

# 单次和间歇性降雨下紫色土坡地壤中硝氮迁移特征

谢梅香<sup>1</sup>, 洪大林<sup>1</sup>, 付 静<sup>1</sup>, 张展羽<sup>2</sup>, 郑成鑫<sup>2</sup>, 张平仓<sup>3</sup>

(1.南京水利科学研究院农村水利研究所,南京 210029;  
2.河海大学水利水电学院,南京 210098;3.长江科学院水土保持研究所,武汉 430010)

**摘要:**为探究不同降雨条件下不同观测时期硝氮在紫色土坡地中的迁移特征,通过室内土槽和人工模拟降雨装置,设置单次降雨和间歇性多次(12次)降雨条件,分别探讨短时期和长时期下的紫色土壤中硝氮迁移特征。结果表明:在单次降雨后短期内紫色土坡地距地表15 cm处土壤水和硝氮均匀地向下距地表35 cm土壤坡脚处迁移,而在间歇性12次降雨条件下,前6次降雨中观测点硝氮浓度由初始345.7 mg/L急速下降至99.7 mg/L;第7次到第9次降雨过程中硝氮浓度由平均值69.7 mg/L缓慢减少至52.0 mg/L,在最后的降雨中趋于稳定不变。随着降雨发生,硝氮在土壤中主要向下迁移,且坡顶处硝氮的迁移幅度最小,壤中流携带流失的硝氮浓度值约为土壤中硝氮浓度值的1/3。整体土壤硝氮流失呈现出初期3次降雨后快速下降的趋势。研究结果从间歇性降雨的全新视角为紫色土坡地硝氮迁移流失特征研究提供依据和参考。

**关键词:** 单次降雨; 间歇性降雨; 土壤水运移; 壤中流; 硝氮迁移; 硝氮流失量

**中图分类号:** S157.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0024-06

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.004

## Characteristics of Nitrate Nitrogen Transport of Purple Sloped Soils in Response to Single and Intermittent Rainfalls

XIE Meixiang<sup>1</sup>, HONG Dalin<sup>1</sup>, FU Jing<sup>1</sup>, ZHANG Zhanyu<sup>1</sup>, ZHENG Chengxin<sup>2</sup>, ZHANG Pingcang<sup>3</sup>

(1.Department of Rural Water Management, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029;  
2.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098;  
3.Soil and Water Conservation Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

**Abstract:** To investigate characteristics of nitrate nitrogen transport in purple sloped soils at different periods under different rainfall events, laboratory soil tanks and simulated rainfall installation were equipped to set each single and total 12 intermittent rainfalls, and nitrate transport characteristics during short and long time periods were discussed respectively. In each soil tank, eight observed points were designed uniformly along the soil profile. The results showed that the soil water and nitrate nitrogen of purple sloped soils transported evenly from the upper 15 cm depth soil layer to the foot slope of lower 35 cm depth soil layer. However, nitrate concentrations of observed points declined rapidly from initial 345.7 mg/L to 99.7 mg/L during the first 6 rainfall events of 12 intermittent rainfalls; mean nitrate concentrations decreased from 69.7 mg/L to 52.0 mg/L during the 7<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup> rainfall event, and tended to stable. As rainfall occurred, nitrate nitrogen transported towards the lower and foot of sloped soils, and the top of slope showed minimal transport. In addition, the nitrate concentration of subsurface outflow was about 1/3 of that of subsurface soil water. Overall, subsurface nitrate loss showed rapid decrease after 3 rainfall events. This research provided better understanding for nitrate transport and loss mechanism of purple sloped farmland as response to intermittent rainfall events, which was from a bran-new perspective.

**Keywords:** single rainfall; intermittent rainfall; soil water transport; subsurface outflow; nitrate nitrogen transport; nitrate loss load

在我国西南区及长江中下游地区广泛分布的坡耕地中, 紫色土坡耕地占据了及其重要的位置<sup>[1]</sup>。在坡耕地农业生产活动中大量的肥料施用给当地的水环境造成了威胁。除此以外, 紫色土是一种由页岩发育而来的浅薄且质地疏松的土壤层, 与土层下面的岩石层形成了独特的“二元结构”, 2 种不同入渗速率的土壤垂直分布和区域性的夏季集中强降雨使得紫色土坡耕地的壤中流极为丰沛。壤中流的运移加快了对土壤中养分携带流失, 尤其对于溶解性强的硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )的携带流失更为显著。大量硝氮随壤中流流失给坡耕地下游水环境造成了严重的污染并减少了土壤中的养分含量<sup>[2]</sup>。因此, 出于水环境保护和提高坡耕地肥料利用效率的目的, 紫色土坡耕地壤中流携带硝氮运移和流失的研究迫在眉睫。

