

# 间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响

彭遥<sup>1</sup>, 周蓓蓓<sup>1</sup>, 陈晓鹏<sup>1</sup>, 唐湘伟<sup>1</sup>, 陶汪海<sup>1</sup>, 王全九<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 中科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, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 坡面水土养分流失是研究农业非点源污染方面的核心问题, 涉及土壤侵蚀、坡地水文和环境治理等方面的内容。以黄土坡地为研究对象, 利用人工降雨模拟试验, 分析间歇降雨时坡地产流—入渗—土壤侵蚀过程, 以及通过预先在坡地喷施养分( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ), 研究间歇降雨时坡面水土流失以及土壤溶质的迁移规律。试验采用针孔式人工模拟降雨器进行模拟降雨, 对试验坡地间歇性进行3次降雨, 雨强恒为100 mm/h, 每次降雨历时60 min, 降雨间隔时间60 min。结果表明:(1)3次降雨的初始含水率不同, 但产流规律相似, 降雨径流率均为先增大后趋于平稳。(2)3次降雨产生的泥沙累积量分别为250.91, 100.20, 79.76 g, 第1次降雨的泥沙量远高于第2, 3次。泥沙率先迅速增大到峰值然后缓慢减少, 平均泥沙率随降雨次数的增多而递减。(3)对于非吸附性的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+$ , 3场降雨过程中溶质浓度均呈现由高降低并逐渐平稳的变化趋势; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度的变化规律却略显不同, 降雨初期溶质浓度先短暂升高, 然后再由高降低并逐渐平稳。(4)3次降雨的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的径流总流失量分别为535.33, 1058.18, 400.79 mg, 其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量最多,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 流失量最少。随着降雨次数的增加, 不同降雨次数下的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 径流流失量均逐渐减少, 流失量较前次降雨分别降低了19%, 14%, 3%, 62%和57%, 28.3%。因此, 通过对间歇性降雨条件下黄土坡地水土溶质迁移特征的研究, 对揭示降雨—径流—土壤相互作用过程和土壤养分迁移机理具有重要意义。

**关键词:** 人工模拟降雨; 间歇性降雨; 黄土坡地; 水土养分流失

**中图分类号:** S157.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0054-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.009

## Study on the Mechanism of Soil, Water and Nutrient Loss on Loess Slope Under Interval Rain Events

PENG Yao<sup>1</sup>, ZHOU Beibe<sup>1</sup>, CHEN Xiaopeng<sup>1</sup>, TANG Xiangwei<sup>1</sup>, TAO Wanghai<sup>1</sup>, WANG Quanjiu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Soil water and nutrient losses have played an important role in the research on the expansion of non-point source pollution, which also involved in soil erosion, hillslope hydrology and environmental management. Based on the simulated rainfall experiments on loess slope with spray-applied fertilizer ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ), the process of infiltration, soil erosion, and the solute transport process of soil water and solute on slope under interval rain events were investigated. The simulated rainfall experiments were carried out for three interval rain events. Specifically, rainfall intensity was designed as 100 mm/h, and the rainfall lasted 60 min, the rainfall interval was 60 min. Results were as follows: (1) The initial soil moisture content under the three rainfall events were different, but the runoff processes were similar, and the runoff rate showed an increasing trend at first and then tended to be stable. (2) For three interval rain events, the accumulation amounts of sediment were 250.91, 100.20 and 79.76 g, respectively, and the amount of accumulated sediment yield in the 1<sup>st</sup> rainfall events was more than those of the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup>. The curve of sediment rate increased rapidly to the peak and then decreased slowly, and the average sediment yield decreased with the increase of rainfall frequency. (3) The concentrations of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  were changed from high to low and gradually tended to be stable in three rainfalls. Compared with the  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , the

收稿日期: 2017-12-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(51239009, 41371239); 陕西省科技支撑项目(2013KJXX-38); 陕西省自然科学基金项目(2015JQ5161); 西安理工大学特色研究计划项目(2016TS013)

第一作者: 彭遥(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业水土与生态环境研究。E-mail: 302854746@qq.com

通信作者: 周蓓蓓(1982—), 女, 博士, 教授, 主要从事农业水土与生态环境研究。E-mail: happyangle222@gmail.com

concentration of  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  increased at the beginning of rainfall, and then lowered and leveled off. (4) The total loss of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  in surface runoff of three rainfall were 535.33 mg, 1 058.18 mg and 400.79 mg, respectively, and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  have the most loss and  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  have the least. With the increase of rainfall frequency,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  loss decreased gradually under different rainfall times, the loss amount were reduced 19% and 14%, 3% and 62%, 57% and 28.3% than previous rainfalls. The effects of three rain events on yellow soil of loess slope land reveal the interaction of rainfall, surface runoff and soil, and the mechanism of nutrient loss, also provide the scientific basis for control of water and soil erosion.

