

黄土区土质道路浮土侵蚀过程*

李建明¹ 秦伟² 左长清² 王文龙^{1,3**} 郭明明¹ 欧阳潮波¹

(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中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 北京 100044; ³中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 基于野外原位调查采样、室内人工模拟降雨试验研究道路浮土侵蚀规律。结果表明: 浮土产流起始时间和路面侵蚀起始时间随雨强和坡度增大呈递减趋势。路面侵蚀起始时间随浮土厚度增大滞后 2~5 min。浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时径流率在产流后 2 min 趋于稳定, 平均径流率随雨强增大而递增, 随坡度增大而递减; 浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时, 径流率在产流后 3 min 趋于相对稳定, 平均径流率随雨强增大呈线性递增, 随坡度增大而先递增后递减。侵蚀临界点随坡度和雨强增大呈递减趋势。浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时, 侵蚀速率随雨强增大而递增幅度达 24.5%~434.4%, 坡度 8° 和 16° 可达 2° 和 4° 的 2.4 倍; 浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时, 侵蚀速率在产流开始后 9 min 左右趋于相对稳定, 且随雨强和坡度增大而递增。随坡度增大侵蚀形式发生由“片蚀-细沟侵蚀-溯源侵蚀”的转变。浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时, 平均 10 min 次降雨侵蚀量可达浮土厚度 ≤ 0.5 cm 的 1.3 倍, 而单独浮土侵蚀时段侵蚀量前者是后者的 2.7 倍。浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时, 侵蚀量与雨强的相关性显著, 产流量与坡度的相关性显著; 浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时, 10 min 次降雨产流、产沙与雨强呈显著相关。随浮土厚度增大, 浮土侵蚀量在组合侵蚀中所占比例增大, 而薄层时主要以道路侵蚀占主导。

关键词 浮土; 黄土区土质道路; 产流; 产沙; 模拟降雨

文章编号 1001-9332(2015)05-1484-11 中图分类号 S157.1 文献标识码 A

Processes of earth road regolith erosion in loess area. LI Jian-ming¹, QIN Wei², ZUO Chang-qing², WANG Wen-long^{1,3}, GUO Ming-ming¹, OUYANG Chao-bo¹ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Department of Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; ³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(5): 1484-1494.

Abstract: Based on field investigation, the processes of earth road regolith erosion were studied under indoor simulated rainfall. Results showed that the runoff initiation time for both regolith and earth road surface erosion decreased with the increasing rainfall intensity and slope steepness. With the increase in regolith thickness, the initiation time for earth road surface erosion lagged for 2-5 min. When the regolith thickness was ≤ 0.5 cm, the runoff rate turned to be stable at 2 min after runoff generation, and the average runoff rate increased with the increasing rainfall intensity and decreased with the increasing slope steepness. When the regolith thickness was ≥ 1.0 cm, runoff rate turned to be stable at 3 min after runoff generation, and the average runoff rate increased linearly with the rainfall intensity but exhibited a gradually decreasing trend after the first increment with the increasing slope steepness. The critical point for regolith erosion decreased with the increasing rainfall intensity and slope steepness. With the regolith thickness of ≤ 0.5 cm, the erosion rate increased with the increasing rainfall intensity, with the erosion rate ranging from 24.5% to 434.4%, and the erosion rates for 8° and 16° slopes were 2.4 times as those for 2° and 4° slopes. With the regolith thickness of ≥ 1.0 cm, the erosion rate turned to be stable about 9 min after runoff generation and increased with the increasing rainfall intensity and slope. With the increasing slope

* 水利部公益性行业专项(201201047 201201048)、中国科学院“西部行动计划”项目(KZCX2-XB3-43)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZZD-EW-04-03)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项(10502-T1)资助。

** 通讯作者。E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

2014-08-19 收稿, 2015-02-26 接受。

steepness, the erosion form changed from sheet erosion to rill erosion and then to headward erosion. The average erosion amount over 10 min single rainfall for the regolith thickness of ≥ 1.0 cm was 1.3 times as that for the regolith thickness of ≤ 0.5 cm, while it was 2.7 times as that at the stage of regolith erosion alone. With the regolith thickness of ≤ 0.5 cm, the erosion amount had a significant correlation with rainfall intensity, and runoff volume with slope steepness. With the regolith thickness of ≥ 1.0 cm, both runoff and sediment yields in 10 min single rainfall had a significant correlation with rainfall intensity. The proportion of regolith erosion to the combined erosion increased with the increasing regolith thickness, while the road erosion was the main form at small regolith thickness.

Key words: regolith; earth road in loess area; runoff yield; sediment yield; simulated rainfall.

DOI:10.13287/j.1001-9332.20150319.008

为促进经济发展,黄土高原修建大量道路交通网络,在建设及运营期,严重扰动原地表、破坏植被等,为侵蚀提供环境,在降雨作用下易形成强烈的水土流失。尤其土质道路长期经车辆、人畜碾压,易在表层形成浮土,在风力作用下形成浮尘或降尘,不仅影响人类健康,对行车安全也会造成一定危害。国外对道路侵蚀的研究始于道路水土流失对河流泥沙影响及水质恶化问题^[1],随后,针对道路侵蚀的特征、影响因子等方面展开多方面研究。近些年,随着计算机软件及相关地理信息技术的应用,对道路侵蚀的预测、预报及综合防治措施展开了大量研究^[2-4]。Montgomery^[5]研究认为,道路建设会导致滑坡发生几率提高,并对其成因进行了分析;Nysse等^[6]研究认为,道路排水方式改变径流的路径,在下坡部位形成切沟。国内学者起初对道路边坡、路基及弃土弃渣场的稳定性及水土流失规律展开研究,后期针对特定区域的环境背景值提出道路侵蚀预测预报模型,但其大多为经验性模型,推广性较弱^[7-9]。徐宪利等^[10]通过野外降雨试验结果提出次降雨边坡径流泥沙估算公式;沈波等^[11]研究黄土区路基片蚀规律,表明坡面冲蚀强度与雨强、降雨历时、坡长、坡角、压实度、土壤粘性均有一定关系;张科利等^[12]总结认为,道路侵蚀独特性包括径流与泥沙异源性、空间分布上的线状或网络状特征和不同部位的内部差异性显著。目前,有关道路侵蚀虽已有一定数量的研究,但多针对边坡和土质路面,关于道路浮土侵蚀规律的研究较少,而且主要集中在空气浮尘及降尘的研究^[13-18],而国外关于浮土研究主要集中在煤矿产生的粉煤灰排放等方面^[19-20]。本文通过室内人工模拟降雨试验研究了黄土区土质道路表层浮土的产流产沙规律,以期对道路浮土侵蚀机理研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验准备

土质道路在西北地区较常见,主要集中于农业及工矿生产道路,由于人流、车流量大,表层土被细化,最终形成浮土层。本试验选取陕西长武、神木和内蒙古永利煤矿3地作为道路浮土调查对象,分别代表道路浮土的不同典型类型:长武县是陕西省的苹果种植基地,境内土质生产路车流量大;神木县和内蒙古永利煤矿均属晋陕蒙特大型煤田核心区,运煤道路分布广泛,车流量远大于普通土质路面,道路上常覆盖黄土与粉煤灰混合的浮土。由于长期经大型车辆碾压,表层覆盖一层薄厚不一的浮土层,经雨水冲刷易发生流失,进而造成严重水土流失。选择3个地区主干道作为调查对象,记录道路名称、经纬度、海拔、坡度及浮土厚度的最大值、最小值和平均值。结果显示,土质道路坡度集中在 $0 \sim 20^\circ$,均值在 $4^\circ \sim 10^\circ$ 的占80%以上;道路表层细小的浮土颗粒在风力等作用易在道路两侧堆积,厚度较大,一般为 $2 \sim 4$ cm,而在道路中间浮土堆积厚度较薄,一般为 $0.2 \sim 2$ cm。通过野外采样、室内分析可知,3个地区共计48个样点的平均土壤容重为 $1.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。人工筛分法测得浮土颗粒中 $>0.25 \text{ mm}$ 的颗粒质量百分比平均占67.7%, $\leq 0.25 \text{ mm}$ 的为32.3%,平均容重为 $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。本试验以质地、容重为主要指标,用陕西关中粘黄土作为模拟道路、浮土的试验用土,控制道路、浮土的容重分别为 1.68 和 $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验设计