近些年来, 科研工作者们对降雨、坡度、耕作、施肥等影响因子作用下紫色土坡耕地硝氮流失的研究<sup>[3-9]</sup>较为充分, 对壤中流携带硝态氮迁移流失特征也广泛关注。汪涛等<sup>[10]</sup>对紫色土坡耕地硝氮在地表径流及壤中流过程中的分布做了长期的监测, 结果表明, 紫色土硝氮更容易随着壤中流发生流失。龙天渝等<sup>[11]</sup>通过数值模拟手段对紫色土硝氮随壤中流迁移的时空分布特征的研究表明, 全层施肥下硝氮垂直下渗, 基穴施肥下硝氮由穴点向四周扩散。Qian 等<sup>[12]</sup>通过室内降雨试验揭示了紫色土坡地产生流的水力要素与总氮流失的关系。Xie 等<sup>[13]</sup>结合试验与数值模拟方法揭示了间歇性多次降雨下的紫色土坡地中硝氮分布的时空特征。

以往的许多针对降雨对紫色土硝氮流失作用的研究<sup>[14-18]</sup>主要集中在雨强大小方面, 然而对不同雨型和间歇性多次降雨条件下壤中流携带的硝氮迁移、分布和流失过程的研究还较为缺乏。因此, 本研究着重将单次降雨和间歇性多次降雨条件下紫色土坡地土壤中硝氮的迁移特征进行对比分析, 探讨硝氮随壤中流迁移特征在不同时间和空间上对降雨的响应。以期充实紫色土地区坡耕地硝氮随壤中流流失的研究提供更为全面的理论基础, 为减少紫色土地区的面源污染问题提供指导方针。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土样

试验于 2017 年 6—10 月在长江科学院水土流失模拟实验厅开展, 试验采用的土样取自湖北省宜昌市秭归县的王家桥小流域( $110^{\circ}42'00''\text{E}$ ,  $31^{\circ}05'00''\text{N}$ ), 该流域位于长江中上游紫色土地区, 多以种植经济作物的坡耕地为主。该流域地属亚热带季风气候, 年平均降水量 1 100 mm, 降雨主要集中在 6—10 月。

由岩层风化而来的紫色土在流域内占据了主导

地位, 其土壤结构松散且土层较薄。因此, 本次试验取流域距地表 0—40 cm 深度处的紫色土壤为供试土样, 土样的容重为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ , 渗透系数为  $0.049 \text{ cm/min}$ , 有机质含量为  $11.2 \text{ g/kg}$ , 土壤 pH 为 7.8, 铵氮含量  $34.6 \text{ mg/kg}$ , 硝氮含量  $2.9 \text{ mg/kg}$ , 总氮含量  $1 107 \text{ mg/kg}$ ; 土壤粒径分布为砂粒( $>0.05 \text{ mm}$ )54.7%, 粉粒( $0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$ )40.2%, 黏粒( $<0.002 \text{ mm}$ )5.1%。按中国制土壤质地分类方法, 该供试土样为壤土, 普遍代表了流域内分布的紫色土性质。供试土样经风干后过 10 mm 筛为室内模拟降雨试验中土样回填至土槽做好准备。

### 1.2 试验装置

在本次研究中采用的室内模拟降雨装置见图 1。供试土样以 5 cm 厚分层回填到土槽中, 按实际容重进行分层夯实。试验土槽长 2 m, 宽 0.5 m, 深 0.5 m。土槽内壁设置塑料纱网防止回填土与土槽边壁分离, 土槽底部设置 10 cm 厚的水泥层模拟紫色土岩层。在坡脚地表以下 40 cm 处设置“V”形槽来收集壤中出流。土槽下方设置液压坡度调节器, 根据王家桥小流域当地的紫色土坡耕地地形条件, 本次试验中坡度统一设置为  $10^{\circ}$ 。降雨器喷头在土槽正上方距离土壤表面 9 m 左右, 降雨均匀度达 85%。通过抽水泵抽取试验大厅内蓄水池中的自来水进行降雨模拟。由电脑控制终端进行降雨强度的设置, 本次研究根据试验地的降雨特征, 单次降雨试验中分别设置 1, 1.5, 2 mm/min 小、中和大雨强; 间歇性降雨试验中, 共 12 次降雨, 前 3 次降雨强度为  $0.4 \text{ mm/min}$ , 第 4~6 次降雨强度为  $1 \text{ mm/min}$ , 第 7~9 次降雨强度为  $1.8 \text{ mm/min}$ , 第 10~12 次降雨强度依次为 0.4, 1,  $1.8 \text{ mm/min}$ 。每个处理重复 2 次。