**Keywords:** artificial rainfall simulation; interval rain events; loess slope; soil, water and nutrient loss

降雨条件下的坡地土壤溶质迁移、养分流失与土壤发生的侵蚀密切相关,土壤侵蚀是指土壤或成土母质在外力作用下被破坏,发生剥蚀、搬运和沉积的过程。降雨事件是导致产生土壤侵蚀的主要原因,通常被称为侵蚀性降雨<sup>[1]</sup>。降雨以径流和入渗的形式参与土壤养分的迁移与流失,其基本物理特性包括降雨量、雨强<sup>[2]</sup>、降雨高度<sup>[3]</sup>、降雨历时、降雨均匀性、降雨的雨滴谱、雨滴动能及动量<sup>[4]</sup>。降雨特性对土壤侵蚀程度有很大影响,国内外学者已对降雨侵蚀进行了大量试验及理论分析,研究了降雨条件下对坡地水土养分流失机制的影响<sup>[5-6]</sup>。田坤<sup>[7]</sup>通过3种不同降雨强度及相对应的4种径流量下的模拟降雨试验,并采用二维模型模拟土壤溶质迁移过程的对流-扩散模型,发现在不同控水条件下土壤溶质流失量与地表径流量呈线性函数关系。陈晓鹏等<sup>[8]</sup>通过研究变雨强对黄土坡地水土养分流失的影响,发现降雨雨强的变化由小到大时导致土壤侵蚀较为严重,当雨强变化为由大到小时地表产流最多,同时养分流失最为严重。马琨等<sup>[9]</sup>通过降雨模拟试验认为土壤养分在大雨强条件下主要以泥沙形式随径流迁移,随着降雨强度变弱,坡面汇流总量加大,坡地冲刷侵蚀能力增强,随泥沙运移的可溶性养分流失更多。王占礼等<sup>[10]</sup>对黄河中游粗砂区黄土坡面薄层水流动力特性进行了试验分析,研究了不同坡度条件和雨强条件下的水流量的水动力特性,发现阻力系数随降雨历时的缩短而减小。赵海滨等<sup>[11]</sup>通过对不同坡度和降雨流量组合下的坡面侵蚀变化研究发现,坡度对流速的影响制约了不同时段径流泥沙量,即坡度越陡,径流速度加快而泥沙产量越平缓,反之亦然。降雨产生的坡面径流是产生土壤侵蚀的主要因素,现今国内外针对连续降雨条件下土壤水土养分流失规律的研究较多,但目前缺乏间歇降雨条件下土壤溶质迁移规律的研究<sup>[12-14]</sup>。

中国黄土高原地区以旱作坡地农业为主,自然降雨大多是以间歇性降雨形式出现,降雨间隔时间随着气压、风带等因素的影响而不同,侵蚀产沙和土壤养分流失也随间歇性降雨历时的改变而改变。关于间歇降雨的研究,张亚丽等<sup>[15]</sup>通过2场间隔24h的模拟降雨试验,改变不同施肥方式,研究黄土坡面土壤

溶质  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  和  $\text{Br}^-$  在间歇性降雨条件下的迁移规律,从而减少雨季土壤养分流失量和降低污染物的排出量。但张亚丽等<sup>[15]</sup>的模拟试验降雨间隔为24h,间隔时间过长,降雨对土壤侵蚀产生的空间变异性较大,效果不明显,且主要探讨养分流失量,并未对径流泥沙量作过多分析。因此,本文在前人关于降雨条件下黄土坡地径流及溶质流失研究的基础上,通过3次间隔1h的模拟降雨试验,对恒定雨强下的坡地产流产沙以及溶质迁移规律进行探讨,为提出有效控制黄土高原水土养分流失措施提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验于2016年7月在中国科学院水土保持研究所神木试验站径流小区进行。该站位于陕西省神木市六道沟小流域(110°21′-110°23′E, 38°46′-38°51′N),为典型的黄土高原沟壑地貌,水蚀风蚀交错带生态环境脆弱区。区域海拔1 094~1 274 m,年降水量437.4 mm,降水相对集中,年际变化显著,年水量变化为108.6~819.1 mm,流域年内降水分配极不均匀,6-9月占全年降水的65%~85%,属于典型的干旱半干旱季风气候。土样取自流域内试验小区,用环刀法测得其容重为1.31 g/cm<sup>3</sup>,将取回的土样进行自然风干后过2 mm筛。利用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪(英国马尔文仪器有限公司制造)对其机械组成进行测定,根据国际制土壤质地分类标准,黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为15.19%, 36.9%, 47.91%,属于砂黄土。土壤结构疏松,抗蚀性差,剧烈的水蚀与风蚀导致生态环境严重退化,土地沙漠化风险增高。

### 1.2 试验小区

试验小区面积为1 m×1 m,共设3组重复,底坡坡度均为15°。土壤表层经过修整,表面无杂草、树枝等障碍物,以及没有明显凸起和蚁洞,3块试验地表面糙度基本相同,坡面平顺。试验装置由供水系统,模拟降雨装置以及径流回收装置3部分构成。为保证试验过程中连续供水,在试验地坡面上方5 m处安置一个300 L塑料水桶,接有软塑料水管,利用落差自然供水,水管另一头安装有水龙头,可调节供

