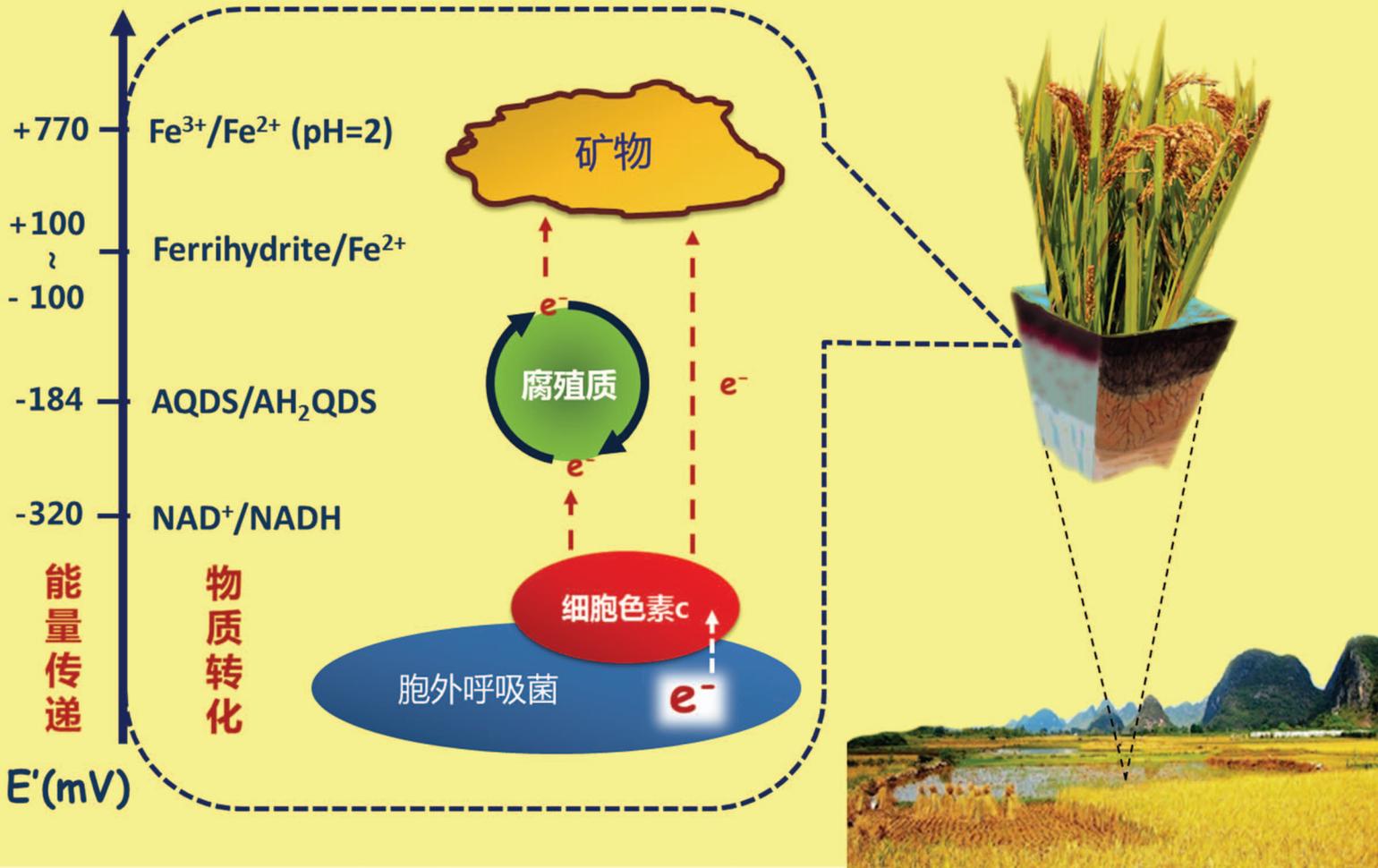


# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

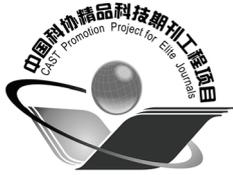


中国土壤学会 主办  
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

## 目 次

### 综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)  
长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

### 新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

### 研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列 $S_3$ 剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)  
基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)  
基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)  
基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)  
鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)  
放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)  
汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)  
咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)  
基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)  
拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张德锂等 (411)  
砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)  
AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)  
激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)  
臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)  
黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)  
水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)  
祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)  
基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)  
适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)  
旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)  
西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)  
加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

### 研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)  
不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

### 信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

DOI: 10.11766/trxb201504280138

# 放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响\*

马美景 王军光 郭忠录<sup>†</sup> 蔡崇法

(华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070)

**摘要** 坡面薄层水流侵蚀不仅造成土壤养分流失, 土壤质量恶化, 同时对水体污染等环境问题造成一定影响。为了分析上方来水流量对红壤坡面径流侵蚀过程中泥沙的迁移规律及土壤溶质迁移特征的影响, 本试验利用室内放水冲刷试验, 采用 3 个不同上方来水流量 (10 L min<sup>-1</sup>、15 L min<sup>-1</sup>、20 L min<sup>-1</sup>) 对第四纪黏土发育红壤坡面径流侵蚀过程中坡面径流泥沙和径流中非吸附性离子 (Br<sup>-</sup>) 迁移过程进行了研究。结果表明: 不同上方来水条件下, 放水初期产流量迅速增大, 后期趋于稳定, 累积径流量与产流时间成显著的线性关系, 10 L min<sup>-1</sup>、15 L min<sup>-1</sup>、20 L min<sup>-1</sup> 三种上方来水流量下累积径流量分别为 263.2 L、295.1 L、291.04 L; 上方来水流量越大, 薄层径流冲刷作用越强烈, 径流含沙量随时间变化波动越剧烈, 累积泥沙量随产流时间呈幂函数变化, 15 L min<sup>-1</sup>、20 L min<sup>-1</sup> 流量下累积泥沙量分别为 10 L min<sup>-1</sup> 流量下累积泥沙量的 1.42 倍、4.25 倍; 径流 Br<sup>-</sup> 浓度随产流时间呈幂函数衰减, 反映了土壤溶质随径流迁移量变化主要受水流与土壤接触时间和作用程度的影响。研究表明放水冲刷对土壤侵蚀及溶质迁移有重要作用, 试验结果对有效预测与控制红壤坡面侵蚀及养分流失具有重要实际意义。

