

# 我国水土流失典型区土壤溅蚀特征研究

程琴娟<sup>1,2</sup>, 蔡强国<sup>2</sup>

(1. 陕西师范大学学报编辑部, 陕西西安710062; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京100101)

**摘要:** 基于室内模拟降雨试验, 分析了我国水土流失典型区代表性土样的溅蚀特征, 探讨了溅蚀与土壤理化性质的关系。结果表明, 溅蚀量明显受土壤理化性质的影响, 黑土土样因团聚体含量及稳定性高, 溅蚀量最低; 采自内蒙古自治区东胜市的黄土土样因砂粒含量(易被溅蚀的颗粒范围)高, 溅蚀量最高; 其它黄土土样、红壤土样及紫色土土样或因粉粒含量为主或因团聚体稳定性差而导致溅蚀量居中。模拟降雨条件下, 除黑土土样和内蒙古自治区东胜市的黄土土样外, 其它土样均发育表土结皮, 导致溅蚀率呈现波动态势。

**关键词:** 表土结皮; 水土流失; 溅蚀; 模拟降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)01-0017-04

中图分类号: S157.1

## Splash Erosion by Raindrops in Typical Soil and Water Loss Regions of China

CHENG Qin-juan<sup>1,2</sup>, CAI Qiang-guo<sup>2</sup>

(1. Editorial Department of Journal, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Based on indoor experiment under simulated rainfall, the characteristics of splash erosion by raindrops in typical soil and water loss regions of China are analyzed and the relationships between splash erosion and soil physical and chemical properties are discussed. Results show that splash erosion amount is affected obviously by soil physical and chemical properties. The splash erosion amount of black soil samples is the lowest because of their high aggregate content and aggregate stability. The splash erosion amount of loess soil samples collected from Dongsheng City, Inner Mongolia is the highest because they contain high content of sand particles easily to be splashed. The other loess soil samples, red soil samples, and purple soil samples correspond to the medium splash erosion amount because of the majority of silt particles or high content of micro-aggregates. Except for black soil sample and loess soil samples collected from Dongsheng City, Inner Mongolia, soil crust is developed in other soil samples under simulated rainfall, so, raindrop splash rate fluctuates with time.

**Keywords:** soil crust; soil and water loss; splash erosion; simulated rainfall

Meyer, Wischmeier<sup>[1]</sup>和 Foster<sup>[2]</sup>在他们的试验小区上用金属筛网覆盖以消除降雨动能,并根据对比实验得出,当没有雨滴击溅影响时,土壤流失量减少78.8%。可见,雨滴击溅侵蚀在土壤侵蚀中起着重要作用,它为后续的径流搬运提供了丰富的松散颗粒,溅蚀量的多少及松散颗粒的组成状况是判断坡面土壤侵蚀量的主要依据之一<sup>[3-4]</sup>。

雨滴击溅的本质在于雨滴具有一定的动能,当其动能足够克服土粒间的黏结作用及土粒的重力势能时便使土粒发生位移。在雨滴溅蚀能力确定的前提下,

土壤被侵蚀的量主要取决于土壤的抗蚀能力,不同土壤抗击溅蚀的能力不同<sup>[5]</sup>。影响溅蚀的因子众多,可以归为降雨特征(雨强、历时、降雨能量等)、土壤特性(土壤颗粒等)及其它因素(坡度等)<sup>[6-7]</sup>。雨滴打击不仅引起土壤的侵蚀,而且还能在土壤表面形成结皮<sup>[8]</sup>。表土结皮发育有助于提高土壤表面强度,降低土壤分离能力,因此,溅蚀过程还受土壤表面变化的影响,而不同土壤发育表土结皮的敏感性不同<sup>[9]</sup>。

