

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.004

# 坡面流速及侵蚀产沙空间变异性试验

田培, 潘成忠, 许新宜, 杨帆, 李长嘉

(北京师范大学水科学研究院水沙科学教育部重点实验室, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 在野外放水试验条件下, 利用染色法和侵蚀针法分别观测坡面流速和侵蚀产沙空间变异性。结果表明, 坡面各横向断面的流速与距坡顶距离之间呈正相关, 且相关性随流量增大逐渐变得显著, 纵向断面流速的变异程度明显强于横向断面。总体上, 上、下坡位侵蚀程度较重, 而中坡位最轻; 小流量时沉积作用明显, 大流量时距坡顶 0~2 m 范围为净侵蚀区; 各坡段侵蚀量与其距坡顶距离之间呈负相关; 发生泥沙沉积部位随流量增大逐渐下移, 细沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的比例随流量增大不断增加。试验条件下流速为 0.30 m/s 时, 细沟侵蚀产沙大于细沟间侵蚀, 且坡面侵蚀量迅速增大。随流量增大, 流速和侵蚀产沙量呈增大趋势; 但在流量较大时, 坡面各坡位侵蚀量与流速呈负相关, 这可能与坡面中下部位粗颗粒泥沙沉积以及含沙水流的挟沙能力基本达到饱和有关。

**关键词:** 坡面流; 空间变异; 流速; 侵蚀; 山坡

**中图分类号:** S157.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)02-0178-09

土壤侵蚀是降雨径流侵蚀力与土壤抗侵蚀力之间相互作用的过程, 侵蚀强度的大小不仅与土壤自身性质有关, 而且与作用于地表土壤的侵蚀营力有关<sup>[1-2]</sup>。坡面流是土壤侵蚀的主要动力, 也是泥沙输移的载体; 坡面流的水力学特性及其空间分布对于坡面侵蚀和泥沙输移过程具有重要影响<sup>[3-5]</sup>。流速是重要的坡面流的水力学参数, 随降雨或冲刷历时延长, 径流量沿坡面向下逐渐增大, 流速也随之增大, 但阻力的存在会限制流速增加, 这导致流速随坡长变化表现出一定的空间变异性<sup>[6-8]</sup>。相关研究发现流速在坡度较大条件下往往沿下坡方向增大, 但增大幅度有所差异<sup>[9-10]</sup>; 以往研究多在室内进行, 针对野外天然坡面流速空间变异性的报道还相对较少。坡面侵蚀产沙与细沟形成密切相关, 而细沟发育具有一定随机性, 故侵蚀产沙空间分布亦具有随机性和复杂性<sup>[4, 11]</sup>。以往对侵蚀产沙的研究往往关注总侵蚀产沙量或整个坡面平均侵蚀状况, 不能很好地区分坡面不同空间部位侵蚀、沉积及产沙状况<sup>[12-13]</sup>, 且对于坡面流速和侵蚀产沙的空间变异, 特别是二者对应关系的描述还相对较少<sup>[14-16]</sup>。侵蚀针法是一种简单易行的侵蚀监测方法, 坡面侵蚀前后侵蚀针出露高度的变化可以直观并准确地反映不同空间部位侵蚀沉积状况, 适宜于野外实地观测<sup>[17-18]</sup>。

本研究采用径流小区观测法结合侵蚀针法, 开展径流冲刷试验, 探讨不同流量条件下坡面流速和侵蚀产沙空间变异性及二者的对应关系, 以为今后这方面研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室怀柔野外实验站(40°20'N, 115°37'E)进行。实验站位于官厅水库北侧丘陵沟壑、高台地和滩地的小流域上, 地处怀涿盆地, 属于半干旱大陆季风型气候区, 土壤类型多样, 多年平均降雨量为 413 mm, 降雨主要集中在 6~9 月。在实验站选取一块地表较均匀、排水通畅

收稿日期: 2014-08-05; 网络出版时间: 2015-03-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150316.1453.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41271285; 51309007)

作者简介: 田培(1988—), 男, 湖北大悟人, 博士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: tianpei@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 潘成忠, E-mail: pancz@bnu.edu.cn

的坡地, 该坡地属于丘陵区, 由坡耕地撂荒后演替而来, 且有部分杂草覆盖。于 2013 年 5 月去除杂草后进行坡面平整, 7 月在坡地上建立径流小区, 水平投影坡长 5 m、坡宽 2 m, 坡度 25°。小区土壤主要为风积粉细砂质土壤, 质地疏松, 容重约 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水率约 13.0%。小区表层土壤的机械组成如表 1 所示。

表 1 小区表层土壤的机械组成

Table 1 Particle size distribution and median diameter of surface soil in the runoff plot

粒径/mm	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.02	0.02~0.002	<0.002
百分比/%	1.3	1.2	3.5	7.4	25.3	30.4	11.5	19.5

### 1.2 试验设计

根据当地的降雨特征, 选取 7.5 L/min、15 L/min、30 L/min、60 L/min、90 L/min 和 120 L/min 共 6 级放水流量, 由水泵供水且安装流量控制阀, 以控制试验过程中水压和流量恒定。小区顶端水平固定有稳流管, 进水管嵌套在稳流管内, 紧靠稳流管下端固定一块长 2 m、宽 0.15 m、表面均匀且与坡面处于同一平面的稳流板; 进水管底端布置了很多均匀小孔, 稳流管过水断面上布置了一系列等间距小槽, 上方来水通过进水管内小孔均匀注入稳流管, 然后通过小槽流向稳流板, 经稳流板过渡后流入小区。该装置有效保证了水流均匀、稳定地流入小区。