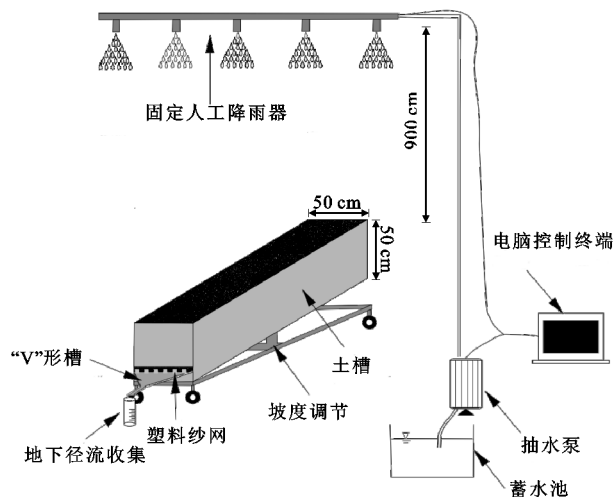


图 1 室内模拟降雨试验装置示意

### 1.3 试验数据采集与分析

在土样回填的过程中布置土槽的土壤水分及氮素浓度观测点, 其中土壤水分通过在观测点埋设的

FDR 探头读取,氮素水样由负压陶瓷头吸取。在本次研究中,土槽内部共设观测点 8 个(图 2),顺着坡度方向均匀分布观测点 4 组,在土槽深度方向上布置观测点 2 组,按位置第 1 层标记为 U1~U4,第 2 层标记为 D1~D4,每个观测点同时观测土壤水分和氮素浓度。壤中流收集过程中记录每次收集的水流体积和持续时间,以及 2 次接样之间的时间间隔。土壤水分读数由电脑终端自动读取,观测点和壤中流水样的硝氮浓度由全自动间断分析仪 SmartChem 200 进行测定。利用 Excel 2010 和 Origin 8.5 软件进行数据处理分析和图表绘制。

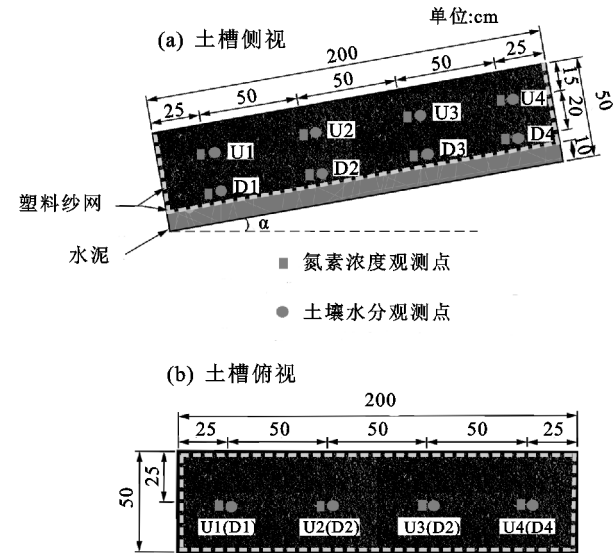


图 2 土槽内观测点布置示意

## 2 结果与分析

### 2.1 单次和间歇性降雨下土壤水运移特征

总体上,土壤水分在单次降雨条件下呈现峰值的变化趋势(图 3),即随着降雨入渗土壤水分由初始值逐渐增长至峰值,然后在短时间内缓慢减小至稳定不变的状态。对比不同雨强下的土壤水分运移发现,雨强越大,土壤水分增长至峰值的速度越快,且峰值越不明显。对比土壤中各观测点的含水量变化情况可以看出,观测点 U1 的土壤水分值增长最快最大,而观测点 D4 的土壤水分值增长最慢最小。除此以外,位于土壤上层观测点的土壤水分变化较下层观测点更为明显,越靠近坡脚处的观测点土壤水分变化越明显。

由图 4 可知,在间歇性降雨过程中各观测点的土壤含水量由初始值  $0.28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  开始逐渐增大,直到第 2 场降雨达到峰值并在之后的每场降雨中呈现相同的峰值变化趋势。与单次降雨中观测点土壤含水量变化特征不同的是,在每场降雨后下层土壤水分更容易保持较高水平。同样,越靠近坡脚处土壤水分越高。