根据野外调查结果,浮土道路坡度设计为 2° 、 4° 、 8° 和 16° ,浮土厚度选取 0.5 、 1.0 、 2.0 和 4.0 cm。为使试验结果具有可比性,采用人工配比获得浮土,过 6 mm 网筛筛分后,经 $3 \sim 5 \text{ d}$ 晒至干燥,人工碾碎后过 2 和 0.25 mm 网筛,按质量百分比($2 \sim 0.25$

mm) : (<0.25 mm) 7 : 3 配置. 模拟道路的试验土槽尺寸为 $2\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.55\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高). 试验所用粘黄土分 5 层填装, 每层 10 cm, 用铁饼持续敲打夯实, 达到试验设计容重. 模拟道路完成后在道路表层覆一薄层干土, 置室外风干, 使其尽可能干燥且不发生干裂. 试验前, 调整试验槽到设计坡度, 并分次铺填厚度 0.5、1.0、2.0 和 4.0 cm 的浮土. 在集流槽出口道路与浮土之间放置一 3 mm 宽的白色尼龙线, 以作为判定浮土侵蚀殆尽、道路侵蚀起始时间.

试验在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行. 降雨高度 18 m, 满足所有降雨雨滴达到终点速度, 降雨强度为 $30 \sim 350\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 降雨均匀度 $>80\%$, 单个试验区有效降雨面积 $27\text{ m} \times 18\text{ m}$. 根据黄土区多年降雨特征, 雨强设置为 1.0 、 1.5 、 2.0 和 $2.5\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. 以梅花桩法布设率定雨强, 多次率定至误差控制在 5% 之内. 然后, 迅速揭开土槽上的遮雨布并开始计时, 至坡面形成股流并流出集流槽, 记录产流起始时间, 当看到集流槽出口处白色尼龙线时记录路面侵蚀起始时间. 每场试验中配备一名人员专门负责试验现象的观测、拍照并记录时间特征点. 在集流槽出口处收集径流泥沙样, 采用烘干法测定. 由于浮土厚度 0.5 cm 时流失较快, 产流开始后降雨时间设计 10 min, 产流开始后每 1 min 接一个径流泥沙样, 1.0、2.0、4.0 cm 下坡度为 2° 、 4° 、 8° 、 16° 对应的产流开始后降雨总时间分别为 39、33、27、21 min, 产流开始后 3 min 内每 1 min 接一个径流泥沙样, 3 min 后每隔 3 min 接一个径流泥沙样. 试验共计降雨 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 场.

2 结果与分析

2.1 道路浮土产流、产沙起始时间

由图 1 可知, 产流起始时间 (T_0) 随雨强增大而减小, 且不同浮土厚度下雨强由 $1.0 \rightarrow 1.5\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 平均 T_0 可提前 55.4%, 而由 $1.5 \rightarrow 2.5\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, T_0 可减少 5.4% ~ 26.0%. 平均产流起始时间为 1.68 ~ 5.09 min, 可认为雨强对 T_0 的影响在小雨强 ($1.0\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 时更显著, 这可能是由于浮土颗粒细小, 呈疏松态, 降雨首先入渗, 雨强较小时, 入渗时间较长, 至浮土层湿润后方可形成径流. 而当雨强 $\geq 1.5\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 由于单位时间内雨量增加, 缩短入渗时间, 在满足入渗的同时, 多余的降雨形成坡面径流, 且坡面细小的浮土颗粒遇水易发生凝结, 降雨初期形成结皮, 在试验过程中可以观测到浮

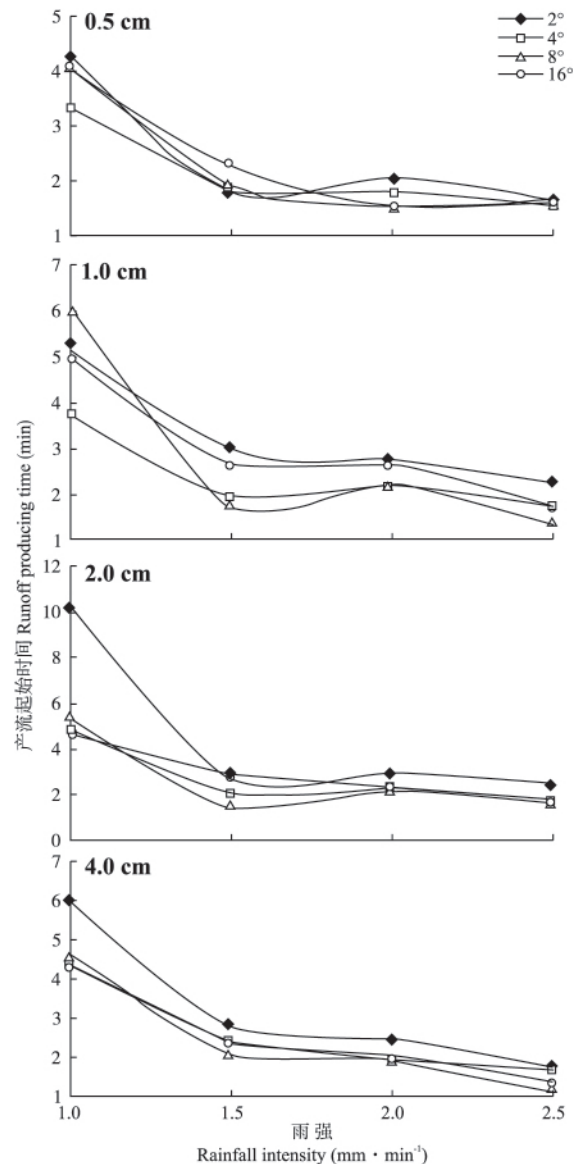


图 1 不同浮土厚度和坡度下产流起始时间随雨强的变化
Fig. 1 Variation of runoff producing time with rainfall intensity under different regolith thickness and slopes.