侵蚀针用 20 cm 长、0.5 cm 宽、0.1 cm 厚的钢签制作而成, 预先在侵蚀针正、反两面标记地表初始位置(标志线), 标志线两端长度分别为 15 cm、5 cm, 在侵蚀针上每隔 0.1 cm 标注刻度线<sup>[17-18]</sup>。祁有祥等<sup>[17]</sup>研究表明, 采取行列式均匀布设方式布置侵蚀针、且各行各列上相邻侵蚀针间距为 0.5 m 时, 用侵蚀针法计算坡面产沙量的精度可达 90% 以上。本试验亦采取此方法布设侵蚀针, 即垂直于倾斜坡面插入 40 支侵蚀针, 使标志线恰好落在坡面内(标志线以上长 5 cm), 且使侵蚀针宽度方向与小区长度方向平行, 以减小侵蚀针迎水面积。

针对该地区短历时暴雨侵蚀的特点, 同时为使坡面侵蚀充分发育, 设置放水历时 54 min。按照流量从小到大的顺序开展试验, 每次试验结束后, 待小区土壤不再粘结成块时, 深翻表层土壤(20 cm)2~3 遍, 翻土过程中取小区周围表土进行逐量回填并适当压实, 然后进行坡面平整, 保持坡度 25°。随后, 在自然状态下, 白天每隔 4 h 在坡面上、中、下 3 个部位取样测定土壤含水率和容重, 直至土壤含水率为 13.0% 左右、容重为 1.4 g/cm<sup>3</sup> 左右, 才进行下一次试验, 以保证每次试验前土壤初始条件基本一致。图 1 中圆圈代表侵蚀针布设点, 沿 4 列侵蚀针的方向选取 I-I、II-II、III-III、IV-IV 4 个纵向断面, 沿坡顶至坡脚将坡面划分为 A、B、C、D 和 E 共 5 个 2 m×1 m 坡段。

### 1.3 试验观测内容

小区出口开始产流时便开始计时, 同时收集第一个径流泥沙样, 并用秒表记录取样时间, 之后每隔 3 min 取一次样, 用烘干法测定样品中泥沙质量(精确到克)。同时, 用染色剂(KMnO<sub>4</sub>)法分别沿各纵断面依次测定 E、D、C、B 和 A 5 个坡段内的径流流速, 从下往上测, 可有效避免上坡残留 KMnO<sub>4</sub> 溶液对下坡的干扰; 流速测定持续循环进行直至放水过程结束。试验过程中, 采用数码相机对坡面形态变化及径流运动进行连续拍照以辅助人工记录, 便于后续开展侵蚀空间分布分析及细沟侵蚀量的计算。试验结束后, 用测尺法测量主要细沟的长度, 并沿细沟每隔 0.2 m 测量其深度及上下截面宽, 以计算细沟的体积; 读取每支侵蚀针正、反两面标志线出露(掩埋)高度(深度), 出露高度记为正、掩埋深度记为负, 仍在坡面记为 0; 可能有侵蚀针恰好位于沟壁处, 致使正、反两面读数差异较大, 故取其平均值作为侵蚀针最终读数 *d*(精确到 mm, *d* 为正表示侵蚀针所处部位为净侵蚀部位, *d* 为负表示该部位为净沉积部位, *d* 为 0 表示该部位为侵蚀沉积平衡部位)。

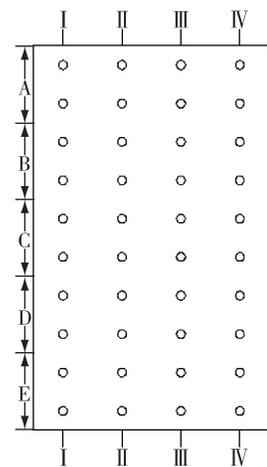


图 1 试验小区及侵蚀针布设示意  
Fig. 1 Schematic diagram of runoff plot and erosion pins

#### 1.4 坡面侵蚀产沙量计算

- (1) 径流泥沙实测法：根据径流泥沙样数据推算侵蚀产沙量。
- (2) 侵蚀针法<sup>[18-19]</sup>：

$$M = \frac{s}{n \cos \theta} \sum_{i=1}^n d_i \gamma \quad (1)$$

式中  $M$  为一次试验坡面总侵蚀产沙量, g;  $i$  为侵蚀针编号;  $d_i$  为试验结束后  $i$  号侵蚀针的读数, cm;  $n$  为侵蚀针总数量;  $\gamma$  为土壤容重, g/cm<sup>3</sup>;  $s$  为坡面水平投影面积, cm<sup>2</sup>;  $\theta$  为坡度。

## 2 结果与分析

由侵蚀针尺寸算得每行侵蚀针迎水面面积占整个过流断面面积的比例仅 0.2%, 且试验过程中并未观察到明显的坡面流绕流现象, 细沟主要由集中水流冲刷而成, 而成股水流主要受流量和坡面微地形影响<sup>[20]</sup>, 与侵蚀针无明显关系。故试验条件下, 侵蚀针的影响可忽略不计。