水流量。降雨小区四周用铁片作挡板,插入地表 10 cm 左右进行固定,防止水流流失,在小区径流口处再用铁片安装“V”形汇流口,下方开挖有 30 cm×200 cm×40 cm 的回收槽,里面放有 3 个定制的圆形水桶(内侧标有刻度线),表面径流沿坡面汇集流入水桶,记录水桶中水位高度变化即可(图 1)。

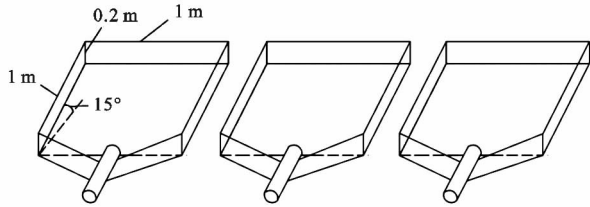


图 1 试验小区示意

野外模拟降雨装置采用西安理工大学自主设计研发的针头式人工降雨器<sup>[16]</sup>,针头式人工降雨器主要由可上下调节高度支架、水槽(包括针头、振动装置)和供水装置 3 部分组成(图 2)。模拟降雨面积为 1 m<sup>2</sup>,降雨器距离地面高度为 1.5 m,通过调节降雨器水箱内水位高度,可控制降雨雨强大小。每次降雨前都需要调节水槽内的水位高度,来反复率定雨强大小。试验测试,该套人工降雨器的平均雨滴直径为 2 mm,降雨时间可任意调节,降雨均匀性系数在 80% 以上,雨滴终点速度满足天然降雨特征。本次试验降雨强度根据当地多年侵蚀性降雨资料,模拟试验雨强大小为 100 mm/h,降雨历时为 60 min。

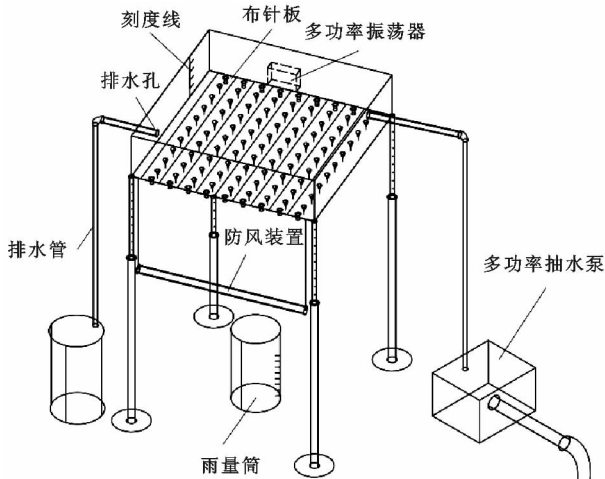


图 2 针孔式人工野外模拟降雨器

1.2.1 模拟降雨过程 在已建设好的试验小区上进行恒定雨强人工模拟间歇降雨产流试验。试验前 3 天,测定各个试验小区养分含量极低且差异不大,可忽略不计。因此需在坡地上均匀喷施 NH<sub>4</sub>Cl、KNO<sub>3</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液(其中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 施量均为 10 g/m<sup>2</sup>),使养分有足够的时间在表层一定深度自然分布。人工模拟降雨开始前,用土钻在小区内随坡面由上至下采集土壤剖面土样,用烘干法来测定土壤初始质量含水率。表层土壤每隔

5 cm 采集 1 次,采样深度为 30 cm,当土壤剖面质量含水率平均值相差在 10% 以内,测定表层土壤质量含水率在 0.03~0.045 范围内,开始模拟降雨试验。间歇性降雨(雨强 100 mm/h)分 3 次进行,第 1 次降雨(历时 60 min)结束后,坡面土壤晾晒 60 min 再进行第 2 次降雨(历时 60 min),结束后,同样在坡面土壤晾晒 60 min 后进行第 3 次降雨(历时 60 min),降雨停止后试验结束。当试验开始后,用塑料桶收集每时段出口处的径流,用高锰酸钾示踪法测定径流速度,每次降雨结束后立即用土钻取土,用称重法测定每个径流桶的重量,待径流液澄清后取上清液测定径流液中各溶解态养分,用烘干法测定土样含水量,浸提土样测定其中含有的养分,倾倒入径流桶内的上清液,待泥沙充分晾干后再测定泥沙重。

1.2.2 样品分析 溶液中养分含量(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)的测定均通过 DR2800 紫外可见分光光度计进行,分别采用纳氏试剂法测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,双波长比色法测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,钼锑抗显色法测定 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P。

纳氏试剂法:取 5 mL 澄清待测液于 50 mL 比色管中,加去离子水至 45 mL,再滴加 1.5 mL 的酒石酸钾钠溶液,充分摇匀,静置 15 min 后,再滴加 1 mL 的纳氏试剂,充分摇匀,最后定容到 50 mL,继续静置 15 min 后用 DR2800 可见分光光度计在 420 nm 处测定吸光度。