由图 5 可知,在持续的间歇性降雨过程中,壤中流流量过程与施加的降雨过程不一致,在前 3 次小雨

强下壤中流流量逐渐增大,而后在中等雨强降雨过程中壤中流量逐渐减小直至第 7 次大雨强事件中减小至最小值,在最后 5 次降雨事件中随着降雨量的先减小后增大,壤中流流量呈现先增大后减小的趋势。

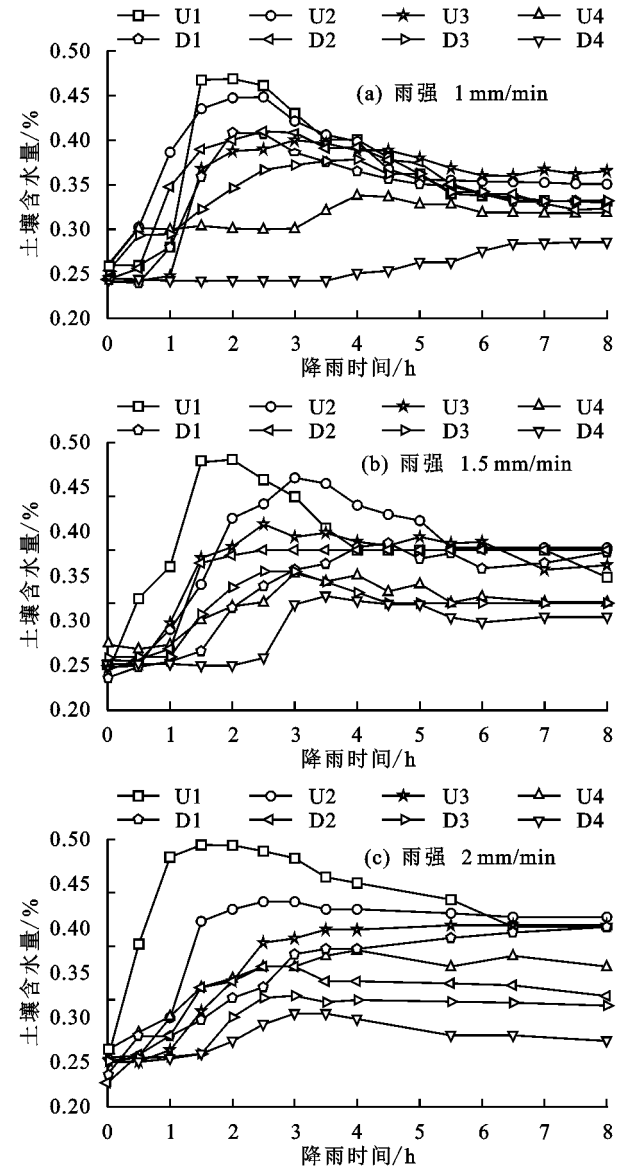


图 3 单次降雨下各观测点土壤含水量变化特征

### 2.2 硝氮的时空分布和迁移特征

由图 6 可知,单次降雨下,土壤上层与下层的硝氮浓度随时间表现出明显的区别。土壤下层观测点的硝氮浓度在降雨后初期随时间减小后趋于不变的态势,而上层观测点的硝氮浓度在降雨后增长然后保持不变。这说明在单次降雨条件下,土壤中的硝氮由上层土壤向下层土壤迁移,最终造成土壤内养分向地下聚集分布的结果。而对于顺坡方向观测点硝氮浓度的变化特征,由上层的 4 个点 U1~U4 可知,越靠近坡脚处硝氮浓度增长越快,并维持在较大值;再比较土壤下层的 4 个点 D1~D4,硝氮浓度变化未呈现空间上规律性的变化。由此可见,在 1 场降雨后紫色土坡地上层土壤的硝氮均匀地向下层土壤坡脚处迁移,