### 2.1 流速的空间分布

染色剂法测得的是径流最大表面流速, 乘以修正系数 0.8 作为平均流速<sup>[10]</sup>。A、B、C、D 和 E 坡段内所测流速的平均值依次代表距坡顶 0.5 m、1.5 m、2.5 m、3.5 m 和 4.5 m 横向断面的平均流速, 各纵向断面上所测流速的平均值代表纵向断面的平均流速, 见图 2, 各纵向断面上流速分布见图 3。

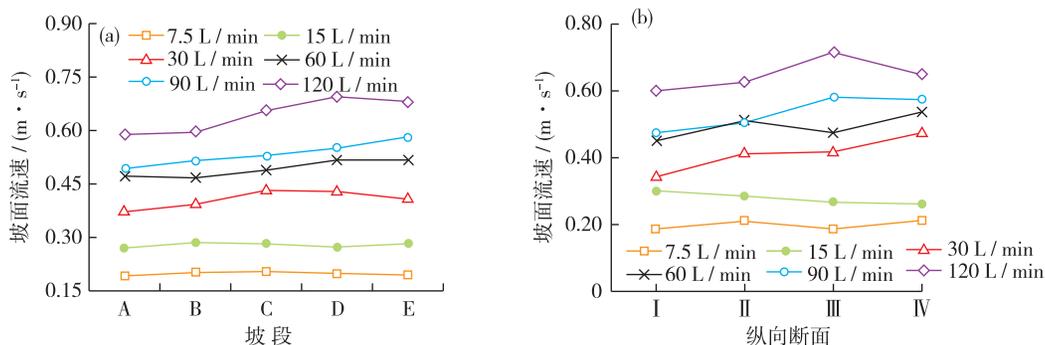


图2 不同流量下坡面各横向及纵向断面的流速

Fig. 2 Flow velocity of each lateral section and cross section at different discharges

由图 2 可知, 流量为 7.5 L/min 和 15 L/min 时, 流速沿坡面向下变幅很小, 相对平缓; 其他流量下, 流速沿坡面向下总体呈增大的变化趋势, 但表现出一定波动性, 甚至流量为 120 L/min 时, 3.5 m 和 4.5 m 断面的流速小于 2.5 m 断面的流速, 主要因为大流量下这段距离已形成较深且较宽的细沟, 致使细沟内水速度减小, 这与夏卫生等<sup>[10]</sup>的研究结果相同; 且从坡顶开始将每 1 m 的坡段作为一个测速坡段, 当有跌坎形成时所测流速就会减小。相关分析表明各横向断面的流速与其距坡顶距离总体上呈正相关, 各流量(由小到大)下 Pearson 相关系数依次为 0.043、0.657、0.672、0.923、0.991、0.921, 其中流量为 60 L/min、90 L/min 和 120 L/min 时相关系数达显著水平。各流量(由小到大)下, 横向断面流速的变异系数依次为 0.023、0.150、0.230、0.290、0.290 和 0.320, 说明小流量时流速变异程度相对较弱, 随流量增大, 变异程度呈增强趋势; 各流量(由小到大)下, 纵向断面流速的变异系数依次为 0.07、0.07、0.13、0.08、0.10 和 0.08, 整体较小; 这可能是因为坡度较大, 径流运动受重力作用影响较大, 流量越大, 径流所受重力的分量越大, 坡面上越易形成细沟, 从而致使流速沿坡面向下方向的变异性更明显。由图 3 可知, 不同流量下, 各纵向断面上的流速分布表现出明显空间分异性, 流速沿坡面向下方向并非呈直线关系增大或减小, 而是表现出明显波动性, 这与夏卫生等<sup>[10]</sup>和丁文峰等<sup>[7]</sup>分别在放水冲刷和模拟降雨条件下观测到流速沿坡面向下表现出的变化规律相同。不同流量下, 各纵向断面和横向断面上流速的变异系数见表 2。