双波长比色法:取 1 mL 澄清待测液于 10 mL 比色管中,用 DR2800 可见分光光度计在 203、230 nm 处测定吸光度。

钼锑抗显色法:取 5 mL 澄清待测液(对土壤中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的测定用 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液静提,溶液则不需要)于 50 mL 比色管中,加去离子水至 45 mL,滴加 0.5 mL 的抗坏血酸溶液,慢慢摇动溢出 CO<sub>2</sub>,然后在 30 s 以内滴加 2 mL 的钼锑抗显色剂,摇匀,溢出 CO<sub>2</sub>,静置 30 min 后,用 DR2800 可见分光光度计在 700、880 nm 处测定吸光度。

### 1.3 数据分析

1.3.1 降雨入渗率计算 降雨入渗率的计算是根据王全九<sup>[17]</sup>基于 Philip 公式推广应用至恒定降雨强度下的降雨入渗公式。降雨初期土壤入渗能力大于雨强,随着降雨的持续,当到达某时刻  $t_p$  雨强等于土壤入渗能力时,坡面产生积水,形成径流。其降雨过程中的土壤入渗率计算公式为:

$$i = \begin{cases} p, & t \leq t_p \\ \frac{1}{2} S(t - t_m)^{-0.5}, & t > t_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i$  为入渗率(cm/min); $p$  为降雨强度(cm); $S$  为吸

湿率( $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$ ); $t_m$ 为时间差(min),其中 $t_m=t_p-t_0$ 。

1.3.2 坡地产流计算 坡面水流的水力特性包括坡面流的水流流态、平均流速、平均水深和阻力系数。Lightthill等<sup>[18]</sup>对坡面流采取简化方法,改进了圣维南方程,引出运动波模型:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = p \cos \theta - i \quad (2)$$

$$q = \frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} s_0^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: $x$ 为沿坡面向下轴距离(cm); $t$ 为时间(min); $h$ 为径流深度(cm); $q$ 为单宽流量( $\text{cm}^2/\text{min}$ ); $S_0$ 为坡面坡度( $^\circ$ ); $\theta$ 为坡度倾角( $^\circ$ ); $n$ 为曼宁糙率系数( $\text{min}/\text{cm}^{1/3}$ )。

1.3.3 坡地径流养分流失量计算 描述坡面径流中养分流失量动态变化过程,计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$m(t) = c(t) \times r(t) \quad (4)$$

$$M = \int_0^T m(t) dt = \int_0^T c(t) r(t) dt \quad (5)$$

式中: $m(t)$ 为产流 $t$ 时刻径流养分流失率( $\text{mg}/\text{min}$ ); $c(t)$ 为产流 $t$ 时刻径流养分浓度( $\text{mg}/\text{L}$ ); $r(t)$ 为产流 $t$ 时刻径流量( $\text{L}/\text{min}$ ); $M$ 为径流养分累积流失量( $\text{mg}$ ); $T$ 为产流历时(min)。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面径流随降雨过程的变化

降雨是坡地水土流失和养分流失的主要动力,坡面养分主要以径流的方式流失,深入研究累积径流量及径流率的变化规律,能够更好地帮助分析坡面土壤养分流失过程。由图3、图4可知,3次降雨的累积径流量随着降雨时间的增大而累积,且随着降雨次数的增加,每次降雨产生的累积径流量也有逐渐增大趋势。第1次降雨中随降雨历时的增大,降雨径流率明显呈现出增大的趋势,前期增长幅度很快,随后曲线逐渐变缓并趋于稳定。径流率随降雨过程呈现出这种变化趋势的主要原因是,在降雨刚开始时,土壤含水量较低,土壤的下渗能力很大,降雨大量渗入到土壤之中,同时产生的地表径流较少。随着降雨时间的增加,土壤含水量也在逐渐增加,同时降雨对土壤表面颗粒的击溅作用,使微小土壤颗粒及其他细颗粒物填充表层凹坑孔隙,使得土壤入渗能力迅速减小,地表产生大量径流,径流率的增加速度明显增大。大约经过15 min后,土壤入渗率随着土壤含水量和表层孔隙状况的变化而大致趋于稳定,径流率的变化也趋于稳定,不再增加。后2次降雨的初始土壤含水量较第1次降雨时不同,但降雨产流规律与第1次降雨相似,均可用第1次降雨的过程揭示产流规律。