**关键词** 红壤; 放水冲刷; 坡面侵蚀; 泥沙; 溶质迁移

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

我国红壤丘陵区地处热带、亚热带, 包括长江流域的大部分及其南部, 该地区水热资源丰富, 是我国重要的农业生产区域。随着人们对土地资源长期的不合理开发与利用, 该地区土壤遭到严重破坏, 土壤侵蚀造成土壤肥力急剧下降, 阻碍本区农业生产发展<sup>[1-2]</sup>。

坡面是土壤侵蚀发生的基本单元, 因此国内外学者均选用坡面作为研究对象。坡面侵蚀过程包括雨滴击溅和径流冲刷引起的土壤颗粒分离、泥沙输移和沉积三大过程<sup>[3-4]</sup>。以往研究表明, 降雨及其形成的坡面径流是侵蚀发生、发展的主要动力。土壤侵蚀主要是由于径流冲刷所产生的, 降雨溅蚀也必须通过径流进行运输<sup>[5]</sup>。细沟侵蚀是水土流失

的主要产沙源泉, 细沟流的形成过程就是一个产沙过程<sup>[6]</sup>。水土流失导致土壤中大量的化学物质随地表径流迁移, 造成土地质量下降, 同时引起江河湖泊的面源污染, 因此, 研究土壤溶质随地表径流迁移特征及控制方法是提高土地生产力和控制面源污染的一个重要方面<sup>[7]</sup>。

目前, 国内外对坡面土壤侵蚀及养分流失研究已做了大量工作, 并取得一定效果, 主要集中在降雨、坡度、植被覆盖度等因素对坡面侵蚀及养分流失的影响<sup>[8-12]</sup>, 也有一部分学者通过上方来水试验研究水力学参数对土壤侵蚀的影响<sup>[13-16]</sup>, 而薄层径流驱动下红壤坡面侵蚀过程及土壤溶质随地表径流迁移特征研究仍处于初级阶段, 有待进一步

\* 国家自然科学基金项目 (41401303) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41401303)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zlguo@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 马美景 (1989—), 男, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理方面研究。E-mail: mameijing2008@163.com

收稿日期: 2015-04-28; 收到修改稿日期: 2015-11-17

深入研究。本文从分析不同上方来水流量下红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征入手,初步探讨红壤坡面产流产沙特征及溶质迁移规律,为进一步研究该坡面侵蚀的动力学机制和土壤迁移机制奠定基础,对南方红壤丘陵区的农业生产有实际参考价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置

模拟试验装置由以下3大部分组成:①供水装置,主要由蓄水池、水泵、阀门和水管组成,水泵

可以通过阀门控制流量;②放水冲刷装置,主要由稳流箱和阀门组成,稳流箱由两块不锈钢板分成三级消能稳流槽,使水流均匀平稳流入试验土槽;③模拟试验土槽和塑料容器,土槽采用厚度为8 mm的钢板制造而成,土槽的坡度在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 内可以灵活调节。图1显示了试验模拟系统。

本试验在湖北省华中农业大学人工模拟降雨大厅进行。冲刷流量参考前人研究的红壤坡面侵蚀性降雨强度的范围及情况,结合本试验冲刷槽尺寸,设计 $10 \text{ L min}^{-1}$ 、 $15 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$  3个流量水平,总供水量300 L。试验土槽有效面积为 $1.5 \text{ m}^2$ ,其长 $\times$ 宽=3 m $\times$ 0.5 m,土槽深度为0.35 m。

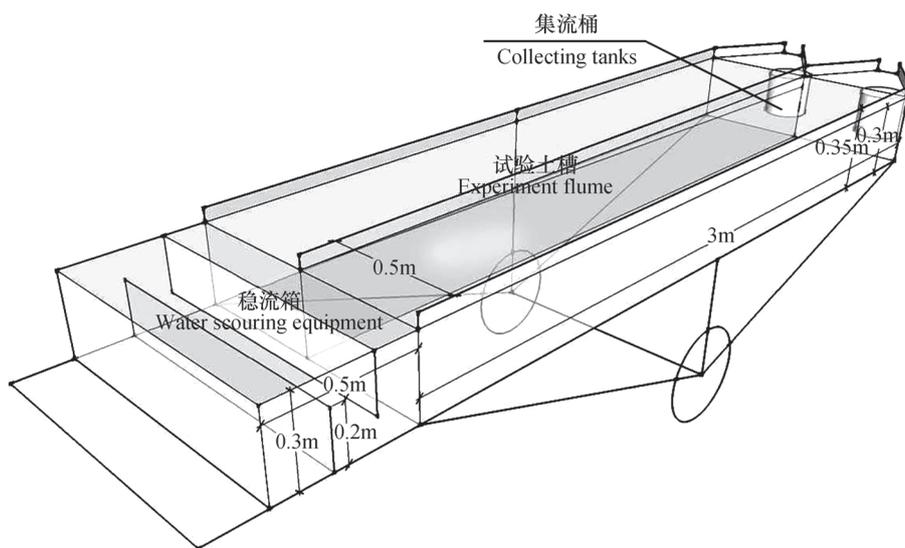


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental set

### 1.2 供试土壤

本试验供试土壤来源于湖北省咸宁市贺胜桥镇,该区是红壤的北缘,东南高,西北低。该区属于亚热带季风湿润气候,年均温度 $15 \sim 17^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量1300 mm左右。该区成土母质以第四纪黏土和泥质类页岩为主,土地利用类型以林地为主,耕地次之。本试验选取第四纪红黏土发育林地红壤,采取0~20 cm的表层土,去除石块、根系等杂质后风干,过5 mm和2 mm孔筛网备用。土壤性质测定采用土壤分析的常规方法<sup>[17]</sup>,pH采用1:2.5土水比电位法,有机质采用重铬酸钾外加热法,机械组成采用吸管法,容重采用环刀法,土壤性质见表1。