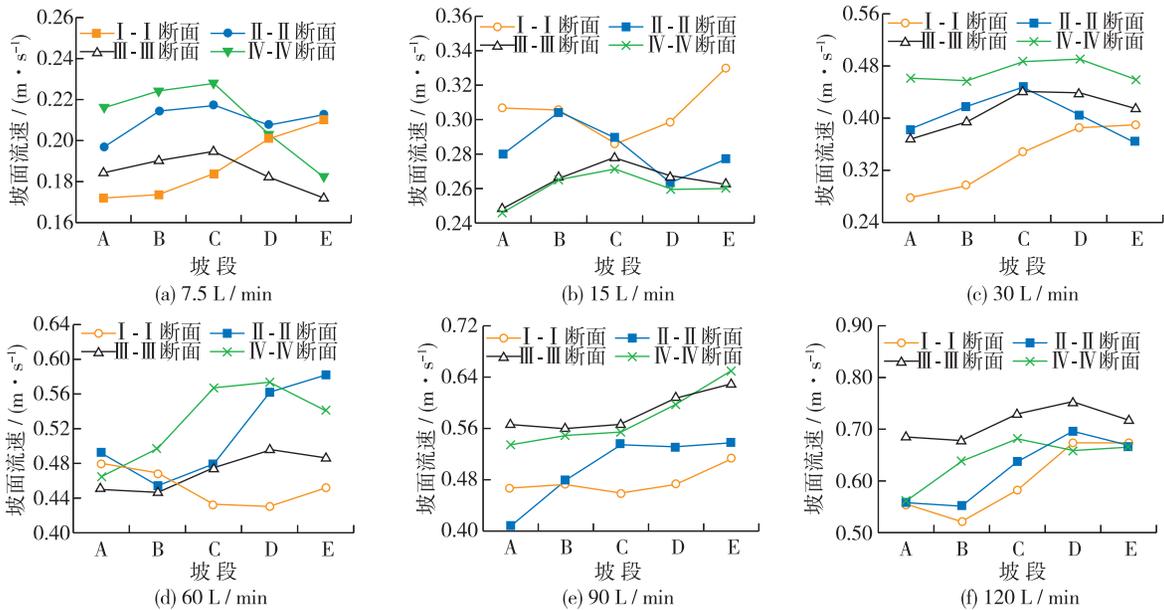


图 3 不同流量下各纵向断面上流速分布

Fig. 3 Distribution of flow velocity along the profile at different discharges

表 2 不同流量下各纵向、横向断面上流速的变异系数

Table 2 Variation coefficient of velocity of each profile at different discharges

流量/(L·min <sup>-1</sup> )	纵向断面				横向断面所在坡段				
	I-I	II-II	III-III	IV-IV	A	B	C	D	E
7.5	0.09	0.03	0.05	0.11	0.10	0.12	0.10	0.06	0.10
15	0.20	0.17	0.12	0.11	0.11	0.08	0.03	0.07	0.12
30	0.18	0.25	0.22	0.29	0.20	0.17	0.14	0.11	0.10
60	0.32	0.31	0.28	0.27	0.04	0.05	0.12	0.13	0.11
90	0.29	0.23	0.33	0.31	0.14	0.09	0.09	0.11	0.12
120	0.32	0.31	0.35	0.29	0.11	0.12	0.10	0.06	0.04

总体上看, 相同纵向断面上流速的变异程度随流量增大呈增强趋势, 说明流量的增大加剧了纵向断面上流速分布的不均匀程度。在相同流量下, 与纵向断面相比, 横向断面上流速的变异系数明显偏小, 说明流速在各横向断面上分布较均匀, 变异程度较弱。综上分析, 流速沿坡面长度方向的变异性较宽度方向更明显。

## 2.2 坡面侵蚀产沙空间分布

### 2.2.1 侵蚀针测量精度分析

两种方法计算侵蚀产沙量及其对比如表 3 所示。由表 3 可知, 以径流泥沙实测法为基准, 侵蚀针法所得结果的误差为 4.3%~12.1%, 说明试验条件下, 用侵蚀针法测量侵蚀产沙量较可靠。

### 2.2.2 侵蚀沉积空间分布

不同流量下, 坡面各纵、横向断面上侵蚀针读数的变异系数分别介于-9.47~6.10 和-2.40~4.85 之间, 且变异系数绝对值整体较大, 但随流量增大呈减小趋势, 说明坡面侵蚀沉积具有明显空间变异性, 纵向断面上侵蚀沉积空间变异程度相对更强, 但变异程

表 3 两种方法计算侵蚀产沙量及其对比

Table 3 Comparison of soil erosion amount calculated by the two ways

流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	侵蚀产沙量/kg		两种方法所得 结果的误差/%
	径流泥沙实测法	侵蚀针法	
7.5	13.38	11.92	12.1
15	30.94	33.23	7.4
30	102.17	112.63	10.2
60	211.94	221.08	4.3
90	233.06	255.82	9.8
120	271.22	296.17	9.2

度总体上随流量增大呈减弱趋势。取各坡段内侵蚀针读数的平均值表征其平均侵蚀深度,见图4;平均侵蚀深度在各纵向断面上的分布见图5;图中纵坐标正、负分别代表侵蚀深度、沉积厚度。

由图4可知,流量为7.5 L/min、15 L/min时,存在侵蚀深度小于0的坡段,说明这些坡段沉积作用较强;其他流量下大部分坡段侵蚀深度大于0,说明以侵蚀作用为主。不同流量下,各坡段侵蚀深度总体上随

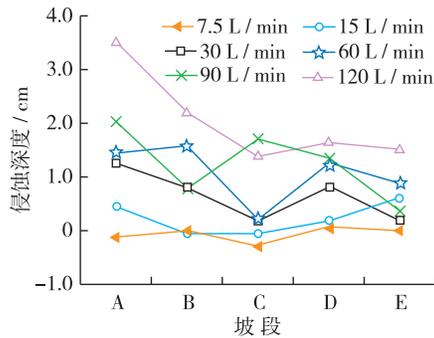


图4 不同流量下各坡段平均侵蚀深度

Fig. 4 Mean depth of erosion of each slope segment at different discharges

流量增大而增大,但增大幅度有所差异,A坡段相对较大。相同流量下,不同坡段的侵蚀深度存在明显差异,反映了坡面侵蚀的空间变异性。流量为7.5 L/min、15 L/min时,侵蚀深度较大坡段多为D、E坡段,其他流量下侵蚀深度较大坡段多为A、B坡段;说明流量较小时,下坡位侵蚀较重,流量较大时,上坡位侵蚀较重。主要是因为流量较小时,中上坡位的坡面流呈片状分布,径流分散导致单宽径流侵蚀力较小,而中下坡位在径流冲刷作用下往往形成细沟状集中水流,导致侵蚀明显加重;而流量较大时,径流侵蚀力和挟沙能力均较强,上坡位处于净侵蚀区,故侵蚀程度较重,径流搬运泥沙需要消耗部分能量,因而中下坡位往往受到侵蚀和沉积的交汇作用,故净侵蚀