土表面出现大小、数量不一的“真空气泡”, 结皮层使得雨水入渗减小而 T_0 提前. T_0 与雨强呈显著线性负相关, 相关系数为 -0.732 ($P < 0.01$). T_0 随浮土厚度变化表现为 0.5 cm 产流最快, 平均为 2.30 min, 浮土厚度 1.0、2.0、4.0 cm 平均 T_0 分别为 2.91、2.79 和 2.73 min. 造成该现象的原因可能是 0.5 cm 时, 浮土厚度薄, 雨水较易入渗, 很快湿润浮土层, 随之形成径流, 而浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时, 浮土层厚, 入渗时间长, 导致 T_0 滞后, 但结皮作用使 T_0 随浮土厚度增大变化较小. T_0 随坡度变化总体表现为 2° 最大, 主要是 2° 时坡面平缓, 径流在坡面受到的重力势能较小, 径流流动缓慢, 入渗增加, 进而导致 T_0 较大. 随坡度增大, T_0 减小且不同坡度间差异较小, 2°

时平均 T_0 为 3.39 min, 4° 、 8° 、 16° 时平均 T_0 分别较 2° 可缩短 26.5%、23.7% 和 19.8%, 此时, 相对于坡度、浮土厚度, 雨强是影响坡面产流的主导因素。

由图 2 及试验过程观测可知, 路面开始侵蚀均发生在小区与集流槽交界处, 且 T_1 与 T_0 相关性极大, 因此, T_1 的变化规律与 T_0 相似。随雨强增大, T_1 总体呈递减趋势, 由于单位时间雨量越多, 形成的坡面径流增大, 径流带走浮土数量增多, 导致 T_1 提前。雨强由 $1.0 \rightarrow 1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, T_1 迅速递减可提前 6.35 min, 递减幅度达 41.9%, 而由 $1.5 \rightarrow 2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

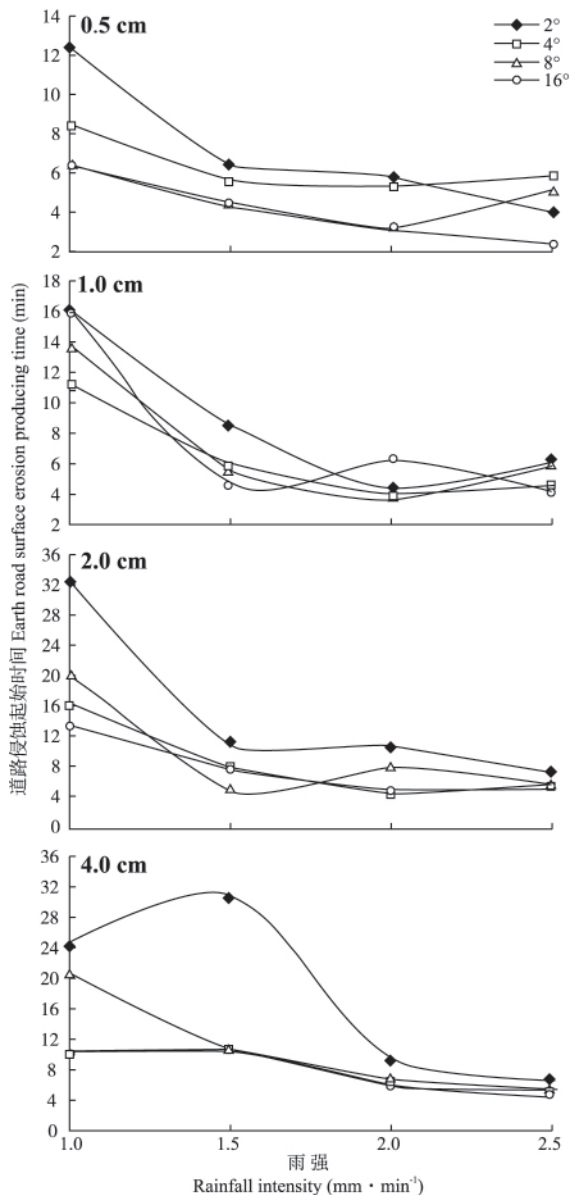


图 2 不同浮土厚度和坡度下道路侵蚀起始时间随雨强的变化

Fig. 2 Variation of earth road surface erosion producing time with rainfall intensity under different regolith thickness and slopes.

时, T_1 随雨强变化趋势较小, 大雨强下由于雨量大幅增加, 出水口处的浮土层被迅速侵蚀。 T_1 随坡度变化表现为 2° 最大, 平均 T_1 为 12.41 min, 分别是 4° 、 8° 和 16° 的 1.7、1.5 和 1.8 倍, 坡度越小, 径流在坡面入渗时间延长, 坡面流速较小, 而随坡度继续增大, 各坡度间 T_1 差异不显著。浮土厚度 0.5、1.0、2.0、4.0 cm 平均 T_1 分别为 5.62、7.62、10.64 和 11.15 min, 主要是由于浮土厚度越大, 产流入渗时间长, 带走坡面浮土颗粒时间延长, 最终导致 T_1 滞后。剔除雨强、坡度影响, T_1 与浮土厚度可用幂函数表示。 T_0 、 T_1 随雨强、坡度增大而递减, 由于单位时间雨量增多, 形成径流较大, 浮土层侵蚀加快, 而浮土厚度越大, 浮土被冲刷搬运时间延长, 进而导致 T_0 、 T_1 增大。分析可知, T_1 与 T_0 、雨强和浮土厚度相关性显著, 相关系数分别为 0.803、-0.592 和 0.322 ($P < 0.01$)。

2.2 道路浮土产流、产沙变化过程

浮土厚度 0.5 cm 时由于浮土层薄, 浮土侵蚀较快, 与其他浮土厚度下的规律有明显差异, 且在自然现象中, 薄层浮土流失大量存在, 具有重要的研究价值, 而其他 3 个厚度下浮土流失现象及数据分析结果均显示差异较小。因此, 选取 0.5 和 2.0 cm 2 种厚度下浮土侵蚀产流、产沙变化过程进行分析。“浮土单独侵蚀时段”指产流开始至在小区出口处观测到白色尼龙线时段内的侵蚀过程, 该过程仅发生浮土流失; 而“浮土、道路组合侵蚀时段”指看到白色尼龙线开始至降雨结束的过程, 该过程中浮土及道路均发生侵蚀。

2.2.1 产流变化特征 由图 3 可知, 浮土厚度 0.5 cm 时, 径流率在产流开始后 2 min 内迅速递增, 该过程主要发生在“浮土单独侵蚀时段”, 随后趋于相对稳定, 属“浮土、道路组合侵蚀时段”。雨强为 1.0、1.5、2.0 和 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的平均稳定径流率 (产流开始 2 min 以后时段内平均值) 分别为 1.00、1.52、1.94 和 $2.67 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 分别较产流初期增加 49.7%、56.5%、11.2% 和 34.7%。随雨强增大 1.5~2.5 倍, 平均稳定径流率可增大 1.3~3.1 倍, 主要是由于小区单位面积内的雨量增多, 下垫面条件一致时, 入渗相同, 增多的雨量形成坡面径流, 导致大雨强下径流率增大。坡度对径流率的影响在雨强 $\leq 1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时较显著, 表现为 16° 最小, 随坡度增大平均径流率分别为 1.85、1.85、1.80、 $1.63 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。雨强 $\geq 2.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 坡度对径流率影响减弱, 此时的降雨强度远大于入渗强度, 雨强对径流起决定作用, 且坡度越大, 浮土越易侵蚀, 含沙量