### 1.3 土壤制备与装填

土槽底部铺设一层20 cm厚的细沙,沙层上部铺一层透水粗棉纱布,以确保下垫面土壤性质的变

异性达到最小。为了控制填土过程土壤密度保持一致,采取分3层填土,边填边压实,每层5 cm,表层是过2 mm筛的土样,下两层是过5 mm筛的土样,填装上层土壤前,抓毛下层土壤表层,防止出现分层现象<sup>[18]</sup>,每种放水流量冲刷试验结束后更换最上层5 cm土壤进行下一次试验。填装土壤容重控制在 $1.35 \text{ g cm}^{-3}$ ,接近田间自然状况。土壤初始容积含水量为30%,坡度控制为 $10^{\circ}$ 。

### 1.4 示踪溶质 $\text{Br}^{-}$ 的表施方法

试验前要在试验土槽上表施溶质KBr溶液,表施 $\text{Br}^{-}$ 的含量水平为 $80 \text{ g m}^{-2}$ 。具体的喷施操作为:用定量的去离子水先将KBr配成溶液,然后用准备好的喷雾器将之均匀地喷施在供试土槽土壤坡面上,喷洒程度以雾状为宜,同时应尽量防止或避免喷射到试验区域以外或离土壤表面太近而造成扰

表1 土壤基本性质

Table 1 Basic properties of experiment soil

土壤类型 Soil types	容重 Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	有机质 Organic matter ( $\text{g kg}^{-1}$ )	pH	机械组成 Particle composition (%)		
				砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
红壤 Red soil	1.37	13.91	5.47	12	45	43

动。表施结束后放置12 h后开始放水试验。

### 1.5 模拟试验过程

打开供水设备, 调节控制上方来水流量至试验设定水平进行试验。自坡面产流开始, 30 s收集径流样, 前10 min每隔1 min收集1个径流样, 其后每隔2 min收集1个径流样, 烘干法测定泥沙量(精度0.01 g), 同时量筒量取径流体积(精度0.01 L)。量尺法测定坡面细沟变化过程, 颜色示踪法( $\text{KMnO}_4$ 溶液)测定坡面表层流速(精度 $0.01 \text{ m s}^{-1}$ ), 测量时从坡面底端的坡段开始, 依次往上坡进行, 这样可避免上坡 $\text{KMnO}_4$ 残留溶液对下坡观察造成干扰, 依次连续循环测量土槽坡面距坡顶3、2和1 m处3个位置的断面水流流速, 本试验坡面平均流速为表层流速乘以相应的折减系数得到(层流取0.67, 紊流取0.8)。酚红分光光度法测定径流溶质 $\text{Br}^-$ 的浓度( $0.01 \text{ mg L}^{-1}$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 上方来水流量对径流流速的影响

表2显示不同上方来水流量下坡面水流流速的空间分布特征。由表2可以看出, 不同上方来水流量条件下的坡面流速均呈现坡上、坡中、坡下流速递增趋势, 这与Govers<sup>[19]</sup>, Nearing等<sup>[20]</sup>, 刘和平等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。Govers和Nearing等的研究发现, 在侵蚀细沟内, 水流流速与坡度无关, 仅是流量的简单函数。刘和平等的研究表明, 流量与

流速关系十分密切, 多呈幂函数增长。随着流量的增大, 水流流速增大, 径流具有更大的能量, 侵蚀随之加剧。究其原因, 首先重力沿坡面向下的分力作用使径流流速存在一个加速度, 距离坡顶距离越大, 水流流速增加越大<sup>[22]</sup>; 其次随着坡位下移, 细沟内汇集的径流量增大, 水流厚度相应增大, 降低了下垫面对径流的阻碍作用; 最后侵蚀沟的形态也会影响流速的变化。

### 2.2 上方来水流量对产流速率、产沙速率的影响

不同上方来水流量作用下坡面产流产沙规律如图2所示。从图2a可以看出, 三种上方来水流量下径流量的变化规律相似, 即放水初期径流量迅速增长, 随着放水时间的持续, 径流量增长速度趋于缓慢, 之后趋于稳定, 但具有一定的波动性,  $15 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$ 的波动更为显著。这与模拟降雨条件下坡面产流过程变化特征相似。径流量和入渗量有密切关系, 在总径流量一定的情况下径流量与入渗量之间呈负相关, 土壤的入渗能力随着入渗的持续逐渐降低, 入渗速率逐渐减小, 所以产流速率随时间呈增加趋势<sup>[23]</sup>。上方来水流量对产流速率影响显著, 上方来水流量越大, 产流速率越快。当上方来水流量为 $10 \text{ L min}^{-1}$ 、 $15 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$ 时, 对应的产流速率变化范围分别为:  $2.87 \sim 9.36 \text{ L min}^{-1}$ 、 $12.89 \sim 15.82 \text{ L min}^{-1}$ 、 $17.28 \sim 21.26 \text{ L min}^{-1}$ , 说明当径流流量达到稳定时上方来水流量主要表现为产流。

从图2b可以看出, 径流过程中产沙量呈波动

表2 不同上方来水流量条件下坡位平均流速

Table 2 Mean surface runoff velocity at the down slope as affected by volume of the flow coming from the upperstream

上方来水流量 Inflow rate ( $\text{L min}^{-1}$ )	坡面流速Flow velocity ( $\text{m s}^{-1}$ )			
	坡上Upper slopes	坡中Middle slopes	坡下Lower slopes	平均值Average
10	0.18	0.22	0.24	0.21
15	0.28	0.29	0.36	0.31
20	0.32	0.34	0.38	0.35