东北黑土区、黄土高原区、南方红壤丘陵区、西南紫色土区在我国国民经济生产中占据着重要地位,同

收稿日期:2009-05-25

修回日期:2009-07-06

资助项目:国家自然科学基金项目“细沟侵蚀发育过程及空间形态的三维数字模拟”(40971165);国家自然科学基金项目“表土结皮发育过程特征及其在坡面侵蚀过程中的作用”(40471084)

作者简介:程琴娟(1981—),女(汉族),山西省新绛县人,博士,研究方向为水土保持与坡地侵蚀模拟。E-mail: cqj759@163.com。

通信作者:蔡强国(1946—),男(汉族),湖北省武汉市人,研究员,博士生导师。研究方向为水土保持与坡地侵蚀模拟。E-mail: caiqg@gsnrr.ac.cn。

时都面临着严重的水土流失,被认为是我国水土保持的重点区域<sup>[10]</sup>。

黑土、黄土、红壤、紫色土分别为上述 4 大水土流失典型区的代表土壤,然而这几种代表性土壤的溅蚀特征仍不清楚,寻求它们之间的分异规律及其与土壤理化性质的关系,将丰富土壤侵蚀相关研究,加深对侵蚀过程的理解。本文通过室内模拟降雨实验研究水土流失典型区代表性土壤的溅蚀特征,探讨溅蚀与土壤理化性质的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土样

本试验共有 9 个土样,代表 4 种土壤,分别为黑

土、黄土、红壤及紫色土。采样地点以及土壤理化性质详见表 1。其中,黑土土样(B)为采自黑龙江省齐齐哈尔市拜泉县缓坡耕地的表层土壤,为典型黑土区黑土;黄土土样(L<sub>1</sub>与L<sub>2</sub>)为采自山西省离石县王家沟流域的表层土壤,王家沟流域的地貌特征和侵蚀特点在黄土丘陵沟壑区具有较强的代表性;黄土土样(L<sub>3</sub>)采自内蒙古自治区西南部东胜市的砒砂岩分布区,砒砂岩是对鄂尔多斯高原东南部裸露的基岩及黄土或砂土下伏基岩的俗称,砒砂岩区水土流失极其严重,是黄河主要粗沙来源地区之一;红壤土样(R<sub>1</sub>,R<sub>2</sub>,R<sub>3</sub>,R<sub>4</sub>)分别为采自湖北省罗田县、崇阳县、武昌市及广东省德庆县的表层土壤;紫色土土样(P)为采自湖北省秭归县的耕层土壤。

表 1 采样地及土样理化性质

土样	采样地	代表区域	机械组成			有机质含量
			>0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	
L <sub>1</sub> <sup>a</sup>	山西省离石县	黄土高原区	4.0	79.0	17.0	0.68
L <sub>2</sub> <sup>a</sup>	山西省离石县	黄土高原区	8.0	73.0	19.0	0.65
L <sub>3</sub>	内蒙古自治区东胜市	黄土高原区	73.9	25.9	0.2	—
R <sub>1</sub>	湖北省罗田县	南方红壤丘陵区	82.4	9.4	8.2	0.53
R <sub>2</sub>	湖北省崇阳县	南方红壤丘陵区	57.4	18.3	24.3	0.59
R <sub>3</sub>	湖北省武昌市	南方红壤丘陵区	27.5	38.2	34.3	1.95
R <sub>4</sub> <sup>b</sup>	广东省德庆县	南方红壤丘陵区	11.2	67.6	21.2	1.25
B	黑龙江省拜泉县	东北黑土区	18.2	47.7	34.1	4.26
P <sup>b</sup>	湖北省秭归县	西南紫色土区	16.3	83.4	0.3	1.02

注:a 质地特点:砂粒(>0.05 mm),粉粒(0.05~0.005 mm),黏粒(<0.005 mm);b 质地特点:砂粒(>0.05 mm),粉粒(0.05~0.002 mm),黏粒(<0.002 mm)。