这与土壤水的运移结果具有一致性。再对比各雨强下土壤观测点硝氮的迁移特征, 雨强越大, 硝氮迁移速率越快; 降雨历时越短, 硝氮浓度变化的持续时间越

短, 其中雨强为 1 mm/min 时降雨历时持续了 2 h, 而雨强为 2 mm/min 时历时 1 h, 相应的硝氮浓度的变化分别持续约 4, 2 h。

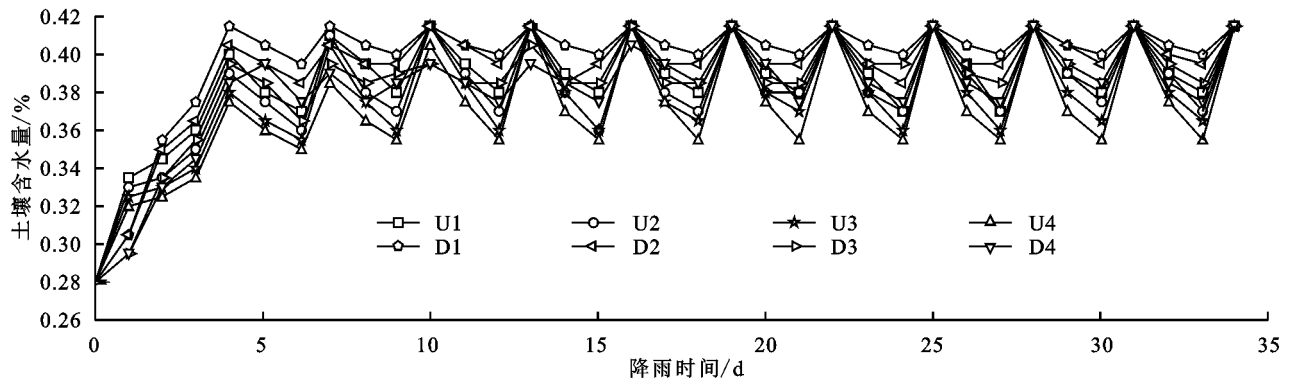


图 4 间歇性降雨下各观测点土壤含水量变化特征

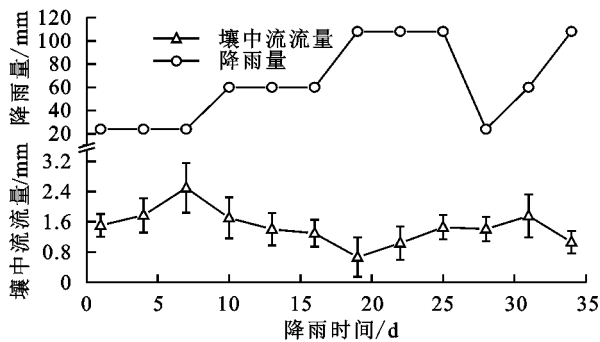


图 5 间歇性降雨条件下降雨量和壤中流流量动态变化特征

图 7 为间歇性 12 次降雨过程中土壤各观测点的硝氮浓度变化特征, 整体上各观测点硝氮浓度随时间呈指数型下降趋势, 在前 6 次降雨中观测点硝氮浓度急速下降, 由初始 345.7 mg/L 的平均浓度值降至 99.7 mg/L; 第 7~9 次降雨过程中硝氮浓度下降速度变慢, 由平均值 69.7 mg/L 减少至 52.0 mg/L, 在最后的降雨中趋于大致稳定不变的状态。降雨雨强对土壤硝氮浓度下降没有显著的影响, 在长期的观测中只要降雨就会带来硝氮含量减少, 减少到最低值时降雨入渗对土壤硝氮的淋洗作用也降至最小。

土壤上层和下层观测点的硝氮浓度未出现明显的分层特征, 但是在沿坡度方向相同位置处的上层观测点的硝氮浓度值小于下层观测点的硝氮浓度值, 且坡顶处 (U4 和 D4) 最明显。说明土壤硝氮在长期的观测中也是向下迁移为主, 这与单次降雨后短期的迁移结果一致。但是在多次降雨条件下顺着坡度方向越靠近坡顶硝氮浓度越大, 越靠近坡顶硝氮浓度下降越慢, 因为在单次降雨中土壤下层坡顶处的硝氮浓度增长最慢, 由此可见坡顶处硝氮的迁移幅度最小。

### 2.3 硝氮随壤中流流失特征

以多次降雨条件下硝氮随壤中流流失情况为主要研究对象, 观察长期的间歇性降雨条件下硝氮随壤中流流失的特征, 是对坡地硝氮流失研究的新补充。由图 8 可知, 由于降雨淋洗作用, 随着降雨次数的增