量减小。除流量为90 L/min外,其他流量下C坡段侵蚀深度较小,说明中坡位沉积作用明显;可能是因为径流沿坡面向下运动过程中挟沙量逐渐增大,到达中坡位时超过了挟沙能力<sup>[21-22]</sup>,因而部分泥沙发生沉积且沉积量较大,故中坡位侵蚀深度较小。

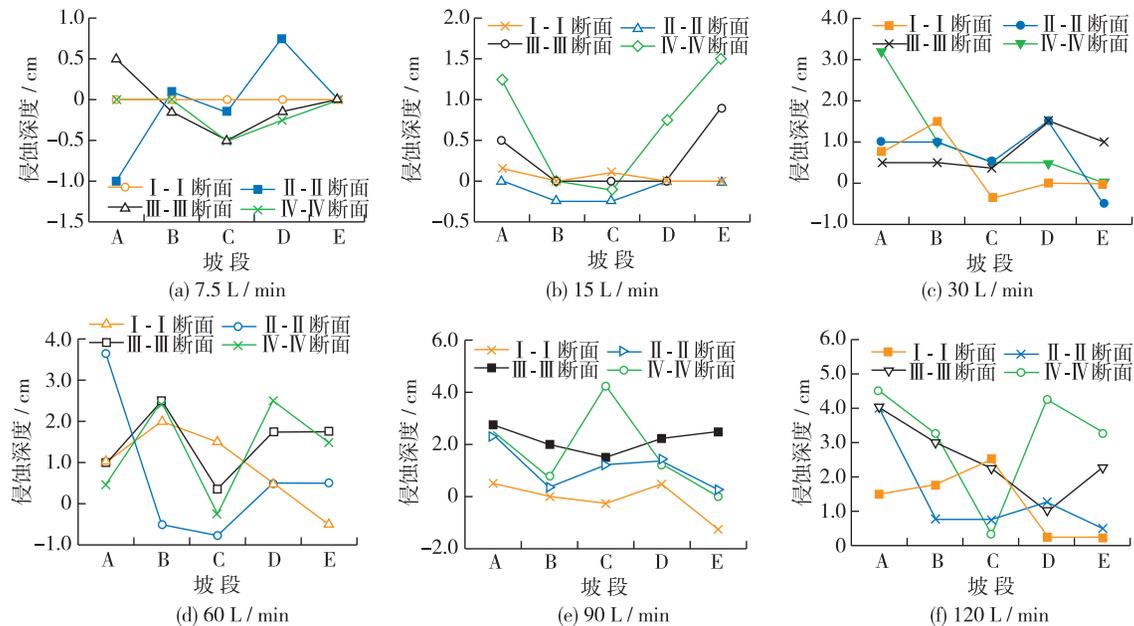


图5 不同流量下侵蚀深度在各纵向断面上的分布

Fig. 5 Distribution of erosion depth on each profile cross at different discharges

由图5可知,各流量下,侵蚀深度较大部位多位于A、D坡段,沉积厚度较大部位多位于C、E坡段。流量为7.5 L/min时,净沉积和侵蚀沉积平衡部位较多;这主要是因为流量较小,径流侵蚀力和挟沙能力均较弱,径流携带泥沙下移过程中较易发生泥沙沉积。流量为15 L/min时,IV-IV断面侵蚀深度较大,II-II断面沉积厚度较大;流量为30 L/min时,A、B坡段以侵蚀为主,其他坡段既受到侵蚀又发生沉积且侵蚀深度变幅较大;流量为60 L/min时,III-III断面以侵蚀作用为主,其他断面既受到侵蚀也发生沉积且侵蚀深度变

幅较大; 流量为 90 L/min 时, 除 E 坡段内 I - I 断面处泥沙沉积厚度较大外, 坡面其他部位均以侵蚀作用为主; 流量为 120 L/min 时, 全坡面受到了强烈侵蚀, 侵蚀程度以 A、B 坡段较大, D、E 坡段其次, C 坡段最小。综上所述, 流量较小时, 下坡位侵蚀程度较重; 流量较大时, 上坡位侵蚀程度较重; 除流量为 90 L/min 外, 沉积作用在中坡位较显著, 下坡位居中, 上坡位最不显著。

2.2.3 细沟和细沟间侵蚀量分析

参照式(1)计算出不同流量下各坡段净侵蚀量; 用各坡段上细沟的体积乘以土壤容重即得细沟侵蚀量, 用各坡段净侵蚀量减去细沟侵蚀量即得细沟间侵蚀量, 如图 6、表 4 所示。

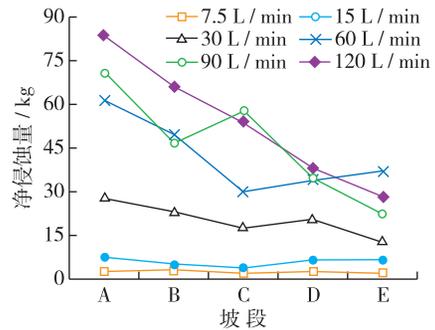


图 6 不同流量下各坡段的净侵蚀量

Fig. 6 Sediment of each slope segment at different discharges

表 4 不同流量下细沟和细沟间侵蚀量的空间分布

kg

Table 4 Spatial distribution of rill and interrill erosion amount at different discharges