### 1.2 试验装置

溅蚀试验所用的溅蚀盘是对 Morgan 溅蚀盘进行改进的结果。用白铁皮自制直径 30 cm,高 10 cm 的圆形溅蚀盘,盘中心是一直径 10 cm,高 3 cm 的圆形活动装土盘,盘底打上小孔用以入渗。惟一改进的地方是活动装土盘与圆形溅蚀盘之间有一狭缝(约 7 mm),目的是使土盘产生的径流、泥沙从这个缝隙排掉,避免干扰溅蚀量<sup>[11]</sup>。试验时,为了防止土壤从装土盘的小孔随水入渗下漏,装土前必须在土盘底部覆盖 1~2 层纱布。

人工降雨器由 SPRACO 锥形喷头(加拿大引进)、直立竖管(高 4.75 m)、延伸管(长 90 cm)以及拉线构成;当雨滴降落高度为 4.57 m,水压为 67 kPa 的时候,雨滴中径为 2.40 mm。

当使用两个降雨器时,在雨强为 1.2 mm/min 的情况下,雨滴动能为 0.57 J/(m<sup>2</sup>·s),相当于等量天然降雨能量的 90%<sup>[12]</sup>。

### 1.3 试验过程

每个土样进行不同降雨历时的降雨溅蚀试验。具体步骤如下:首先,对降雨器进行率定,率定降雨强度为 1.2 mm/min(±0.05 mm/min);其次,将风干土样过筛除去杂质,分装在活动土盘中(每个时段 3 个重复),填土容重均为 1.3 g/cm<sup>3</sup>,刮平,放入溅蚀盘中央;然后,将溅蚀盘放在率定好的人工降雨器下,进行历时为 5,10,15 和 20 min 的降雨击溅实验。降雨结束后,立即将活动装土盘从溅蚀盘中取出,待风干后用毛刷将溅在溅蚀盘中的土粒收集称重,求算平均值作为正式结果,而风干的活动装土盘用来制作土壤切片,详见文献[13]。

## 2 结果与分析

### 2.1 溅蚀量

溅蚀是雨滴打击分散土壤颗粒的过程,在雨强及降雨动能一定的条件下,溅蚀量的差异反映土壤理化

性质尤其是土壤颗粒特征与结构特征的差异。在一定的降雨动能下,存在着易被溅蚀的土壤颗粒范围,如果颗粒太大,会因重量大而很难发生位移,如果颗粒太小,则对溅蚀量的贡献小。

另外,土壤颗粒大多数情况下处于复粒状态(即微团聚体或团聚体状态),宅门在降雨作用下有一个破坏过程,这也是决定土壤是否容易被溅蚀破坏的一个重要因素。

试验中,影响溅蚀量的因子只有降雨历时和土壤性质两方面,方差分析表明土壤与降雨历时均对溅蚀量有显著影响(表 2)。因此,在分析不同土样的溅蚀量时,比较同一历时的溅蚀量才有意义。研究中,所有土样的溅蚀试验都是在相同的降雨条件下进行的,因此,同一降雨历时下的土壤溅蚀量主要取决于土壤性质,尤其是土壤的团聚体稳定性<sup>[14]</sup>。可以说,如果土壤的性质相似,那么溅蚀量接近。

表 2 历时与土壤双因子方差分析

差异源	方差	自由度	均方差	F 值	P 值	F 临界值
历时	1.647	3	0.549	41.316 *	$1.230 \times 10^{-9}$	3.009
土壤	1.060	8	0.133	9.972 *	$5.190 \times 10^{-6}$	2.355
误差	0.319	24	0.013			
总和	3.026	35				

注: \* F 检验在 0.01 水平显著。

表 3 列出了不同降雨历时下 9 个土样的累积溅蚀量。可以看出,当降雨历时为 10, 15, 20 min 时,黄土土样 L<sub>3</sub> 的累积溅蚀量最大,黑土土样 B 最低,其它土样介于两者之间;当降雨历时为 5 min 时,有些土样间溅蚀量差异不显著,这主要是因为降雨初期,土壤前期表面的不均一性所致。