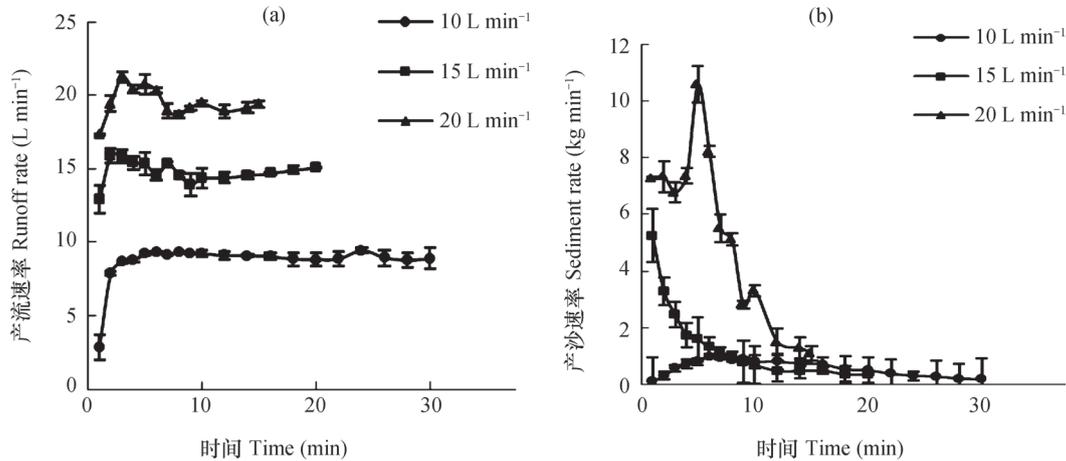


图2 坡面产流产沙特征

Fig. 2 Runoff and sediment yielding along the slope

性变化, 上方来水流量为 $10 \text{ L min}^{-1}$ 时, 产沙量变化趋势表现为先增大后减小, 最后基本保持稳定状态; 上方来水流量为 $15 \text{ L min}^{-1}$ 和 $20 \text{ L min}^{-1}$ 时, 产沙量的峰值出现在试验开始阶段, 随后表现为逐渐波动减小趋势, 最后达到稳定状态。原因是当上方来水流量较大时, 径流冲刷作用强烈, 坡面侵蚀发育迅速, 随着细沟的发育和松散物质被剥蚀, 地面物质对泥沙的补给能力下降, 产沙量下降, 细沟发育成熟时, 径流侵蚀能力达到稳定, 坡面输沙达到稳定。本试验研究结论与王全九等<sup>[24]</sup>研究结果并不一致, 王全九等在对黄土坡面侵蚀过程研究中指出, 当上方来水流量为 $10 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$ 时侵蚀产沙量随放水时间变化平缓, 当上方来水流量为 $30 \text{ L min}^{-1}$ 、 $40 \text{ L min}^{-1}$ 时侵蚀产沙量随放水时间变化强烈, 且整体呈现减小趋势。经分析, 造成这一差异的主要原因是红壤结构与黄土结构差异较大, 在相同外界条件下, 呈现出不同的抗蚀效果。王辉

等<sup>[25]</sup>研究结果表明, 流量介于 $0.7 \sim 3.3 \text{ L min}^{-1}$ 之间时, 产沙量随时间呈现先增大后减小的趋势。通过对比发现, 在 $10 \text{ L min}^{-1}$ 和 $15 \text{ L min}^{-1}$ 之间存在一个临界流量值, 当上方来水流量小于临界流量时, 产沙量随时间呈先增大后减小的趋势, 当上方来水流量大于临界流量时, 产沙量随时间呈逐渐减小的趋势。主要原因是当上方来水流量较小时, 冲蚀能力较弱, 径流挟沙能力较小, 产流初期产流量较低; 随着上方来水流量的增大, 冲蚀能力增强, 导致坡面极易形成侵蚀沟, 此外, 上方来水流量的增大使径流挟沙能力增强, 相应的挟沙量也增大, 因此产流初期产沙量较大。

### 2.3 上方来水流量对累积产流量、累积产沙量的影响

为进一步分析上方来水流量对坡面产流产沙的影响, 研究了不同上方来水流量下, 累积产流量和累积产沙量随时间的变化特征 (见图3)。

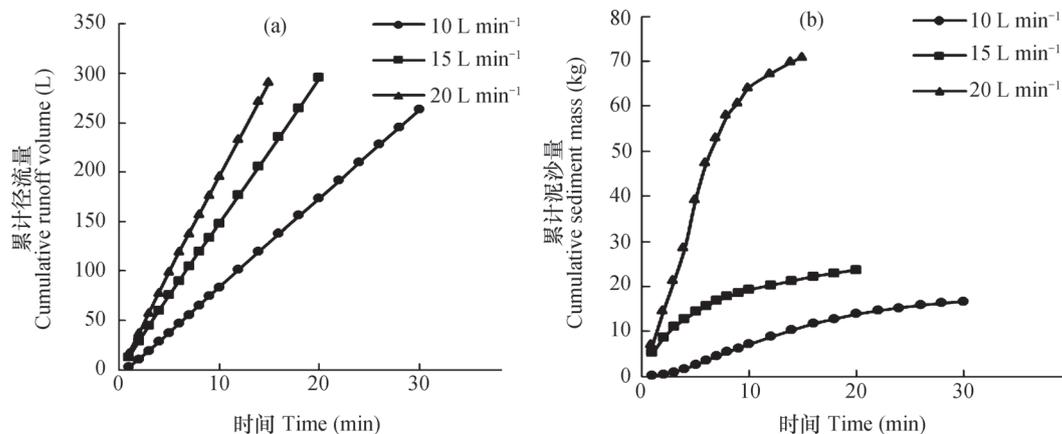


图3 累积径流量和累积泥沙量变化特征

Fig. 3 Change in cumulative runoff and sediment mass

由图3a可知,不同上方来水流量条件下,累积径流量随放水时间呈显著的线性变化( $R^2 > 0.99$ ),累积径流量曲线的斜率随放水流量的增大而增大。当上方来水流量为 $10 \text{ L min}^{-1}$ 、 $15 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$ 时,对应的累积径流量分别为 $263.2 \text{ L}$ 、 $295.1 \text{ L}$ 、 $291.0 \text{ L}$ 。