流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	A 坡段		B 坡段		C 坡段		D 坡段		E 坡段	
	细沟	细沟间	细沟	细沟间	细沟	细沟间	细沟	细沟间	细沟	细沟间
7.5	0.805	1.880	0.755	2.388	0.273	1.810	0.421	2.586	0.640	1.821
15	5.043	2.914	3.270	2.178	1.405	2.497	3.644	3.106	4.266	2.614
30	17.675	10.114	14.845	8.357	11.749	5.793	15.672	4.955	8.848	4.158
60	33.677	18.939	37.124	17.466	20.771	8.071	31.223	9.867	27.148	7.657
90	48.546	22.420	34.655	12.166	46.448	11.606	28.503	6.246	18.831	3.636
120	54.723	21.276	47.659	12.655	35.061	5.236	41.874	7.398	39.659	5.684

由图 6 可知, 不同流量下, A 坡段净侵蚀量最大。流量为 7.5 L/min 时, 各坡段净侵蚀量变幅很小; 流量为 15 L/min 时, 净侵蚀量沿下坡方向先减小后增大; 流量在 30~90 L/min 时, 净侵蚀量沿下坡方向总体上呈减小趋势, 但表现出一定波动性, C 坡段均出现极值点; 流量为 120 L/min 时, 净侵蚀量沿下坡方向几乎呈直线减小。相关分析, 得到各流量(从小到大)下 Pearson 相关系数依次为 -0.217, -0.086, -0.908, -0.697, -0.906, -0.805, 表明除流量为 15 L/min 外, 各坡段净侵蚀量与距坡顶距离之间呈现不同程度负相关关系, 且流量为 30 L/min、90 L/min 时显著相关。由表 4 可知, 细沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的比例随流量增大不断增加。不同流量下, 各坡段净侵蚀量总体上呈现以下变化趋势: A、B 坡段较大, C、D 坡段居中, E 坡段最小; 主要因为 A、B 坡段侵蚀沟发育活跃, 侵蚀作用强烈, 只存在一个净侵蚀过程, 而其他坡段既发生侵蚀又有沉积。最上端坡段净侵蚀量随流量增大而增大, 且流量较大时, 净侵蚀量沿下坡方向呈减小趋势, 这与唐泽军等<sup>[23]</sup>利用模拟降雨结合 REE 示踪技术对坡面侵蚀产沙空间变化的研究结果相似: 雨强愈大, 最上端坡段侵蚀程度愈重。流量较大时, 距坡顶 0~2 m 的坡段为净侵蚀区, 这与胡国庆等<sup>[19]</sup>用磁性示踪法和侵蚀针法研究坡面侵蚀空间分异特征的结果一致。侵蚀作用在上坡位最强烈, 下坡位居中, 中坡位最轻, 这与董元杰等<sup>[13]</sup>和王全辉等<sup>[24]</sup>用磁性示踪剂法研究坡面侵蚀空间分布特征的结果一致。

由表 4 结合试验观测资料可知, 流量为 7.5 L/min 时, 各坡段细沟间侵蚀量均大于细沟侵蚀量, 水流基本处于稳定流状态, 侵蚀方式以面蚀为主。流量为 15 L/min 时, 径流较易汇集并以股流形式向下流动, 侵蚀逐渐由细沟间侵蚀向细沟侵蚀过渡, 全坡面细沟侵蚀量占总侵蚀量的比例为 56.97%。张科利和秋吉康宏<sup>[20]</sup>的水槽实验表明, 径流冲刷形成细沟的深度在 0.8~1.0 cm 时, 产沙量便开始迅速增加, 即可认为细沟侵蚀开始占主导地位; 流量为 15 L/min 时, 坡面上主要细沟的深度为 0.8~1.3 cm, 且由表 4 可知细沟侵蚀量占总侵蚀量的比例随流量增大不断增加。综上分析, 流量为 15 L/min 时, 坡面更易发生细沟侵蚀, 细沟侵蚀占主导地位。

### 2.3 流速与侵蚀关系分析

流量为 7.5 L/min、15 L/min 时坡面平均流速分别为 0.255 m/s、0.302 m/s，故试验条件下，侵蚀方式以细沟间侵蚀为主转变为细沟侵蚀为主的临界流速为 0.255~0.302 m/s。对比图 2 和图 4 可知，流量为 7.5 L/min 时，各坡段流速相对平缓，而侵蚀深度表现出一定波动性变化；流量为 15 L/min 时，流速与侵蚀深度沿 A、B、C 3 个坡段变化趋势相反，沿 D、E 坡段变化趋势一致；其他流量下，流速与侵蚀深度沿坡面向下方向的变化规律呈相反趋势，且流量愈大，这种趋势愈明显。对比图 3 和图 5 可知，各纵向断面上的流速与侵蚀深度均表现出明显波动性，二者之间并不呈现简单正相关或负相关关系。不同流量下，各坡段净侵蚀量与平均流速之间的关系如图 7 所示。

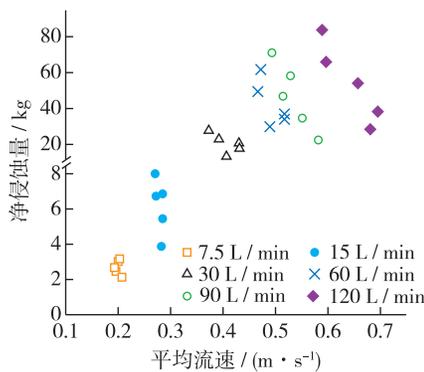


图 7 不同流量下各坡段相对侵蚀量与流速的关系

Fig. 7 Relationship between sediment yield and velocity of each slope segment at different discharges