加硝氮流失浓度降低。其中, 在第 3 次降雨时壤中流流失的硝氮浓度才明显减小, 直至第 4 次降雨后整体上呈现小幅度降低的趋势。流失浓度越大误差也越大, 壤中流携带硝氮流失浓度整体上的下降趋势和土壤内硝氮浓度 (图 7) 的下降趋势一致, 但是个别降雨事件下存在偏差 (第 2, 4, 5, 6 次降雨)。说明土壤内硝氮的含量总体上影响流失浓度大小, 但是流失浓度并不只取决于土壤中硝氮含量, 还与壤中流流量大小有关。一般来说, 由于水流的稀释作用, 壤中流流量越大, 则流失浓度越小。除此以外, 对应图 7 中第 1 次降雨时土壤平均硝氮浓度 345.7 mg/L 和最后 1 次降雨时的 45.8 mg/L, 随壤中流流失的硝氮浓度大小分别为 100.7, 18.6 mg/L。由此可见, 流失硝氮浓度值远小于土壤中的硝氮浓度值。降雨强度的改变对硝氮流失浓度的影响不明显, 但是对硝氮流失总量的影响较为突出。由图 9 可知, 不同降雨强度下硝氮流失负荷表现出明显的差异, 尤其在最后 3 次降雨事件中, 硝氮流失浓度没有明显变化 (图 8), 但是流失负荷却表现出明显的峰值差异。流失负荷整体上也呈下降的趋势, 在初期降雨时流失负荷最大, 第 4 次降雨时急剧变小, 这与流失浓度的变化规律一致。然而, 硝氮流失负荷由流失浓度和壤中流流量 2 部分组成, 流失浓度不变, 流量越大, 则流失负荷越大。

## 3 讨论

鉴于硝氮的可溶性和流动性<sup>[19-20]</sup>, 硝氮在土壤水中的迁移与土壤水的运移过程存在一定的联系。本研究发现, 在 1 场降雨后短时期内硝氮的运移路径和土壤水一致, 这也证明了在坡地土壤中硝氮随水向坡脚而动的迁移特征。Baram 等<sup>[21]</sup>在果园地中硝氮向地下水淋失的研究中同样指出, 地下绝大多数的硝氮迁移是土壤水运移的结果。再比较间歇性多次降雨条件下的土壤水分和硝氮变化特征, 前期每次降雨带来土壤含水量的急

剧增长,这时候土壤硝氮含量由于降雨水分入渗淋洗急速下降。直至土壤水饱和后,在之后的每次降雨过程中都小幅度地增长至饱和值的阶段中(图 4),土壤水中的硝氮含量也是小幅度减小(图 7),这是因为土壤高含水量使得降雨后土壤水的运移幅度减小,从而减弱了对土壤硝氮的淋洗作用。溶解态氮素在薄层紫色土坡耕地中迁移受水文驱动显著<sup>[22]</sup>。