上方来水流量不仅影响坡面的入渗和产流能力,还影响坡面的侵蚀产沙量。从图3b可以看出,累积泥沙量与产流时间呈幂函数增加( $R^2 > 0.96$ ),上方来水流量越大,增加的幅度越大,主要是因为侵蚀沟形成过程中泥沙含量较高,随着侵蚀沟发育成熟,侵蚀泥沙逐渐减少。相同

的放水历时,上方来水流量越大相应的累积泥沙量也就越大;放水总量相同时,当上方来水流量为 $10 \text{ L min}^{-1}$ 、 $15 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$ 时,对应的累积泥沙量分别为 $16.70 \text{ kg}$ 、 $23.73 \text{ kg}$ 、 $70.96 \text{ kg}$ 。

将不同上方来水条件下累积泥沙量和累积径流量的相互关系进行函数拟合和对比,发现累积泥沙量和累积径流量的函数关系均满足幂函数 $y = Ax^B$ (式中: $y$ 为累积泥沙量, $x$ 为累积径流量),所有方程相关系数均在 $0.97$ 以上,这与于国强等<sup>[26]</sup>的研究结果一致,累积泥沙量和累积径流量之间的关系方程列于表3中。

表3 累积泥沙量和累积径流量拟合关系

Table 3 Fitting relationship between cumulative sediment volume and cumulative runoff volume

上方来水流量 Inflow rate ( $\text{L min}^{-1}$ )	幂函数拟合 Power function fitting	
	拟合方程 Fitting equation	$R^2$
10	$y = 0.0382x^{1.1429}$	0.986**
15	$y = 1.7682x^{0.4721}$	0.981**
20	$y = 0.7346x^{0.9738}$	0.974**

注: \*\*表示在 $0.01$ 水平上达到极显著差异 Note: \*\* indicates significant difference at  $p < 0.01$  level

#### 2.4 上方来水流量对径流含沙量的影响

土壤侵蚀中径流含沙量是土壤侵蚀研究的基本参数,对水土流失治理和耕地质量评价具有重要意义。径流的含沙量会受到泥沙侵蚀—搬运—沉积这一物理作用变化过程的影响,还会受到径流本身多少的影响。

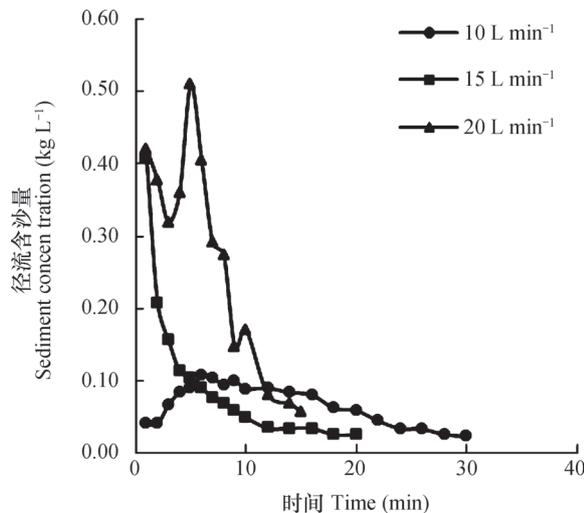


图4 径流含沙量变化特征

Fig. 4 Change in silt content of runoff with time

图4反映了不同上方来水流量条件下径流含沙量变化特征。不同上方来水流量条件下径流含沙量的变化趋势不同。小流量时( $10 \text{ L min}^{-1}$ ),径流含沙量历经前 $6 \text{ min}$ 的增加后,出现逐渐减小的特点,变化范围为 $0.02 \sim 0.11 \text{ kg L}^{-1}$ ;较大流量时( $15 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$ ),径流含沙量持续较小。产流初期径流含沙量随流量的增大而增大,接近输沙稳定时较大流量( $15 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$ )的径流含沙量均小于小流量( $10 \text{ L min}^{-1}$ )的径流含沙量,对应的径流含沙量分别为 $0.02 \sim 0.41 \text{ kg L}^{-1}$ 、 $0.06 \sim 0.51 \text{ kg L}^{-1}$ 。产流初期,流量越大,径流含沙量越大,但是当径流输沙率达到稳定时, $15 \text{ L min}^{-1}$ 、 $20 \text{ L min}^{-1}$ 的径流含沙量均小于流量为 $10 \text{ L min}^{-1}$ 的径流含沙量。分析主要原因为地面物质补给是径流含沙量变化的重要原因,径流过程初期主要以搬运表层松散物质为主,细沟发育成熟时,泥沙主要来源于水流对土壤颗粒的机械破坏。这与王文龙等<sup>[27]</sup>研究结果一致,说明上方来水对土壤侵蚀具有较大的冲刷作用,造成严重的土壤侵蚀。

## 2.5 上方来水流量对坡面径流溶质浓度的影响

上方来水流量反映了坡面土壤的供水强度, 在没有降雨影响的放水试验条件下, 改变上方来水流量就相当于改变了坡面土壤的供水强度, 这样就会使输入整个土-水系统的水量和能量发生改变, 从而影响到坡面土壤溶质迁移的整个过程。为了便于分析, 本文着重研究在其他因素相同的条件下, 改变上方来水流量对坡面溶质迁移特征的影响。