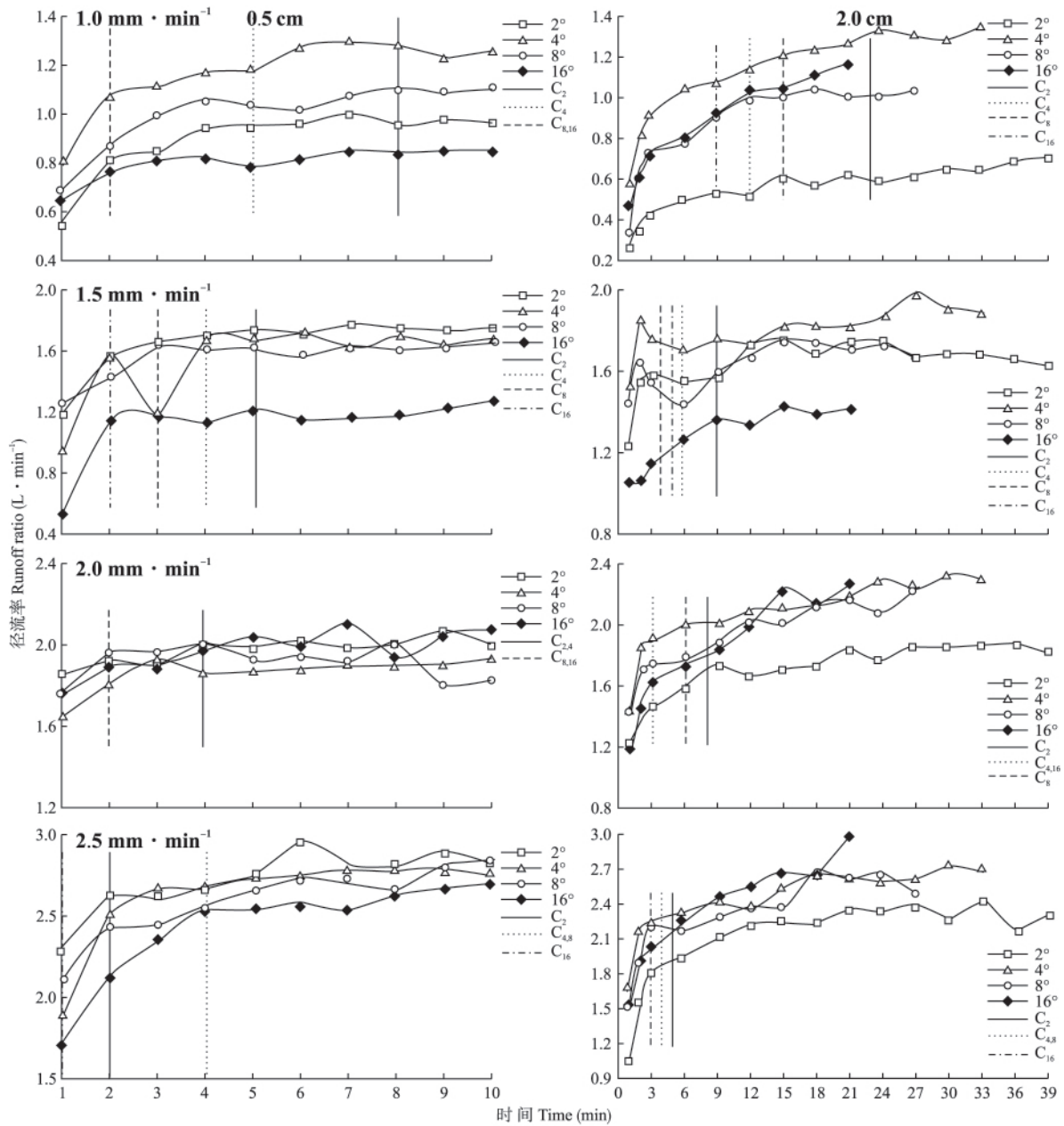


图3 浮土厚度0.5和2.0 cm时不同坡度径流率随时间的变化

Fig.3 Variation of runoff rate with time at different slope steepness for the regolith thickness of 0.5 and 2.0 cm.

C_2 : 2°临界点2° critical point; C_4 : 4°临界点4° critical point; C_8 : 8°临界点8° critical point; C_{16} : 16°临界点16° critical point; $C_{2,4}$: 2°和4°临界点2° and 4° critical point; $C_{4,8}$: 4°和8°临界点4° and 8° critical point; $C_{4,16}$: 4°和16°临界点4° and 16° critical point; $C_{8,16}$: 8°和16°临界点8° and 16° critical point. 下同 The same below.

增大,使得径流率降低.分析可知,稳定径流率与雨强呈显著的线性相关,相关系数为0.970 ($P < 0.01$).浮土厚度0.5 cm时,各场次降雨侵蚀临界点总体表现随雨强、坡度增大呈递减趋势,雨强越大,单位时间内形成径流较多,对坡面冲刷能力增强,表层浮土细颗粒随径流流失较快,而坡度增大,单位水流的剪切力增强,径流对坡面的剥蚀、搬运能力随之变大,二者均能使侵蚀临界点提前.侵蚀临界点与坡度呈显著线性负相关,相关系数为-0.682 ($P < 0.01$).

由图3可知,浮土厚度2.0 cm时径流率曲线的变化规律与浮土厚度0.5 cm相似,但径流率趋于稳定时间较浮土厚度0.5 cm时滞后,发生在产流开始后的3 min,此前径流率显著递增.主要是由于浮土厚度增大,雨水入渗时间延长,导致径流稳定时间延迟.雨强为1.0、1.5、2.0和2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的平均稳定径流率(产流开始3 min以后时段内平均值)分别为0.93、1.61、1.97和2.42 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$,分别较产流后3 min内递增62.0%、11.6%、49.7%和68.

0%。坡度对径流率影响总体表现为 2° 最小, 主要是由于坡度小, 径流势能小, 流速减慢, 增加入渗时间, 导致径流率小, 与浮土厚度 0.5 cm 时径流率为 16° 最小不同, 造成二者差异的原因是浮土厚度增大, 使得浮土层可容纳的水量增多。稳定径流率与雨强呈显著线性相关, 相关系数为 0.946 ($P < 0.01$)。浮土厚度由 0.5 → 4.0 cm, 其平均稳定径流率分别为 1.78、1.89、1.73 和 1.63 L · min⁻¹, 主要是浮土厚度 0.5 和 1.0 cm 时浮土层薄, 产生径流大, 而浮土厚度 ≥ 2.0 cm 时, 由于浮土层较厚, 可容纳水量多, 入渗增大导致径流减小, 平均稳定径流率随浮土厚度

变化幅度较小, 仅为 6.1% ~ 16.0%。浮土厚度 2.0 cm 时侵蚀临界点总体表现为随雨强、坡度增大呈递减趋势, 且在 2° → 4° 时, 临界点可提前 151.4%, 当坡度继续增大, 侵蚀临界点递减幅度减小, 可提早 2 min, 雨强由 1.0 → 1.5 mm · min⁻¹ 时, 侵蚀临界点可提前 80.2%, 由 1.5 → 2.5 mm · min⁻¹ 时, 差异也在 2 min 左右。分析可知, 侵蚀临界点与雨强呈显著负相关, 相关系数为 -0.712 ($P < 0.01$)。

2.2.2 产沙变化特征 由图 4 可知, 当浮土厚度为 0.5 cm、雨强为 1.5 mm · min⁻¹ 时, 侵蚀速率波动性较大, 可能是由于结皮层的形成与破碎导致, 且侵