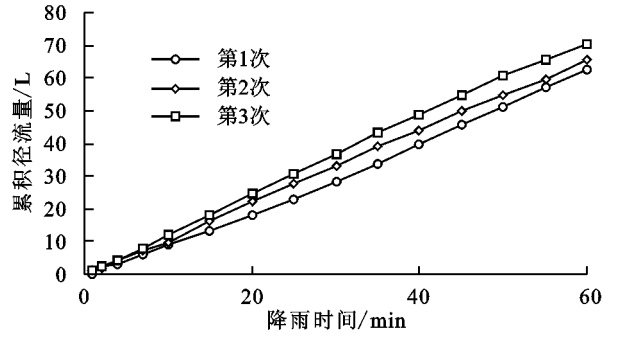


图3 累积径流量随降雨过程的变化

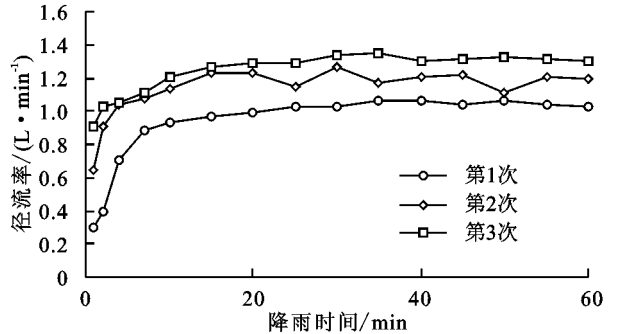


图4 坡面径流率随降雨过程的变化

为分析降雨对坡面径流的影响,对3次降雨过程中累积径流量进行乘幂函数方程进行拟合。由表1可知,利用幂函数对降雨产流变化过程进行拟合的确定系数 $R^2$ 均在0.97以上,拟合效果好且相关关系高。在每次降雨过程中,指数随降雨次数的增加而减小,系数随降雨次数的增加而增大。拟合方程中的系数反映了降雨事件中第1个单位时间的产流率,指数反映了降雨过程对于坡面径流的减流能力。系数随降雨次数的增加而增大,说明降雨次数的增加提高了降雨过程中的初始产流率;而指数却随着降雨次数的增加而减少,说明随着降雨次数的增多,坡面表层土壤的减流能力降低,坡面产流量涨幅增大。

表1 径流产流量随降雨过程的拟合关系

降雨次数	降雨时间/min	拟合方程	相关系数
第1次	60	$J = 0.5683X^{1.1589}$	0.9739
第2次	60	$J = 0.9696X^{1.0335}$	0.9995
第3次	60	$J = 1.1890X^{1.0032}$	0.9990

注: $J$ 为产流量(L); $X$ 为降雨历时(min)。

### 2.2 径流泥沙量随降雨过程的变化

降雨直接打击土壤表面可以使土壤颗粒分散、分离以及发生跃迁位移。雨滴的击溅作用使地表土壤结构遭到破坏,土壤颗粒之间松散,易被径流冲刷。降雨形成的地表径流在坡面流动过程中也会对地表土壤做功,携带土壤颗粒流动<sup>[20]</sup>。由图5可知,第1次降雨的泥沙量增幅急速上升后期逐渐变缓,但一直呈现增加的趋势。第1次降雨累积泥沙量为250.91 g,第2,3次降雨累积泥沙量分别为100.2,79.76 g,第1次降雨产生的泥沙量远远大于第2,3次降雨泥

沙量。主要是由于第 2,3 次降雨时土壤表层被之前降雨雨滴击打、夯实作用下,土壤含水量较高,土壤表面致密层形成,产泥沙量降低。

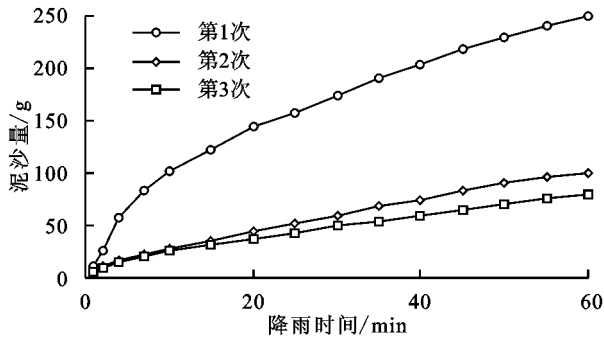


图 5 径流含沙量随降雨过程的变化

由图 6 可知,3 次降雨的径流产沙规律基本相似。降雨初期,单位时间内径流泥沙量一直增大,达到峰值后,慢慢回落减小,期间偶尔会出现一些波动,但不影响总体变化趋势,减小到一定程度时,单位时间内径流泥沙量达到稳定,一直伴随径流输出。值得注意的是,由图 5、图 6 可知,3 次降雨产沙过程不相同,径流泥沙量变化的幅度差异很大,第 1 次降雨时泥沙率为 0.04~0.12 g/mL,最后稳定到 0.06 g/mL,而第 2 次降雨时泥沙率为 0.02~0.04 g/mL,稳定时也在 0.03 g/mL,第 3 次降雨时单位时间泥沙产量更小。同时,3 场降雨过程中的坡地表层土壤产沙状况各异,第 1 次降雨以雨滴溅蚀和片蚀为主,而第 2,3 次降雨中后期还有轻微细沟侵蚀出现<sup>[21]</sup>。综合以上结果分析得出,初次降雨对地表的侵蚀较剧烈,地表松散的土粒被降雨击溅带走,之后随着土壤被雨滴击实,雨水不断渗入土壤中,使得土壤含水量增加,土壤黏粒等小颗粒被雨滴击溅后堵住原来的下渗孔道,甚至出现结皮,阻止了雨滴的进一步击溅作用,雨滴对地表的侵蚀影响作用逐渐减小。待地表形成径流时,径流对于地表土壤颗粒的冲刷成为了产沙的主要方式。每次降雨之间的间歇,土壤表面形成了一层致密层,对地表产生了保护作用,抑制了雨滴的击打作用和径流的冲刷作用。因此,后 2 次的降雨过程中,径流产沙量明显减小,降雨对土壤的侵蚀也逐渐减弱。