总体上，随试验流量增大，坡面流速增大，坡面总侵蚀产沙量也呈增大趋势；但对于同一坡面的不同坡位而言，又出现流速增大，侵蚀量减小的趋势(图 7)。各流量(从小到大)下各坡段净侵蚀量与流速的 Pearson 相关系数依次为 -0.231、-0.704、-0.638、-0.652、-0.931、-0.820。净侵蚀量较大坡段的平均流速反而较小，且这种现象在流量较大时更明显。一般认为，坡面侵蚀量随流速、径流动能的增大而增大。本研究中相同坡面不同坡位的侵蚀量与流速呈负相关，且流量为 90 L/min 时相关性达显著水平，这可能是因为：一方面，由坡面上部向下输移的泥沙在坡面下部沉积，而土壤粗颗粒或团聚体可能是以床移质运移的，易于沉积；另一方面，可能是含沙水流的挟沙能力在坡面中下部位基本

达到饱和，流速的增加不足以使水流挟带更多坡下部位侵蚀泥沙运移；同时，流量愈大，各坡段侵蚀量愈大、形成的细沟愈密集，沟宽和沟深也愈大，在细沟发育过程中，侵蚀产沙量显著增大，而细沟流速变化较小甚至减小<sup>[8]</sup>，这也造成了各坡段侵蚀量与流速之间呈负相关关系。

## 3 结 论

(1) 坡面各横向断面的流速与距坡顶距离之间呈现一定程度正相关关系，且相关性随流量增大逐渐变得显著；随着流量增大，坡面集中水流冲刷土壤明显，并加剧了坡面流速空间分布的不均匀程度；流速沿坡长方向变异性较坡宽方向明显。

(2) 侵蚀沉积空间变异程度随流量增大呈减弱趋势；各坡段侵蚀深度总体上随流量增大而增大，上、下坡位侵蚀深度较大，中坡位较小；小流量时，下坡位侵蚀程度较重；大流量时，上坡位侵蚀程度较重，且上坡位处在净侵蚀区。各坡段的侵蚀量与距坡顶距离之间呈现一定程度负相关关系，细沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的比例随流量增大而不断增加，发生泥沙沉积的部位随流量增大逐渐下移。

(3) 随流量增大，坡面流速和侵蚀产沙量呈增大趋势；但在流量较大时，坡面不同坡位侵蚀量与流速呈负相关关系，这可能与坡面中下坡位粗颗粒泥沙沉积以及含沙水流的挟沙能力基本达到饱和有关。试验条件下流量为 15 L/min，对应流速为 0.30 m/s 时，细沟侵蚀量大于细沟间侵蚀量，且坡面侵蚀量迅速增大。

### 参考文献:

- [1] 朱智勇,解建仓,李占斌,等. 坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J]. 水土保持学报,2012,25(5):1-7. (ZHU Zhiyong, XIE Jiancang, LI Zhanbin, et al. Experimental study on mechanism of slope runoff-erosion-sediment yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 25(5):1-7. (in Chinese))

- [2] 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[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.(YU Guoqiang, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Effects of vegetation types on hillslope runoff-erosion and sediment yield[J]. Advances in Water Science, 2010,21(5):593-599. (in Chinese))
- [3] HENG S, SUETSUGI T. Comparison of regionalization approaches in parameterizing sediment rating curve in ungauged catchments for subsequent instantaneous sediment yield prediction[J]. Journal of Hydrology, 2014,512:240-253.
- [4] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J].水科学进展,2014,25(1):90-97.(HE Jijun, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. The effects of rill development on runoff and sediment yielding processes[J]. Advances in Water Science, 2014,25(1):90-97. (in Chinese))
- [5] ALATORRE L C, BEGUERIA S, LANA-RENAULT N, et al. Soil erosion and sediment delivery in a mountain catchment under scenarios of land use change using a spatially distributed numerical model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(5): 1321-1334.
- [6] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11):110-117.(WANG Longsheng, CAI Qiangguo, CAI Chongfa, et al. Morphological changes of rill on loess slope and its relationship with flow velocity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(11):110-117. (in Chinese))
- [7] 丁文峰,李亚龙,王一峰.人工模拟降雨条件下紫色土坡面流体力学参数特征[J].水土保持学报,2010,24(2):66-69.(DING Wenfeng, LI Yalong, WANG Yifeng. Study on runoff hydrodynamics of purple soil slope under the rainfall simulation experiment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(2):66-69. (in Chinese))
- [8] 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[J].地理研究,2011,30(9):1660-1668.(LIU Heiping, WANG Xiuying, LIU Baoyuan. Study on rill and interrill flow velocity along hillslopes with simulated rainfall[J]. Geographical Research, 2011,30(9):1660-1668. (in Chinese))
- [9] SHI Z H, FANG N F, WU F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. Journal of Hydrology, 2012, 454:123-130.
- [10] 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[J].土壤学报,2004,41(6):876-880.(XIA Weisheng, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Relationship between velocity of slope flow and sediment generation during erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,41(6):876-880. (in Chinese))
- [11] 郭军权,刘敏,王文龙.上方来水对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验研究[J].水土保持学报,2012,26(3):49-52.(GUO Junquan, LIU Min, WANG Wenlong. Experimental study on upslope runoff effects on ephemeral gully erosion process[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(3):49-52. (in Chinese))
- [12] 张攀,姚文艺.坡面细沟形态与侵蚀产沙间的量化响应研究进展[J].中国水土保持,2014(2):39-41.(ZHANG Pan, YAO Wenyi. Research progress on quantitative response of slope rill morphology and soil erosion[J]. Sediment Production Soil and Water Conservation in China, 2014(2):39-41. (in Chinese))
- [13] 董元杰,史衍玺,孔凡美,等.基于磁测的坡面土壤侵蚀空间分布特征研究[J].土壤学报,2009,46(1):144-148.(DONG Yuanjie, SHI Yanxi, KONG Fanmei, et al. Magnetic-measurement-based spatial distribution of soil erosion on slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009,46(1):144-148. (in Chinese))
- [14] PAN C Z, SHANGGUAN Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology, 2006,331(1):178-185.
- [15] PAN C Z, MA L, SHANGGUAN Z P. Effectiveness of grass strips in trapping suspended sediments from runoff[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,35(9):1006-1013.
- [16] SMITH M W, COX N J, BRACKEN L J. Terrestrial laser scanning soil surfaces: A field methodology to examine soil surface roughness and overland flow hydraulics[J]. Hydrological Processes, 2011,25(6):842-860.
- [17] 祁有祥,杨建英,辜再元,等.土壤侵蚀速率近景摄影测量法(CRPE)的野外试验研究[J].中国水土保持,2012(5):36-37.(QI Youxiang, YANG Jianying, GU Zaiyuan, et al. Field experiment on soil erosion rate in close-range photogrammetry (crpe) method[J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(5):36-37. (in Chinese))
- [18] 杨建英,祁有祥,赵廷宁,等.基于侵蚀钉和近景摄影测量的侵蚀速率测定方法试验研究[J].北京林业大学学报,2010(3):90-94.(YANG Jianying, QI Youxiang, ZHAO Tingning, et al. Measuring soil erosion rate using digital close range photogrammetry and erosion pin techniques[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010,32(3):90-94. (in Chinese))