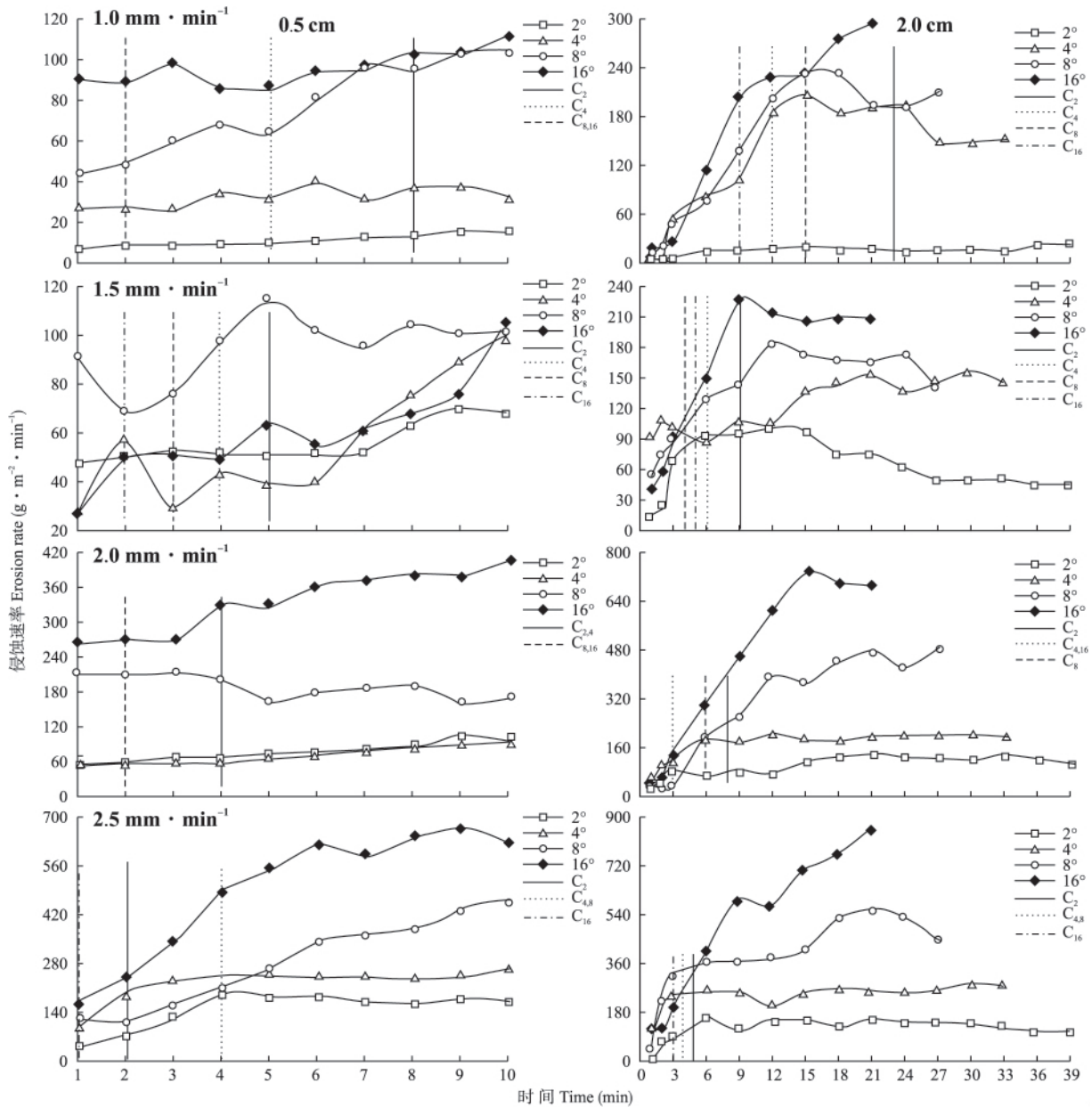


图 4 浮土厚度 0.5 和 2.0 cm 时不同坡度侵蚀速率随时间的变化

Fig. 4 Variation of erosion rate with time at different slope steepness for the regolith thickness of 0.5 and 2.0 cm.

蚀过程出现细沟侵蚀。而在雨强为 1.0 和 2.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时侵蚀速率随产流历时波动较小,在雨强为 2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时先递增后趋于相对稳定。平均侵蚀速率随雨强增大呈显著递增趋势,变化范围为 53.13 ~ 283.92 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,主要是雨强增大导致坡面径流量增大,径流冲刷及搬运能力增强;侵蚀速率随坡度增大显著递增,且在坡度 2° 和 4° 时,侵蚀速率变化较小,而坡度 8° 和 16° 时,侵蚀速率随产流历时波动性显著增强。坡度 2°、4°、8°、16° 时平均侵蚀速率分别为 71.27、94.13、160.11 和 244.13 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,主要是由于坡度增大,水流势能增强。浮土厚度 0.5 cm 时,道路浮土侵蚀过程中“浮土单独侵蚀时段”与“浮土、道路组合侵蚀时段”的侵蚀速率只有在雨强为 2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时差异较明显,但总体均表现为组合侵蚀时段大于浮土单独侵蚀时段。分析可知,平均侵蚀速率与雨强、坡度显著相关,相关系数分别为 0.703 ($P < 0.01$) 和 0.530 ($P < 0.05$)。

由图 4 可知,浮土厚度为 2.0 cm 时,侵蚀速率随产流历时呈先迅速递增随后趋于相对稳定或递增趋势减缓,且坡度越大递增幅度越大。侵蚀速率大致在产流后 9 min 发生转变,其迅速递增主要发生在“浮土单独侵蚀时段”,由于产流初期坡面表层浮土易随水流流失,且雨强、坡度越大,侵蚀量随之增大;“组合侵蚀时段”的径流较稳定,坡度 16° 时,由于坡度大,水流势能强,侵蚀速率仍递增,其他坡度下侵蚀速率相对稳定。“浮土单独侵蚀时段”和“组合侵蚀时段”在坡度 2°、4°、8° 和 16° 下平均侵蚀速率随雨强分别为 8.27 ~ 87.68 和 17.83 ~ 132.60、50.47 ~ 206.09 和 137.17 ~ 256.29、57.83 ~ 263.50 和 162.31 ~ 307.54、76.20 ~ 286.42 和 211.46 ~ 698.84 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ，“组合侵蚀时段”平均侵蚀速率可达“浮土单独侵蚀时段”的 1.6、1.6、2.3 和 2.7 倍。可知,组合侵蚀时段侵蚀较浮土单独侵蚀时段严重,侵蚀速率随坡度增大显著递增,坡度 2° 时的侵蚀速率较小,且在整体产流过程中呈近似平行直线变化,雨强为 1.0、1.5、2.0 和 2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的平均侵蚀速率分别为 14.80、63.53、98.79 和 118.46 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,雨强增大 2.5 倍,侵蚀速率可增大 8.0 倍;随雨强增大,侵蚀速率更易达到稳定,在 1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,只有坡度 2° 明显快速稳定,而雨强为 2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,坡度 2°、4° 和 8° 均在产流不久后趋于稳定,主要是雨强越大,侵蚀断面形成越快,侵蚀速率更易趋于稳定。2 个阶段下,侵蚀速率均随雨强、坡度增大呈显著递增趋势,雨强越

大,坡面形成径流越多,而坡度增大,可以观测侵蚀形式的改变,小坡度时 ($\leq 4^\circ$),主要发生片蚀和细沟侵蚀,而坡度 8° 与 16° 出现整个侵蚀断面不断向坡上方推进,发生类似溯源侵蚀,侵蚀量大大增加。分析可知,浮土单独侵蚀时段的侵蚀速率与雨强呈显著相关,而在组合侵蚀时段,侵蚀速率与雨强、坡度均呈显著相关。可知,在组合侵蚀时段,坡度对坡面侵蚀形式的影响较雨强更加显著,进一步解释了坡度由小增大,侵蚀形式由“片蚀-细沟侵蚀-溯源侵蚀”的转变。