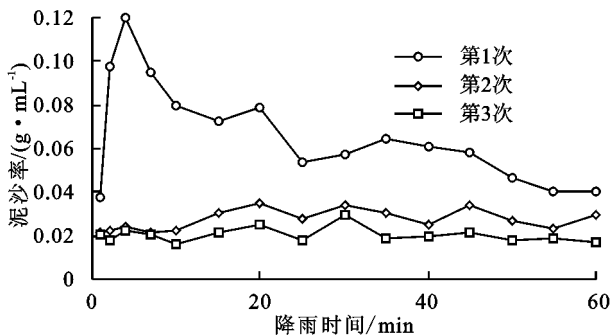


图 6 泥沙率随降雨过程的变化

## 2.3 径流养分浓度随降雨过程的变化

由图 7 可知,在每次降雨过程中,产流初始阶段径流溶质浓度均很高,但快速衰减,第 1 次降雨到 20 min 趋于稳定值,而第 2,3 次降雨仅到 5 min 就趋于稳定值,这主要与降雨产生的径流对表层土壤的冲刷程度有关。

不同养分离子变化趋势因其化学性质不同而表现不一。对于非吸附性的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,3 次降雨过程中溶质浓度均呈现由高降低并逐渐平稳的变化趋势。与第 1 次降雨平稳阶段的浓度相比,第 2 次降雨开始产流时刻溶质浓度明显偏大,但其平稳阶段浓度又均小于前者,第 3 次降雨较第 2 次降雨时,亦呈现此规律。这是由于第 1 次降雨初始阶段,土壤非吸附性离子  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  流失严重,随着径流强度的稳定,径流中离子浓度也趋于稳定,在降雨间歇期土壤水分和溶质进行重新分布,溶质浓度向着梯度最小的状态发展,结果是下层部分的溶质向上运移,致使土壤表层的溶质浓度有所增加。所以,后 2 次降雨初始阶段径流中溶质浓度均大于前次降雨平稳时溶质浓度。由于第 2,3 次降雨土壤表层溶质浓度远小于第 1 次降雨土壤表层初始浓度,且后 2 次降雨径流量均大于第 1 次降雨时,对溶质的稀释作用较大,导致后 2 次平稳时浓度均小于第 1 次平稳时的浓度,第 3 次降雨时平稳期径流中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度已接近于雨水的本底浓度。

而对于土壤吸附性离子  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度的变化规律却略显不同,降雨初期溶质浓度先短暂升高,然后再由高降低并逐渐平稳,但总体趋势主要还是以浓度由高降低为主。土壤对  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  有较强的吸附性,因此其地表流失除了与表层土壤  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的固液相组成比例和降雨径流的冲刷解吸能力等有关外,主要还受坡面侵蚀状况影响。降雨初期表层水溶性  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的含量较高且径流中被雨滴溅蚀分离的土壤颗粒也含有大量养分,因此初始产流时伴随溅蚀程度的增加, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度微有升高,但很快达到最高值,之后逐渐递减并开始趋于稳定。而第 2,3 次降雨地表产流后,径流  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的浓度很快趋于稳定,前后起伏变化不大。对于第 1 次降雨初期径流中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度的升高,可能是由于初期雨水在土壤表层的下渗,带动了表层土壤中的  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  向上迁移,使径流中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  含量呈升高趋势,当土壤含水量增加,雨水下渗运动不明显时, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的流失主要由径流冲刷引起,其浓度呈下降趋势,后来基本趋于稳定。

地表径流中溶质浓度同时取决于表层土壤浓度的含量和地表径流对溶质的解吸溶解能力。初始产

流时,土壤黏粒含量很高,吸附于表层颗粒和存在于土壤液相中的溶质含量相对较高,坡面径流的溶解稀释作用很强,浓度相应较高。随着降雨的持续,表层土壤溶质不断地被雨水淋洗到土层深处或随径流、泥沙迁移,径流溶质含量逐渐降低并趋于稳定。后2次降雨地表产流后,坡面径流量和径流前强度明显高于第1次降雨初期,对溶质的解析溶解能力也相应增加。因此,间歇期内表层土壤溶质含量的变化是后次降雨产流初期地表径流溶质浓度较高的主要原因。

