erosion and sediment yield under different sand cover modes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(6): 183−191.

[17] 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 [J]. 泥沙研究, 2016(6): 59−65.
Zhang H, Li P, Tang S S, et al. Experimental study on runoff and sediment yield characteristics on sand-covered slope under the condition of repetitive rainfall[J]. Journal of Sediment Research, 2016(6): 59−65.

[18] 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 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 136−143.
Tang S S, Li Z B, Lu K X, et al. Relationship between hydrodynamic parameters and runoff and sediment yield on sand-covered slope in rainfall simulation study[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 136−143.

[19] 汤珊珊, 高海东, 李占斌, 等. 坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 125−130.
Tang S S, Gao H D, Li Z B, et al. Characteristics of particle separation of erosion sediment in slop surface covered with sand[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 125−130.

[20] Qin W, Guo Q K, Cao W H, et al. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau Watershed[J]. Soil Tillage Research, 2018, 182: 10−24.

[21] Shi F Y, Zhang F B, Shen N, et al. Quantifying interactions between slope gradient, slope length and rainfall intensity on sheet erosion on steep slopes using multiple linear regression[J]. Science of the Total Environment, 2023, 908: 168090.

[22] Lourenço S D N, Sassa K, Fukuoka H. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides[J]. Geomorphology (Amsterdam, Netherlands), 2006, 73(1): 115−130.

[23] Shi Z H, Yue B J, Wang L, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(1): 257−267.

[24] Chaplot V A M, Le Bissonnaisy Y. Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 844−851.

[25] Hardie M A, Doyle R B, Cotching W E, et al. Hydropedology and preferential flow in the Tasmanian texture-contrast soils[J]. Vadose Zone J, 2013, 12(4): 1−14.

[26] Fox G A, Wilson G V. The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: a review[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 717−733.

[27] Eastham J, Gregory P J, Williamson D R. A spatial analysis of lateral and vertical fluxes of water associated with a perched watertable in a duplex soil[J]. Soil Research, 2000, 38(4): 879−890.

[28] 李永山, 贾晓鹏, 马启民, 等. 孔兑沙漠小流域高含沙洪水水沙关系特征及其指示意义：以毛布拉孔兑苏达尔沟为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3): 92−97.
Li Y S, Jia X P, Ma Q M, et al. Characteristics of sediment-discharge relationship of hyper-concentrated flood and its implication in the Sudaer River of Maobula Kongdui[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3): 92−97.

[29] 许炯心. “十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系 [J]. 泥沙研究, 2013(6): 28−37.
Xu J X. Erosion and sediment yield of 10 small tributaries joining Inner Mengolia reach of upper Yellow River in relation with coupled wind-water processes and hyperconcentrated flows[J]. Journal of Sediment Research, 2013(6): 28−37.

[30] 苗书玲, 曹艳萍, 李晴晴. 1951—2019 年黄河流域极端气候事件时空变化规律分析 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 2022, 52(4): 416−429.
Miao S L, Cao Y P, Li Q Q. Spatiotemporal distribution of extreme climate events in the Yellow River Basin during 1951–2019[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2022, 52(4): 416−429.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　杨晓晖）