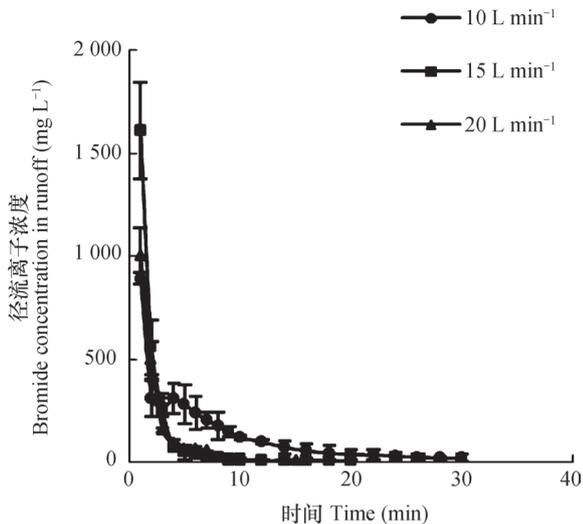


图5 径流溶质Br<sup>-</sup>浓度变化特征

Fig. 5 Change in bromide concentration in runoff with time

图5显示了不同上方来水流量下径流Br<sup>-</sup>浓度变化特征, 总体表现为: 放水初期径流溶质Br<sup>-</sup>浓度较高, 随着放水时间的持续, 径流溶质Br<sup>-</sup>浓度迅速衰减, 之后逐步衰减至一个较小的浓度值, 造成这一现象的主要原因是细沟产生后, 薄层径流主要汇集在细沟内, 与表层土壤Br<sup>-</sup>相互作用减弱。放水冲刷初期, 当流量为15 L min<sup>-1</sup>时, 径流Br<sup>-</sup>浓度高于其他处理, 主要原因是径流溶质浓度受土壤溶质本底值和径流量的双重影响。

本试验中, 流量对径流溶质Br<sup>-</sup>浓度随产流时间的动态变化过程与王辉等<sup>[26]</sup>研究结果不一致, 王辉等试验结果表明, 在坡度为8°, 上方来水流量介于0.7~3.3 L min<sup>-1</sup>时, 径流溶质Br<sup>-</sup>浓度随产流时间呈先升高后降低趋势。试验结果差异性可能是由于试验条件(坡度、流量)不同造成的, 可见, 坡面溶质迁移是一个复杂的过程, 需要进一步开展研究。

对不同上方来水流量下径流溶质Br<sup>-</sup>的浓度变化曲线进行拟合分析, 发现径流溶质Br<sup>-</sup>的浓度与冲刷作用时间的函数关系均满足幂函数 $y=Ax^B$ , 指数函数 $y=Ae^{Bx}$ (式中:  $y$ 为径流溶质Br<sup>-</sup>的浓度,  $x$ 为冲刷作用时间), 拟合结果如表4所示。径流溶质Br<sup>-</sup>浓度的衰减曲线利用幂函数拟合结果较好, 决

表4 上方来水流量下径流溶质Br<sup>-</sup>浓度变化曲线的拟合关系

Table 4 Fitting relationship between Bromide concentration in runoff at downslope and incoming flow from upperslope

上方来水流量 Inflow rate (L min <sup>-1</sup> )	幂函数拟合Power function fitting		指数函数拟合Index function fitting	
	拟合方程Fitting equation	R <sup>2</sup>	拟合方程Fitting equation	R <sup>2</sup>
10	$y=1\ 251.6x^{-1.14}$	0.920**	$y=459.3e^{-0.118x}$	0.954**
15	$y=1\ 503.8x^{-2.021}$	0.959**	$y=297.9e^{-0.252x}$	0.721**
20	$y=1\ 620.8x^{-2.136}$	0.938**	$y=559.98e^{-0.366x}$	0.869**

注: \*\*表示在0.01水平上达到极显著差异 Note: \*\*indicates significant difference at  $p < 0.01$  level

定系数均达到0.90以上, 而相同条件下利用指数函数拟合效果较差。这说明对于不同上方来水流量下径流溶质Br<sup>-</sup>的浓度随时间的变化过程, 利用幂函数可以更好的反映其衰减过程。

Guo等<sup>[28]</sup>的研究结果表明上方来水流量(10 L min<sup>-1</sup>、20 L min<sup>-1</sup>、30 L min<sup>-1</sup>、40 L min<sup>-1</sup>)条件下, 径流溶质Br<sup>-</sup>的浓度随时间变化主要分为两个阶段: 一是产流初期(0~10 min) Br<sup>-</sup>的浓度迅速

衰减; 二是10 min后Br<sup>-</sup>的浓度逐渐稳定。指数函数和幂函数均可拟合Br<sup>-</sup>浓度与时间的关系, 但幂函数拟合效果更好。

通过与Guo等试验结果对比分析得出, 上方来水流量条件下, 红壤坡面溶质迁移特征与黄土坡面相似, 但坡面红壤流失率更快。建立幂函数模型可以更好地描述非饱和土壤溶质流失特征。