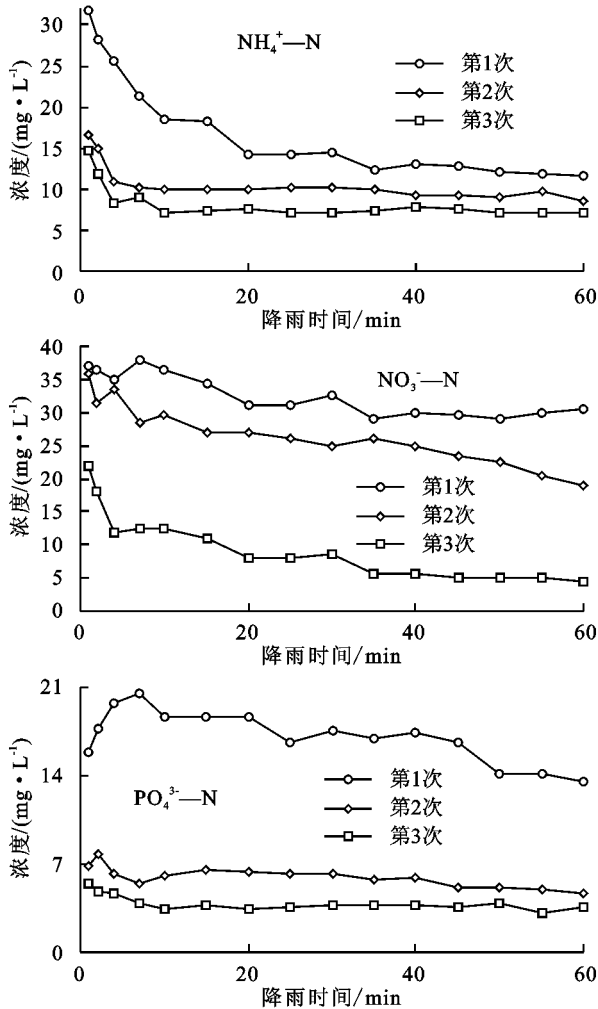


图7 降雨径流溶质浓度随降雨过程的变化

#### 2.4 坡面水土流失及溶质径流流失量分析

降雨引起的土壤侵蚀过程是水土流失的主要原因,坡面降雨产流是一个复杂的过程,降雨对坡面径流和径流携带的泥沙产生很大影响。雨水作为溶解性养分的溶剂,当径流产生后,土壤中的养分会向径流中传递,从而随径流流失。本文中的坡面水土流失特征用间歇降雨条件下的径流深度和泥沙量来表述。由表2可知,随着降雨次数的增加,越易产生地表径流,径流深度较之前1次降雨分别提高了2.7%,4.3%。3次降雨的泥沙累积总量为430.87g,3次降雨的泥沙量分别占总泥沙量的58%,23%,19%,泥沙量随着降雨次数的增加而减少。

降雨对坡面产流、产沙过程有着显著影响,进一步影响径流所携带的养分流失量。对径流溶质流失量进行分析,3次降雨的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 径流总流失量分别为535.33,1058.18,400.79mg,其中 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 流失量最多, $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 流失量最少。进一步分析不同降雨次数下3种离子的径流流失量,随着降雨次数的增加, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 流失量逐渐减少,较前次降雨流失量分别降低了19%,14%,3%,62%和57%,28.3%。试验坡地都经过相同浓度的养分处理,3种溶质流失量间的差异很大程度取决于溶质离子的迁移性、土壤颗粒对其的吸附性及径流对溶质的解吸溶解能力。降雨初期,当土壤开始产流时,降雨和径流对土壤的侵蚀能力较弱,土壤表层氮素随着径流持续下渗,随径流和泥沙而流失的养分较少。薄层水流的紊动随着降雨时间的增大而加大,使得径流与土壤的作用强度增大,因此径流中所释放的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 的含量增加,径流 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 流失量不断累积。与 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 的流失不同的是, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 几乎不发生淋溶损失,并且土壤对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 有一定的吸附能力,因此 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 流失量与 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 相比之下较小,降雨过程中的氮素径流流失以 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 为主。由于土壤对磷的吸附能力较强,从而使得磷在土壤中的垂向迁移能力较弱,因此径流中 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 的累积流失量较少。降雨改变了土壤表层含水量,同时也影响土壤溶质的分布。对于非吸附性的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,前2次降雨就已经使得 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 大量流失,第3次的流失量仅为总流失量的15.7%。对于吸附性强的 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ ,第1次降雨表层水溶性 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 的含量较高且被雨滴溅蚀分离的土壤颗粒携带有大量养分并随径流流失,因此第1次降雨的 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 流失量最高,之后的2次降雨的流失量逐渐递减并逐渐趋于稳定,分别占总流失量的24.7%,17.7%。这可能由于土壤表层经过前期降雨产流冲刷,表面 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 含量不多,以及土壤对 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 有很强的吸附性,因此,尽管第2,3次降雨的径流量增大,溶质流失量也没有呈现明显变化趋势。从表2中溶质的流失量可以看出,对于吸附性弱的溶质,前期降雨对于坡面侵蚀严重,溶质流失量较大;对于吸附性强的溶质,后期的降雨次数对流失量作用不显著。

表2 坡面水土流失和溶质径流流失情况

降雨次数	径流深/cm	泥沙量/g	$\text{NH}_4^+-\text{N}$ 流失量/mg	$\text{NO}_3^--\text{N}$ 流失量/mg	$\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 流失量/mg
第1次	6.76	250.91	213.59	451.66	230.67
第2次	6.94	100.20	172.99	440.31	99.09
第3次	7.24	79.76	148.75	166.21	71.03