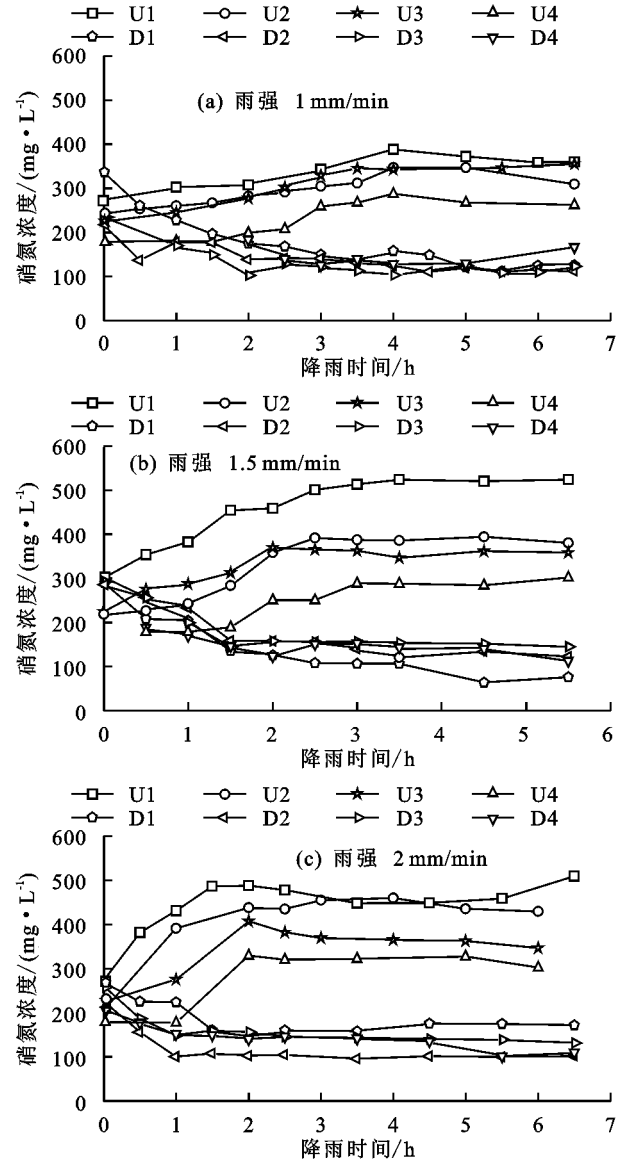


图 6 单次降雨条件下观测点硝氮浓度变化过程

硝氮含量在单次降雨条件下短时期内的增长(图 6)和在间歇性多次降雨条件下长期的指数型减小(图 7)形成了显著的差别,除此以外,降雨后短时期内不同土层深度硝氮表现出明显不同的变化特征,而长期的观测下则没有分层特征。单次降雨后观测时间在 7 h 以内,由于土壤黏性较大、孔隙度较小,因此降雨入渗较慢,只在土壤上层呈现明显的硝氮浓度增大的变化趋势,而土壤下层硝氮浓度在初始阶段表现出小幅度的下降,是由壤中出流携带流失造成,等壤中出流稳定后,短时间内硝氮浓度也趋于稳定。延长观测

时间到降雨后 3 天来看,由图 7 可知,每次降雨均使土壤硝氮浓度明显降低,多次间歇性的降雨使土壤水滞留时间变短,在一次降雨后硝氮被土壤水稀释、携带流失是长期的观测中硝氮浓度不断减小的主要原因<sup>[23]</sup>。整体来看,在前 6 次降雨中土壤观测点硝氮浓度剧烈下降,而后 6 次降雨过程中开始趋于稳定。这说明当土壤中硝氮浓度降低到一定程度时,壤中流携带硝氮流失效果降低。由此可见,虽然单场降雨下的硝氮运移特征与间歇性降雨下的运移特征不同,是因为前者的观测持续时间远小于后者的观测持续时间。总体上来说,每次降雨入渗带来硝氮在土壤剖面的迁移最终都会转化为硝氮随降雨淋洗而流失的结果。

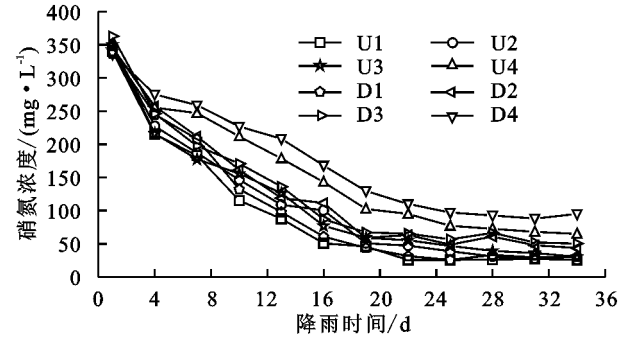


图 7 间歇性降雨条件下观测点硝氮浓度变化过程

图 8 硝氮随壤中流流失浓度的变化特征

图 9 硝氮随壤中流流失负荷的变化特征

李世峰等<sup>[24]</sup>研究表明,包气带的渗透系数不确定性是影响土壤中溶质迁移的一个重要因素。因此,可以解释在本次研究中壤中流携带的硝氮流失浓度和负荷与施加的降雨强度相关性较差与包气带不确定性渗透系数有关。而硝氮流失浓度与流失负荷总体上都趋于一个衰减的趋势,而在后期降雨中硝氮流

失负荷出现一个峰值状态,这与图 5 中壤中流径流量的变化趋势一致,这也印证了硝氮流失负荷由流失浓度和壤中流流量大小 2 部分构成,在流失浓度越小时,流失负荷受到流量的影响越明显。

## 4 结 论

(1) 单次降雨后,随着降雨入渗土壤水分由初始值逐渐增长至峰值,然后在短时间内缓慢减小至稳定的状态。间歇性降雨下,土壤含水量由初始值  $0.28\text{ cm}^3/\text{cm}^3$  开始逐渐增大,直到第 2 场降雨达到峰值并在之后的每场降雨中呈现相同的峰值变化趋势。

(2) 硝氮在单次降雨下的短期迁移与间歇性降雨下的长期迁移呈现不同的变化特征。在多次间歇性降雨条件下的长期观测中各观测点硝氮浓度整体上随时间呈指数型下降趋势,由初始平均浓度值  $345.7\text{ mg/L}$  减小至  $45.8\text{ mg/L}$ 。而单次降雨过后不同深度处土壤观测点的硝氮浓度呈现不同的变化趋势,短期内以上层增长下层减少为主要变化特征。不论施加的降雨条件如何,硝氮在土壤中主要向下迁移,且坡顶处硝氮的迁移幅度最小。

(3) 随壤中流流失的硝氮浓度值是土壤中硝氮浓度值的  $1/3$  左右,壤中流携带硝氮流失负荷受到流失浓度和壤中流流量 2 个变量控制。

### 参考文献:

[1] 郑红丽,韦杰,陈国建,等.三峡库区紫色土坡耕地土壤侵蚀研究:进展与方向[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2014,31(3):42-48.