2.3 道路浮土侵蚀阶段产流产沙协同变化

由前述侵蚀临界点可知,87.5% 场次下的单独浮土侵蚀时段的侵蚀量均发生在产流开始后 10 min 内。由表 1 可知,浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时,10 min 次降雨产流量总体随雨强增大显著递增,雨强 2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时可达 1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的 2.7 倍,但 4 种雨强下平均次降雨产流量随坡度增大而递减,坡度 2° 时最大为 18.1 $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$,16° 时为 2° 的 87.2%;而浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时,10 min 的次降雨产流量均随雨强增大显著递增,平均 10 min 产流量为 7.31 ~ 23.32 $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$,雨强 2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时可达 1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的 2.4 ~ 3.0 倍。而随坡度的变化,平均 10 min 产流量均表现为坡度 2° 最小,为 13.6 ~ 18.9 $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$,其原因可能是由于 2° 时坡度较缓,利于降水入渗,而 16° 时,由于坡度大,且侵蚀形式改变导致侵蚀量增加,产流量减少。浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时,10 min 次降雨侵蚀量随雨强 1.0 → 1.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时仅增加 24.4%,而由 1.5 → 2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,递增幅度达 151.3% ~ 328.7%,大雨强会导致严重的侵蚀,随坡度增大,10 min 次降雨侵蚀量也递增,坡度 16° 可达 2° 的 3.4 倍;而在浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时,10 min 次降雨侵蚀量随雨强增大显著递增,且 2 个大雨强是 2 个小雨强的 3.6 倍,随坡度增大递增,递增幅度可达 98.4% ~ 226.4%。分析可知,浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时平均 10 min 次降雨侵蚀量为 1.88 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,可达 ≤ 0.5 cm 的 1.3 倍,而 10 min 次降雨产流量在浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时占 ≤ 0.5 cm 的 91.9%。

浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时浮土单独侵蚀时段产流量随雨强增大呈递增趋势,而在浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时,总体表现为雨强 1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时最大,随雨强增大,递减趋势不显著,随坡度增大而递减,主要是由于坡度增大,径流开始侵蚀路面的时间提前,最大坡度 2° 可达最小 16° 的 1.1 ~ 3.3 倍。随浮土厚度增大而递增,平均产流量为 5.2 ~ 10.7 $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$ 。浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时,浮土单独侵蚀时段侵蚀量随雨强

表 1 次降雨侵蚀过程中 10 min 及浮土侵蚀时段次降雨产流量及侵蚀量

Table 1 Runoff and sediment yield by single rainfall in 10 min and regolith erosion alone stages in erosion process

项目 Item	厚度 Thickness (cm)	坡度 Slope (°)	雨强 Rainfall intensity (mm · min ⁻¹)							
			10 min				浮土单独侵蚀时段 Stage of regolith erosion alone			
			1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5
次降雨产流量 Runoff yield by single rainfall (L · m ⁻²)	0.5	2	8.98	11.72	10.09	8.03	7.03	7.84	7.65	4.86
		4	16.58	15.42	15.63	11.16	5.36	5.37	7.24	9.70
		8	19.70	18.59	19.07	19.64	1.57	4.31	3.72	9.53
		16	27.25	26.30	25.95	24.39	1.41	1.67	3.63	1.70
	1.0	2	8.98	14.15	19.06	21.58	9.96	8.34	3.27	7.77
		4	12.05	17.51	21.62	24.53	9.56	6.82	3.59	6.79
		8	8.33	21.35	22.27	21.87	6.37	7.81	3.82	10.13
		16	9.16	16.49	18.62	25.31	10.13	3.17	6.58	6.13
	2.0	2	4.66	15.24	15.67	18.73	12.36	13.59	11.92	8.36
		4	9.75	17.24	19.22	22.69	12.08	10.24	5.14	8.40
		8	7.61	15.26	17.71	21.20	12.71	6.06	10.18	7.72
		16	7.97	12.42	16.79	21.94	7.04	5.74	4.27	5.46
	4.0	2	7.04	12.71	15.07	21.45	14.02	36.56	10.27	10.24
		4	8.01	15.47	18.79	23.06	4.37	12.14	7.14	9.07
		8	7.61	15.92	17.53	21.83	12.88	14.25	8.32	8.08
		16	6.57	11.39	15.73	22.41	4.12	8.84	5.59	5.73
次降雨侵蚀量 Sediment yield by single rainfall (kg · m ⁻²)	0.5	2	0.11	0.55	0.75	1.45	0.08	0.25	0.25	0.11
		4	0.32	0.55	0.70	2.20	0.14	0.15	0.22	0.75
		8	0.75	0.95	1.87	2.83	0.09	0.24	0.42	0.59
		16	0.95	0.60	3.34	4.88	0.18	0.07	0.53	0.16
	1.0	2	0.20	0.33	1.78	1.28	0.22	0.18	0.35	0.38
		4	0.94	0.76	3.35	2.82	0.78	0.29	0.54	0.57
		8	0.68	1.69	4.63	2.97	0.56	0.49	0.64	1.03
		16	0.33	1.93	5.39	6.55	0.38	0.21	1.53	0.64
	2.0	2	0.12	0.77	0.69	1.11	0.36	0.68	0.49	0.48
		4	0.72	0.98	1.56	2.31	1.17	0.56	0.27	0.77
		8	0.84	1.18	1.70	3.14	2.01	0.35	0.10	0.95
		16	1.22	1.53	2.91	3.99	1.02	0.49	1.13	0.45
	4.0	2	0.22	0.11	1.17	2.54	0.72	0.46	0.71	1.09
		4	1.03	1.15	2.44	2.41	0.53	0.75	0.80	0.96
		8	0.58	1.02	3.25	3.95	0.23	0.87	1.44	1.31
		16	0.88	0.61	3.29	5.05	1.99	0.41	0.97	0.72

表 2 产流产沙与影响因素的 Pearson 相关性

Table 2 Pearson correlation between runoff and sediment yield and rainfall intensity and slope

	浮土单独侵蚀时段产流量 Runoff yield in regolith erosion alone stage		10 min 次降雨产流量 Runoff yield in 10 min under single rainfall		浮土单独侵蚀时段侵蚀量 Erosion yield in regolith erosion alone stage		10 min 次降雨产流量 Erosion yield in 10 min under single rainfall	
	≤0.5 cm	≥1.0 cm	≤0.5 cm	≥1.0 cm	≤0.5 cm	≥1.0 cm	≤0.5 cm	≥1.0 cm
	雨强 Rainfall intensity	0.354	-0.220	-0.133	0.910**	0.528*	0.030	0.703**
坡度 Slope	-0.716**	-0.361*	0.953**	-0.017	0.027	0.253	0.530*	0.443**

* P<0.05; ** P<0.01. 浮土厚度≤0.5 cm 时样本数 n=16, 而浮土厚度≥1.0 cm 时样本数 n=48 The number of samples was 16 when regolith thickness ≤0.5 cm, while 48 when regolith thickness ≥1.0 cm.

增大递增,雨强 2.5 mm · min⁻¹时可达 1.0 mm · min⁻¹时的 3.3 倍 随坡度变化表现先递增后递减趋势 坡度 2°最小为 0.17 kg · m⁻², 仅为最大 8°时的 50.0%. 而在浮土厚度 ≥1.0 cm 时, 随雨强增大平均单独浮土侵蚀时段侵蚀量变化不显著, 雨强 1.0

mm · min⁻¹时最大为 0.83 kg · m⁻², 递减幅度为 6.2% ~ 42.4%, 随坡度增大呈递增趋势, 递增幅度为 30.6% ~ 63.1%. 分析可知, 浮土厚度 ≤0.5 cm 时平均浮土单独侵蚀时段侵蚀量为 0.26 kg · m⁻², 浮土厚度 ≥1.0 cm 时为 0.71 kg · m⁻², 随浮土厚度增

大显著递增,递增幅度可达 107.8% ~ 230.0%,主要可能是由于浮土厚度增大,提供给径流更多的易侵蚀性细颗粒,且浮土单独侵蚀时间延长,进而导致浮土单独侵蚀时段侵蚀量递增。

为进一步明确浮土对道路侵蚀影响,分析可知,浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时,浮土单独侵蚀时段的次降雨侵蚀量、产流量分别占 10 min 次降雨侵蚀量、产流量的 26.6% 和 38.4%,而当浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时,该比例分别为 73.3% 和 69.1%。由表 2 可知,浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时,侵蚀量与雨强相关性显著,产流量与坡度相关性显著,而浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时,10 min 次降雨产流、产沙与雨强显著相关。可知,随浮土厚度的增大,浮土侵蚀量在组合侵蚀中所占的比例增大,而薄层时组合侵蚀中主要还是以道路侵蚀占主导。