### 3 结论

(1)对于土体疏松且易发生侵蚀的黄土地区,土壤含水量很低,首次降雨前期主要以入渗为主,待土壤达到饱和时,表层径流强度基本稳定,泥沙、溶质迁移变化也趋于稳定;经过降雨间歇期后,后 2 次降雨产流达到稳定径流强度的时间缩短,且径流强度增大。相反,泥沙和溶质的稳定迁移量却减少很多,说明相同雨强下相对于连续性降雨,短暂间歇性降雨对于黄土地区的水土流失情况和溶质迁移的程度明显好转一些。

(2)第 1 次降雨时,由于雨滴击溅作用和产流后径流的剪切侵蚀作用,径流泥沙量大,土壤的水土流失情况加剧,降雨侵蚀能力较强,经过一段时间降雨后,表层径流强度稳定,泥沙流失量也趋于稳定;在降雨间歇期过后,第 2,3 次降雨时泥沙流失量明显少于第 1 次。

(3)对于非吸附性的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 3 次降雨过程中溶质浓度均呈现由高降低并逐渐平稳的变化趋势。与第 1 次降雨平稳阶段的浓度相比,第 2 次降雨开始产流时刻溶质浓度明显偏大,但其平稳阶段的浓度又小于前者,第 3 次降雨亦呈现此规律。对于吸附性离子  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ , 降雨初期溶质浓度先短暂升高,然后再由高降低并趋于稳定,但总体趋势还是以浓度由高降低为主。

(4)随着降雨次数的增加,径流深度较之前次降雨分别提高了 2.7%, 4.3%。降雨的泥沙累积总量为 430.87 g, 3 次降雨的泥沙量分别占总泥沙量的 58%, 23%, 19%, 泥沙量随着降雨次数的增加而减少。3 次降雨的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  径流总流失量分别为 535.33, 1 058.18, 400.79 mg, 其中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  流失量最多,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  流失量最少。进一步分析不同降雨次数下 3 种离子的径流流失量,随着降雨次数的增加,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  流失量均逐渐减少,较前次降雨流失量分别降低了 19%, 14%, 3%, 62% 和 57%, 28.3%。

降雨之前在土壤表层施入养分容易随降雨产生的径流大量流失,因此,在雨季来临之前应该避免在久旱的坡耕地表层大量施肥,同时对首次降雨应该采取必要的截流措施,避免土壤非吸附性养分大量流失。此外,雨季里土壤含水量普遍提高,土壤团聚体的稳定性较差,发生土壤侵蚀和吸附性磷流失的风险很大,所以需采取相关措施降低这种流失。

#### 参考文献:

[1] 秦越,程金华,张洪江,等.雨滴对击溅侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2014,28(2):74-78.

- [2] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等.降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究[J].农业工程学报,2007,23(4):39-46.
- [3] 姚文艺,陈国祥.雨滴降落速度及终速公式[J].河海大学学报,1993,21(3):21-27.
- [4] 李长宝,太史怀远.降雨特性对土壤侵蚀影响的研究分析[J].水土保持学报,1990,4(3):21-25.
- [5] Ran Q, Su D, Li P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion [J]. Journal of Hydrology, 2012, 424/425(6): 99-111.
- [6] Jiang F, Huang Y, Wang M, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in Southeast China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(5): 1741-1752.
- [7] 田坤.降雨-径流条件下土壤溶质迁移过程模拟[J].农业工程学报,2011,27(4):81-87.
- [8] 陈晓鹏,周蓓蓓,陶汪海,等.变雨强对黄土坡地水土养分流失机制研究[J].水土保持学报,2016,30(4):33-37.
- [9] 马琨,王兆骞,陈欣,等.不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J].水土保持学报,2002,16(3):16-19.
- [10] 王占礼,高素娟,黄鸣斌,等.黄河中游多沙区坡面薄层水流水动力学特性[J].水土保持通报,2010,30(4):11-16.
- [11] 赵海滨,曹京京,姚文艺,等.黄土坡面径流输沙过程试验研究[J].水土保持研究,2014,21(1):90-94.
- [12] 杨婷.黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移特征试验及数学研究[D].西安:西安理工大学,2013.
- [13] 王辉,王全九,邵明安.人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J].农业工程学报,2006,22(6):39-44.
- [14] 焦平金,许迪,王少丽,等.自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J].农业环境科学学报,2010,29(3):534-540.
- [15] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等.间歇降雨条件下黄土坡面土壤溶质的迁移特征[J].中国农业科学,2009,42(4):1299-1305.
- [16] 周蓓蓓,胡梓超,王全九.一种针孔式防堵塞人工野外模拟降雨装置:中国,ZL201510069492.4[P].2016.
- [17] 王全九.土壤物理与作物生长模型[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [18] Lighthill M J, Whitham G B. On kinematic waves. 1. Flood movement in long rivers. Proceeding of the royal society of London [J]. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1955, 229(1178): 281-316.
- [19] 胡梓超,周蓓蓓,王全九.模拟降雨条件下纳米碳对黄土坡面养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):1-6.
- [20] 贾莲莲.模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀过程与调控试验研究[D].西安:西安理工大学,2010.
- [21] 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等.黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J].土壤学报,2015,52(1):48-56.