[2] Jia H Y, Lei A L, Lei J S, et al. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil [J].Agricultural Water Management,2007,89(1/2):89-97.

[3] Yang X L, Zhu B, Li Y L. Spatial and temporal patterns of soil nitrogen distribution under different land uses in a watershed in the hilly area of purple soil, China [J].Journal of Mountain Science,2013,10(3):410-417.

[4] 栾好安,王晓雨,韩上,等.三峡库区橘园种植绿肥对土壤养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):68-72.

[5] 何丙辉,郭甜,姚军,等.紫色土坡耕地不同施肥水平下泥沙中氮、磷流失特征[J].西南大学学报(自然科学版),2012,34(7):1-8.

[6] 苟桃吉,高明,王子芳,等.3 种牧草对三峡库区旱坡地氮磷养分流失的影响[J].草业学报,2017,26(4):53-62.

[7] 王海明,李贤伟,陈治谏,等.三峡库区坡耕地粮经果复合垄作对土壤侵蚀与养分流失的影响[J].水土保持学报,2010,24(3):1-4.

[8] 丁文峰,张平仓.紫色土坡面壤中流养分输出特征[J].水土保持学报,2009,23(4):15-19.

[9] 霍洪江,汪涛,魏世强,等.三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响[J].西南大学学报(自然科学

版),2013,35(11):112-117.

[10] 汪涛,朱波,罗专溪,等.紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J].土壤学报,2010,47(5):962-970.

[11] 龙天渝,刘祥章,刘佳.紫色土坡耕地硝态氮随壤中流迁移的时空分布模拟[J].农业环境科学学报,2015,34(10):1973-1978.

[12] Qian F, Huang J S, Liu J J, et al. Effects of flow hydraulics on total nitrogen loss on steep slopes under simulated rainfall conditions [J].Hydrology Research, 2018,49(4):1088-1100.

[13] Xie M X, Simunek J, Zhang Z Y, et al. Nitrate subsurface transport and losses in response to its initial distributions in sloped soils: An experimental and modelling study [J].Hydrological Processes,2019,33(26):3282-3296.

[14] 林超文,罗春燕,庞良玉,等.不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响[J].中国农业科学,2011,44(9):1847-1854.

[15] 梁斐斐,蒋先军,袁俊吉,等.降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):81-85.

[16] 罗春燕,涂仕华,庞良玉,等.降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):24-27.

[17] Wu L, Peng M L, Qiao S S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil [J].Environmental Science and Pollution Research, 2018,25(S1):3480-3487.

[18] Ding X W, Xue Y, Lin M, et al. Influence mechanisms of rainfall and terrain characteristics on total nitrogen losses from regosol [J].Water,2017,9(3):e167.

[19] Kanthle A K, Lenka N K, Lenka S, et al. Biochar impact on nitrate leaching as influenced by native soil organic carbon in an Inceptisol of central India [J].Soil and Tillage Research, 2016,157:65-72.

[20] 谢梅香,张展羽,张平仓,等.紫色土坡耕地硝态氮的迁移流失规律及其数值模拟[J].农业工程学报,2018,34(19):147-154.

[21] Baram S, Couvreur V, Harter T, et al. Estimating nitrate leaching to groundwater from orchards: Comparing crop nitrogen excess, deep vadose zone data-driven estimates, and HYDRUS modeling [J].Vadose Zone Journal,2016,15(11):1-13.

[22] 鲜青松,唐翔宇,朱波.坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征[J].环境科学,2017,38(7):2843-2849.

[23] Sugita F, Nakane K. Combined effects of rainfall patterns and porous media properties on nitrate leaching [J].Vadose Zone Journal,2007,6(3):548-553.

[24] 李世峰,白顺果,王月影,等.非饱和土壤渗透系数空间不确定性对溶质运移的影响[J].环境工程学报,2015,9(3):1471-1476.