### 3 结 论

通过室内上方来水模拟薄层径流冲刷试验, 对比分析了不同上方来水流量条件下, 径流流量、径流含沙量以及径流溶质随时间变化动态过程, 反映了上方来水流量对坡面侵蚀产流产沙以及溶质随径流迁移的影响。得出以下主要结论: (1) 不同上方来水流量条件下, 产流产沙均呈现为波动性变化过程, 上方来水流量越大坡面产流量越大。泥沙量表现为: 小流量下波动比较平缓, 流量较大时, 产流初期波动剧烈, 随着侵蚀过程的稳定, 泥沙量趋于一个稳定值。累积产沙量与累积径流量呈较好的幂函数关系。(2) 放水冲刷作用下, 不同上方来水流量下径流溶质浓度随产流时间有相似的变化规律, 主要分为两个阶段: 产流初期0~5 min迅速衰减, 5 min后径流溶质浓度变化缓慢, 趋于一个较低的浓度值。通过拟合方程可以看出上方来水流量作用下, 幂函数可以描述溶质衰减特征。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 赵其国, 徐梦洁, 吴志东. 东南红壤丘陵地区农业可持续发展研究. 土壤学报, 2000, 37 (4): 433—442  
Zhao Q G, Xu M J, Wu Z D. Agricultural sustainability of the red soil upland region in southeast China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37 (4): 433—442
- [ 2 ] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响. 土壤学报, 2007, 44 (4): 577—583  
Yan F L, Shi Z H, Cai C F, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on Ultisols (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (4): 577—583
- [ 3 ] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究. 土壤学报, 2000, 37 (1): 9—15  
Zhang K L, Tang K L. A study on hydraulic characteristics of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37 (1): 9—15
- [ 4 ] 吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究. 土壤学报, 2012, 49 (6): 1235—1240  
Wu F Z, Shi Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1235—1240
- [ 5 ] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究. 水科学进展, 2006, 17 (4): 444—449  
Li P, Li Z B, Zhen L Y. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2006, 17 (4): 444—449
- [ 6 ] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯, 等. 冲刷条件下坡面水流速度与产沙关系研究. 土壤学报, 2004, 41 (6): 876—880  
Xia W S, Lei T W, Zhang Q W, et al. Relationship between velocity of slope flow and sediment generation during erosion (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (6): 876—880
- [ 7 ] 郭太龙, 王全九. 黄土坡面土壤侵蚀中溶质随地表径流迁移的水动力特征研究. 水土保持学报, 2008, 22 (5): 18—25  
Guo T L, Wang Q J. Study on hydro-dynamic properties of soil solute in runoff on different loess slope (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22 (5): 18—25
- [ 8 ] Ahuja L R, Sharpley A N, Lehman O R. Effect of soil slope and rainfall characteristics on phosphorus in runoff. *Journal of Environmental Quality*, 1982, 11 (1): 9—13
- [ 9 ] Arnaez J, Lasanta T, Ruiz-flaño P, et al. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93 (2): 324—334
- [ 10 ] 鲁克新, 李占斌, 张霞, 等. 室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究. 水土保持学报, 2011, 25 (2): 6—9  
Lu K X, Li Z B, Zhang X, et al. Experimental study on law of runoff-erosion-sediment yield under indoor simulated rainfall condition (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (2): 6—9
- [ 11 ] 胡建, 郭太龙, 卓慕宁, 等. 华南红壤坡面产流产沙过程模拟降雨试验研究. 生态环境学报, 2013, 22 (5): 787—791  
Hu J, Guo T L, Zhuo M N, et al. Erosion processes on red soil slope in south China under simulated rainfall system (In Chinese). *Ecology and Environment Science*, 2013, 22 (5): 787—791
- [ 12 ] 和继军, 龚辉力, 李小娟, 等. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响. 水科学进展, 2014, 25 (1): 90—97  
He J J, Gong H L, Li X J, et al. Effects of rill development on runoff and sediment yielding processes (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2014, 25 (1): 90—97
- [ 13 ] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil

- detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55 (2): 339—344
- [14] 雷俊山, 杨勤科. 坡面薄层水流侵蚀试验研究及土壤抗冲性评价. *泥沙研究*, 2004, 6 (12): 22—26  
Lei J S, Yang Q K. Experimental research on sheet flow erosion of loessial slope and evaluation on soil anti-scourability (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2004, 6 (12): 22—26
- [15] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 坡面流水力学参数对团聚体剥蚀程度的定量影响. *水科学进展*, 2012, 23 (4): 502—508  
Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. Quantitative effects of hydro-dynamic parameters on abrasion extent aggregates by overland flow (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2012, 23 (4): 502—508
- [16] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究. *水科学进展*, 2002, 13 (2): 159—166  
Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2002, 13 (2): 159—166
- [17] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012: 1—54  
Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012: 1—54
- [18] 王辉, 郭文康, 宁清钱, 等. 地表坡度对坡面溶质随薄层水流迁移特征的影响. *农业现代化研究*, 2010, 31 (3): 360—364  
Wang H, Guo W K, Ning Q Q, et al. Effect of slope gradient on properties of solute transport process with shallow flow (In Chinese). *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31 (3): 360—364
- [19] Govers G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17 (5): 515—528
- [20] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24 (8): 677—686
- [21] 刘和平, 王秀颖, 刘宝元. 人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布. *地理研究*, 2011, 30 (9): 1660—1668  
Liu H P, Wang X Y, Liu B Y. Study on rill and interrill flow velocity along hillslopes with simulated rainfall (In Chinese). *Geographical Research*, 2011, 30 (9): 1660—1668
- [22] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含沙量的关系. *农业工程学报*, 2011, 27 (3): 73—78  
Li J L, Cai Q G, Sun L Y, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (3): 73—78
- [23] 吴冰, 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究. *中国水土保持科学*, 2011, 9 (1): 99—103  
Wu B, Zhu Y J, Shao M A. Flow velocity and processes of runoff and sediment generation on soils containing gravels (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9 (1): 99—103
- [24] 王全九, 王辉, 郭太龙. 黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移特征与数学模型. 北京: 科学出版社, 2010: 66—75  
Wang Q J, Wang H, Guo T L. Feature and mathematical model of the soil solute transport with runoff on loess slope (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010: 66—75
- [25] 王辉, 汤佳浩, 李志明, 等. 上方来水流量对坡面土壤溶质迁移特征的影响. *灌溉排水学报*, 2011 (4): 57—60  
Wang H, Tang J H, Li Z M, et al. Effect of flow rates on properties of solute transport process of slope red soil with shallow flow (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011 (4): 57—60
- [26] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究. *水科学进展*, 2010, 21 (5): 593—599  
Yu G Q, Li Z B, Li P, et al. Effects of vegetation types on hillslope runoff-erosion and sediment yield (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2010, 21 (5): 593—599
- [27] 王文龙, 李占斌, 李鹏, 等. 神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究. *水土保持学报*, 2004, 18 (5): 68—71  
Wang W L, Li Z B, Li P, et al. Scouring experiment on residues of Shenfu Dongsheng Coalfield during exploitation (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (5): 68—71
- [28] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, et al. Sediment and solute transport on soil slope under simultaneous influence of rainfall impact and scouring flow. *Hydrological Processes*, 2010, 24 (11): 1446—1454

## Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow

MA Meijing WANG Junguang GUO Zhonglu<sup>†</sup> CAI Chongfa

(*Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*)

**Abstract** The subtropical red soil hilly region in South China, rich in hydrothermal and soil resource, is one of the most important grain production regions, playing a key role in development of the agricultural economy of the country. With the economy developing so fast, human activities in the region are getting too intensified, leading to destruction of large tracts of natural vegetation and consequently, declining soil and water conservation capacity. Abundant rainfall in the region causes large volumes of surface runoff eroding the thin soil layers on the slopes, which not only results in soil nutrient loss and soil quality degradation, but also brings about serious environmental problems in the lower reaches of the river valleys. Therefore, it is imperative to develop researches of mechanisms of the soil erosion and nutrient translocation for conservation of the red soil resources.