3 讨 论

本试验基于野外实地调查和室内人工模拟降雨研究道路浮土侵蚀过程中的产流产沙规律,主要得出以下结论:产流起始时间与道路侵蚀起始时间随雨强、坡度增大而提前,平均产流起始时间为 1.68 ~ 5.09 min,其中,雨强由 1.0 增大至 1.5 mm \cdot min $^{-1}$ 时最显著,可分别提早 55.4% 和 41.9%。郑海金等^[21]通过野外原位试验小区在 3.0 mm \cdot min $^{-1}$ 强降雨条件下得出 4 种农田类型道路产流时间较短,一般 < 2 min;史志华等^[22]通过野外径流小区研究三峡库区土质路侵蚀过程得出仅需要 1 ~ 3 mm 降雨就可形成地表径流,且径流系数超过 60.0%,这与本试验得出结论较一致,主要是由于土质路存在浮土,在雨滴击溅作用下更加分散并形成结皮,进而减小路面入渗能力,导致径流快速发生。

浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时,在产流开始后 2 min 内径流率迅速递增,随后趋于相对稳定,随雨强增大,平均径流率可增大 1.3 ~ 3.1 倍,坡度对平均径流率在雨强 ≤ 1.5 mm \cdot min $^{-1}$ 时较显著,随坡度增大而递减;浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时,径流率在产流开始 3 min 后趋于稳定,平均径流率随雨强线性递增,随坡度增大呈先递增后递减趋势,在坡度 4 $^{\circ}$ 时达到最大,为 1.52 ~ 2.00 L \cdot min $^{-1}$ 。郑海金等^[21]研究表明,径流在产流 2 ~ 6 min 左右趋于稳定,与本试验结论较一致,由于道路被高度压实,入渗能力减弱,表层浮土被冲刷完后,径流冲刷能力与道路抗蚀性能趋于相对稳定,导致径流率变化较小。但申震洲等^[23]通过模拟降雨研究裸地、坡耕地及草地的产流、产沙过

程,结果表明裸地、农耕地的径流量在整个降雨过程中波动显著,在产流初期显著递增,8 ~ 30 min 左右达到波动稳定状态,而草地的产流量始终处于相对较低水平,相同雨强下前两者的径流量可达后者的 7 ~ 40 倍。与坡耕地相比,道路表层土较密实,径流易趋于稳定,而坡耕地由于表层土经长期翻耕,土层松散,侵蚀过程径流波动变化。道路浮土侵蚀过程中侵蚀临界点随坡度、雨强增大呈递减趋势。

本研究中,浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时,侵蚀速率随雨强增大显著递增,变化范围为 53.13 ~ 283.92 g \cdot m $^{-2}$ \cdot min $^{-1}$,递增幅度可达 24.5% ~ 434.4%。2 个小坡度(2 $^{\circ}$ 和 4 $^{\circ}$) 时侵蚀速率随产流历时变化较小,2 个大坡度(8 $^{\circ}$ 和 16 $^{\circ}$) 下平均侵蚀速率是 2 个小坡度的 2.4 倍。浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时,侵蚀速率随产流历时呈先递增后趋于相对稳定或递增趋势减缓,转折点在 9 min 左右,侵蚀速率随雨强、坡度增大显著递增。组合侵蚀时段侵蚀较浮土单独侵蚀时段严重,前者可达后者的 1.6 ~ 2.7 倍。而随坡度增大,可直观发现侵蚀形式发生由“片蚀-细沟侵蚀-溯源侵蚀”的转变,坡度 16 $^{\circ}$ 可达 2 $^{\circ}$ 的 8.0 倍。道路浮土侵蚀过程中,侵蚀速率在初期呈递增趋势,且坡度越大,侵蚀越严重。史志华等^[22]研究认为,土质道路在车辆碾压及人畜践踏积累了较多浮土,导致产流初期泥沙含量高,当浮土被搬运完后,高度压实路面抵抗径流冲刷能力强,含沙量降低,且路面浮土、容重不仅与土壤流失量显著相关,与径流系数也达到显著水平。造成二者差异的原因可能是本试验以浮土流失为研究对象,试验过程中观测及数据分析主要以浮土的侵蚀、流失为主,而史志华等^[22]研究以道路侵蚀为主,其上所覆盖的浮土在路面分布不均且厚度较薄,径流形成初期就会带走道路表层浮土,导致初期形成高含沙水流。

浮土厚度 ≤ 0.5 cm 及 ≥ 1.0 cm 时的 10 min 次降雨产流量、侵蚀量均随着雨强增大显著递增,产流量随坡度变化在浮土厚度不同时存在差异,侵蚀量随坡度增大递增,且浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时平均 10 min 次降雨侵蚀量可达 ≤ 0.5 cm 的 1.3 倍,而平均 10 min 次降雨产流量前者占后者的 91.9%。在浮土单独侵蚀时段,浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时产流量、侵蚀量均随雨强增大呈递增趋势, ≥ 1.0 cm 产流量随雨强、坡度增大而递减,侵蚀量随雨强增大递减,随坡度增大而递增。浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时平均单独浮土侵蚀时段次降雨侵蚀量可达 ≤ 0.5 cm 的 2.7 倍。

在浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时,浮土单独侵蚀时段

87.5%集中在产流开始后 2~5 min, 次降雨产流量、侵蚀量分别占 10 min 次降雨产流量、侵蚀量的 38.4%和 26.6%。而在浮土厚度 ≥ 1.0 cm 时, 浮土单独侵蚀时段 62.5%集中在产流开始后 4~9 min, 当雨强为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 浮土单独侵蚀时段持续 6~23 min, 平均为 12 min, 该时段产流量、侵蚀量分别占 10 min 次降雨的 69.1%和 73.3%。浮土厚度 ≤ 0.5 cm 时, 侵蚀量与雨强相关性显著, 产流量与坡度相关性显著, 而 ≥ 1.0 cm 时, 10 min 次降雨产流、产沙与雨强显著相关。

道路建设使得表土与植被间平衡失调, 减弱土壤抗蚀能力, 且道路用地显著改变原土壤的物理水文性质, 与耕地、林草地、荒地等相比, 土质道路被高度压实, 容重大、饱和导水率低, 加速产流产沙过程^[24]。为有效防治道路侵蚀, 在道路路面种植植被是减少道路水土流失的有效措施, 这方面开展了大量研究, 并获得一定成果: 郑世清等^[25]调查黄土高原山坡道路侵蚀特点, 提出道路防治措施设计及植物措施配置原则及技术体系, 探索适应路面、路坡栽种的草灌种类, 通过对实际植物路的观测研究得出植物路拦土蓄水综合效益可达 62.0%, 且植物路减缓了道路浮土污染危害, 改善生态环境; 李波等^[26]通过多年野外实地调查与路面路段监测结果表明, 植物措施下道路侵蚀较裸露地面侵蚀模数减少 58%~70%, 径流减少 50%~69%; 曹世雄等^[27]认为, 黄土高原地区农田土质道路路面种草, 不仅可以起到防蚀作用, 而且具有较高生态经济价值, 且路面种草后径流量减少 46%~69%, 侵蚀量减少 55%~78%; 赵春红等^[28]通过室内人工模拟降雨方法研究牧草对黄土高原风蚀水蚀交错区的土壤侵蚀效应, 认为根系通过增加坡面泥沙颗粒阻力来实现坡面阻力调控, 而草冠会使坡面形态阻力和波阻力增加; 郑海金等^[21]研究表明, 与裸露土路相比, 碎石道路、泥结石路和植草土路会改变径流的水力学特征, 实现土质道路防护和减少侵蚀产沙的作用, 减沙效益最低可达 40%左右, 并以植草土路的水土保持效果最佳; 张强等^[29]通过室内模拟试验得出, 被草土质路通过增加路面糙度和增大路面阻力可降低水流搬运泥沙的能力, 起到减少路面产沙量的作用, 不同雨强下被草土质路平均减沙效益达 47%。