- [19] 胡国庆,董元杰,史衍玺,等. 坡面土壤侵蚀空间分异特征的磁性示踪法和侵蚀针法对比研究[J]. 水土保持学报, 2010(1):53-57. (HU Guoqing, DONG Yuanjie, SHI Yanxi, et al. Comparative on characteristics of soil erosion spatial variation on slopes using magnetic tracing and erosion pins[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010(1):53-57. (in Chinese))
- [20] 张科利,秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):41-46. (ZHANG Keli, AKIYOSHI Yasuhiro. Critical hydraulic condition of rill erosion on sloping surface[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation,1998,4(1):41-46. (in Chinese))
- [21] 张建军. 黄土坡面地表径流挟沙能力研究综述[J]. 泥沙研究,2007(4):77-80. (ZHANG Jianjun. Summary of studies on sediment carrying capacity of surface runoff on loess slopes[J]. Journal of Sediment Research,2007(4):77-80. (in Chinese))
- [22] 肖培青,姚文艺,申震洲,等. 植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J]. 水科学进展,2011,22(2):229-234. (XIAO Peiqing, YAO Wenyi, SHEN Zhenzhou, et al. Experimental study of critical flow energy for slope erosion under the influence of vegetation cover[J]. Advances in Water Science,2011,22(2):229-234. (in Chinese))
- [23] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀动态过程的降雨模拟试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(3):32-35. (TANG Zejun, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Rain simulation of dynamic soil erosion processes with rare earth element tracers[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(3):32-35. (in Chinese))
- [24] 王全辉,胡国庆,董元杰,等. 磁性示踪条件下坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀空间分异特征[J]. 水土保持学报,2012,26(2):21-23. (WANG Quanhui, HU Guoqing, DONG Yuanjie, et al. Runoff and sediment yield and spatial variation of soil erosion slope under magnetic tracing condition[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(2):21-23. (in Chinese))

## Field experiment investigation into the spatial variability of overland flow velocity and soil erosion\*

TIAN Pei, PAN Chengzhong, XU Xinyi, YANG Fan, LI Changjia

(Key Laboratory for Water and Sediment of Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University;  
State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The spatial variability of overland flow velocity and soil erosion, and their relationship under different discharges, were investigated using a field runoff plot combined with the erosion pins. There exists a positive correlation between flow velocity and the distance from the top of slope, with the correlation becoming more significant as discharge increased. Variability of velocity at each cross section was stronger than that of the lateral section. The eroded sediment yield at the top or bottom of slope was greater than those at the middle. Sediment deposition clearly occurred for small flow discharge, and for high flows net erosion dominated the section of 0—2 m from the top of the slope. As flow discharge increased, the deposition zone gradually shifted down, and the proportion of rill erosion to the total amount of erosion increased. When overland flow velocity was greater than 0.30 m/s, the amount of rill erosion exceeded that of inter-rill erosion, and the erosion amount of the whole slope increased rapidly. As flow discharge increased, the overland flow velocity and erosion amount also increased. However, under the same slope, greater overland flow velocity corresponding to the down-slope tended to generate smaller erosion sediment yield, which may be attributed to the deposition of coarse sediment and the almost saturated sediment carrying capacity at the down-slope.

**Key words:** overland flow; spatial variability; velocity; erosion; hillslope

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41271285; No. 51309007).