In order to understand influences of shallow clear-water flow scouring on soil erosion and solute transport, a laboratory scouring experiment, designed to have three scouring inflow rates ( $10 \text{ L min}^{-1}$ ,  $15 \text{ L min}^{-1}$  and  $20 \text{ L min}^{-1}$ ), was conducted on artificial slopes of red soil derived from quaternary red clay and effects on the transport processes of non-sorbed chemicals (bromine) in runoff and sediment during the processes of soil erosion caused by surface runoff were evaluated. Results show that flow velocity of the runoff on the slope surface increased with increasing volume of the incoming flow from the upper slope; no matter how the flow conditions were in the upper slope, runoff yielding rate increased rapidly at the initial water releasing stage and then tended to level off; an apparent linear relationship was observed between cumulative runoff volume and duration of runoff yielding; when water flew down at a rate of  $10 \text{ L min}^{-1}$ ,  $15 \text{ L min}^{-1}$  and  $20 \text{ L min}^{-1}$  from the upper slope, the cumulative runoff volume reached 263.2 L, 295.1 L and 291.04 L, respectively; the higher the volume of the flow from the upper part, the stronger the scouring effect of the sheet surface runoff; sediment content in runoff fluctuated sharply with time, especially at the initial runoff scouring stage ( $0 \sim 5 \text{ min}$ ); when water flew down at a rate of  $15 \text{ L min}^{-1}$ , sediment yielding rate dropped drastically with time, whereas when water flew down at a rate of  $20 \text{ L min}^{-1}$ , sediment yielding rate displayed a trend of rising first and then declining;  $20 \text{ L min}^{-1}$ ; cumulative sediment volume changed with time, showing a power function relationship; the cumulative sediment volume when water flew down at  $15 \text{ L min}^{-1}$  and  $20 \text{ L min}^{-1}$  was 1.42 times and 4.25 times that when water flew down at  $10 \text{ L min}^{-1}$ , respectively; at the initial runoff scouring stage ( $0 \sim 5 \text{ min}$ ); the higher the water flow rate, the higher the sediment content in runoff; sediment content in runoff varied with time in a pattern similar to that sediment yielding did in and sediment yielding rate decreased gradually with the time going on regardless of how the flow rate was. Concentration of bromide decreased as a power function of the duration of runoff-yielding; especially at the initial 4 minutes of runoff scouring, concentration of bromide decreased significantly. All the findings indicate that the loss of soil solute with surface runoff depends mainly on degree and time of the interaction between soil and runoff.

Based on the comparative analysis of effects of water flow rate from upper slopes on variations of volume

of runoff, sediment content in runoff and soil solute in runoff with time, it is concluded that both runoff and sediment productions vary in a wavy pattern no matter how the water flows; the higher the water flow rate, the higher the runoff yielding rate on the slope. Sediment yielding rate acts differently. It is quite flat in fluctuation when the water flow rate is low, fluctuates drastically at the initial runoff yielding stage when the water flow rate is and tends to level off when erosion gullies gradually develop in shape. Cumulative sediment volume is a power function of cumulative runoff volume. Concentration of soil solute in runoff displays a similar relationship with duration of runoff production, regardless of how water flow rate is. Variation of soil solute concentration in runoff can be divided into two stages: rapid decline at the initial runoff yielding stage (0 ~ 5 min) and slow decline to a low value after 5 min. Through fitting with equations, it is found that the equation of power function can be used to describe the characteristics of solute attenuation in runoff. The findings of the experiment have some great practical significance to effective prediction and control of soil erosion on red soil slopes and soil nutrient loss with the erosion.

**Key words** Red soil; Runoff scouring; Slope erosion; Sediment; Solute migration

(责任编辑: 檀满枝)

CONTENTS

**Reviews and Comments**

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review ..... WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu ( 290 )  
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review ..... WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. ( 303 )

**Insights and Perspectives**

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science ..... CAI Zucong, HUANG Xinqi ( 310 )

**Research Articles**

- Element Migration in S<sub>3</sub> Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication ..... CHU Chunjie, ZHAO Jingbo ( 320 )  
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation ..... LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. ( 330 )  
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared ( VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation ..... LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. ( 340 )  
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm ..... WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. ( 353 )  
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei ..... DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. ( 363 )  
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow ..... MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. ( 373 )  
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area ..... WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. ( 386 )  
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ..... ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang ( 399 )  
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method ..... LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong ( 409 )  
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa ..... GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. ( 419 )  
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size ..... YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. ( 426 )  
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols ..... LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. ( 436 )  
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ..... ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao ( 448 )  
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil ..... KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. ( 455 )  
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region ..... CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. ( 466 )  
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil ..... HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. ( 475 )  
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ..... ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. ( 488 )  
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ..... ZHENG Yan, JIA Zhongjun ( 500 )  
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn ..... MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. ( 508 )  
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator ..... WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. ( 521 )  
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet ..... SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. ( 531 )  
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil ..... KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. ( 542 )

**Research Notes**

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite ..... YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. ( 550 )  
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol ..... MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. ( 559 )

**Cover Picture:** Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation ( by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu )

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：卢 萍 檀满枝 陈荣府

## 土 壤 学 报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

编 辑 《土壤学报》编辑委员会  
地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008  
电话：025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总发行 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717  
电话：010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址：北京 399 信箱 邮政编码：100044

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