植物措施对于减少道路侵蚀具有显著效果, 同时可以改善道路浮土污染。史志华等^[30]应用 KIN-EROS2 模型进行拟合发现, 该模型对径流总量模拟效果较好, 实测值与模拟值误差在 4%~15%, 而对

侵蚀量的预测误差较大, 为 5%~32%, 出现偏差的原因可能是建立模型的原始条件以农地或林地为背景, 而土质道路在车辆碾压及人畜践踏下, 地表积累了较多的浮土。由于道路浮土侵蚀径流率及产沙与农地及普通裸露土质路均存在一定差异, 且在侵蚀过程中浮土单独侵蚀时段及浮土、道路组合侵蚀时段的侵蚀程度及方式发生改变, 在进行道路浮土侵蚀预测时, 需将浮土作为一个参数考虑并在模型中有所体现。

参考文献

- [1] Duncan SH, Ward JW. The influence of watershed geology and forest roads on the composition of salmon spawning gravel. *Northwest Science*, 1985, **59**: 204-212
- [2] Croke J, Mockler S. Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia. *Earth Surface Process and Landforms*, 2001, **26**: 205-217
- [3] Wslkirk JM, Riley SJ. Erodibility of road batters under simulated rainfall. *Hydrological Sciences*, 1996, **41**: 363-376
- [4] Rhee H, Fridley JL, Foltz RB. Modeling erosion from unpaved forest roads at various levels of geometric detail using the WEPP model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2004, **47**: 961-968
- [5] Montgomery DR. Road surface drainage, channel initiation, and slope stability. *Water Resources Research*, 1994, **30**: 1925-1932
- [6] Nyssen J, Moeryersons J. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Process and Landforms*, 2002, **27**: 1267-1283
- [7] Liu Y-J (刘窑军), Wang T-W (王天巍), Li Z-X (李朝霞), et al. Effect of different vegetation protection measures on erosion prevention of unpaved roadside slopes in Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2012, **23**(4): 896-902 (in Chinese)
- [8] Dong J-Z (董建志), Zhang K-L (张科利), Liu H-Y (刘宏远), et al. Characteristics analysis and process modeling of runoff yield on the slope of highway construction dump yard. *Journal of Sediment Research (泥沙研究)*, 2012(4): 53-57 (in Chinese)
- [9] Huang P-F (黄鹏飞), Wang W-L (王文龙), Luo T (罗婷), et al. Analysis of hydrodynamics parameters of runoff erosion and sediment-yielding on unpaved road. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2013, **24**(2): 497-502 (in Chinese)
- [10] Xu X-L (徐宪利), Zhang K-L (张科利), Pang L (庞玲), et al. Laws of soil erosion on side slopes of Qinghai-Tibet Highway. *Scientia Geographica Sinica (地理科学)*, 2006, **26**(2): 211-215 (in Chinese)
- [11] Shen B (沈波), Ai C-L (艾翠玲), Xu Y (徐岳), et al. Corrode test of highway impact loess road-

- bed slope surface with man-made rainfall. *Journal of Chang'an University* (长安大学学报), 2004, **24**(6): 11-14 (in Chinese)
- [12] Zhang K-L (张科利), Xu X-L (徐宪利), Luo L-F (罗丽芳). Review and prospect on road erosion research. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2008, **28**(1): 119-123 (in Chinese)
- [13] He Q (何清), Zhao J-F (赵景峰). The studies on the distribution of floating dusts in the Tarim Basin and its effects on environment. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 1997, **17**(2): 119-126 (in Chinese)
- [14] Ackerman SA, Chung H. Radiative effects of air borne dust on regional at the top of the atmosphere. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, **31**: 223-233
- [15] Liu D-S (刘东升). Loess and Environment. Beijing: Science Press, 1985: 313-322 (in Chinese)
- [16] Wen Q (文倩), Dai J-F (戴君峰), Cui W-G (崔卫国), et al. Study and progresses on floating-dust. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2001, **18**(4): 68-71 (in Chinese)
- [17] Wang X-Y (王晓燕), Feng W (冯伟), Song H-Y (宋华旻). Research status of urban road dust pollution. *Environmental Sanitation Engineering* (环境卫生工程), 2011, **19**(1): 7-8 (in Chinese)
- [18] Wang XB, Oenema O, Hoogmoed WB, et al. Dust storm erosion and its impact on soil carbon and nitrogen losses in northern China. *Catena*, 2006, **66**: 221-227
- [19] Fabiano B, Currò F, Reverberi AP, et al. Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. *Process Safety and Environment Protection*, 2014, **92**: 150-159
- [20] Witt PJ, Carey KG, Nguyen TV. Prediction of dust loss from conveyors using computational fluid dynamics modeling. *Applied Mathematical Modeling*, 2002, **26**: 297-309
- [21] Zheng H-J (郑海金), Yang J (杨洁), Zhang H-J (张洪江), et al. Field simulated experiment on erosion processes of different farm roads under a heavy rain in red soil region. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2012, **43**(9): 85-90 (in Chinese)
- [22] Shi Z-H (史志华), Chen L-D (陈利顶), Yang C-C (杨长春), et al. Soil loss and runoff processes on unpaved road from rainfall simulation tests in the Three Gorges Area, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(12): 6785-6792 (in Chinese)
- [23] Shen Z-Z (申震洲), Yao W-Y (姚文艺), Li M (李勉), et al. Study on soil erosion sediment under different underlying horizon. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2010, **17**(1): 6-9 (in Chinese)
- [24] Xu X-L (徐宪立), Zhang K-L (张科利), Liu X-C (刘宪春). A review of research on road erosion. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2006, **25**(6): 52-61 (in Chinese)
- [25] Zheng S-Q (郑世清), Huo J-L (霍建林), Li Y (李英). Hilly road erosion and control on Loess Plateau Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2004, **24**(1): 46-48 (in Chinese)
- [26] Li B (李波), Xu X-X (徐学选), Zhang L-D (张良德), et al. Rural road erosion controlling design and its performance analysis in the loess hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2010, **30**(2): 37-40 (in Chinese)
- [27] Cao S-X (曹世雄), Chen L (陈莉), Gao W-S (高旺盛). Growth characteristics and anti-trample capacity of planting grass on terrene road in loess hilly-gully region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(1): 69-72 (in Chinese)
- [28] Zhao C-H (赵春红), Gao J-E (高建恩), Xu Z (徐震). Mechanisms of grass in slope erosion control in loess sandy soil region of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(1): 113-121 (in Chinese)
- [29] Zhang Q (张强), Zheng S-Q (郑世清), Tian F-X (田凤霞), et al. Runoff and sediment processes and anti-erosion effects of grass-covered earth road in loess hilly region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1785-1791 (in Chinese)
- [30] Shi Z-H (史志华), Fang N-F (方怒放), Li L (李璐), et al. Modeling erosion processes on unpaved roads using KINEROS2. *Geographical Research* (地理研究), 2010, **29**(3): 408-415 (in Chinese)

作者简介 李建明,男,1989年生,硕士研究生。主要从事开发建设项目土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: hahalijianming@126.com

责任编辑 孙菊