表 3 不同降雨历时下各土样累积溅蚀量 g

土样	降雨历时/min			
	5	10	15	20
L <sub>1</sub>	0.27a	0.48a	0.67ac	0.96cd
L <sub>2</sub>	0.28ae	0.43ac	0.82a	1.05ad
L <sub>3</sub>	0.26ac	0.72f	1.06d	1.24a
R <sub>1</sub>	0.13bf	0.32bc	0.48b	0.57b
R <sub>2</sub>	0.12f	0.42ac	0.75a	0.80cf
R <sub>3</sub>	0.20bc	0.49ad	0.76a	0.82ce
R <sub>4</sub>	0.24ac	0.43ac	0.51bc	0.56bf
P	0.36e	0.45ad	0.61ab	0.81cf
B	0.04d	0.04e	0.21e	0.40b

注:同一列中不同字母表示在 0.05 水平差异显著。

黑土土样 B 的溅蚀量最低,这是因为黑土在我国所有土壤中,有机质含量最高,致使其团聚体含量、稳定性最高(>0.25 mm 的团聚体含量超过 50%,甚至达 70%)<sup>[15]</sup>;而在降雨过程中,团聚体破坏为细小颗粒或微团聚体才能被雨滴击溅。在历时为 5 min 时,黑土的溅蚀量非常低,这在一定程度上说明黑土团聚体很难被破坏。黄土土样的溅蚀量可以分为两类:L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> 具有中等量的溅蚀量,而 L<sub>3</sub> 的溅蚀量最

大。在土壤特性中,研究者们认为不同的土壤有不同的溅蚀特征,主要取决于土壤颗粒的级配,并且认为细砂最易被雨滴击溅,而粗砂不易被击溅,更细颗粒则因具有黏性也不易被击溅。

参考文献[5, 13]对比进行了定量研究,得出不同粒径土粒被溅蚀的难易程度不同,即随着粒径由小增大,溅蚀量逐渐增大,在粒径为 0.105 ~ 0.15 mm 及 0.15 ~ 0.22 mm 处达到最大值,之后,随着粒径的增大,溅蚀量逐渐降低。

对于黄土土样而言,虽然团聚体稳定性相对较弱,在强降雨条件下易被破坏,但是含量占多数的粉粒(<0.105 mm)在很大程度上决定了 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> 的溅蚀量不会太高;而土样 L<sub>3</sub> 因砂粒含量(包含易被溅蚀的粒径范围)高,在很大程度上决定了其高的溅蚀量。

对于红壤土样,不少研究者指出,红壤的微团聚性是很好的,这是由于以高岭石为主的黏土矿物的膨胀性较小以及具有很强胶结力的三氧化物参与形成大量稳定性微团聚体之故。

由于热带黏质红壤的颗粒细,排列紧,黏粒活度低,膨胀性小,并有较多无定形三氧化物的胶结作用,因此所形成的团聚体,尤其是微团聚体的水稳性很强<sup>[16]</sup>。红壤的溅蚀量较高,这是因为红壤中胶结的团聚体大小(大量微团聚体)很适合被雨滴溅起,另一方面,土壤中本身也含有一定量的能被雨滴溅起的颗粒。

对于紫色土土样,粉粒含量占绝大多数,黏粒含量很小,砂粒含量也不高,决定了其溅蚀量不会太高也不会太低。

对于土样  $L_3$  与  $R_1$ , 两者均含有大量的砂粒, 但两者的溅蚀量差异显著,  $L_3$  要大于  $R_1$ ,  $R_1$  溅蚀量不高的原因在于红壤砂粒的尺寸较大, 不易被溅蚀。

## 2.2 溅蚀率

9 个代表性土样的溅蚀率随降雨历时的变化情况见表 4。除黑土的溅蚀率呈逐渐增大的趋势外, 其它土样的溅蚀率总体呈降低的趋势, 但均有升、降波动。

表 4 不同降雨时段各土样的溅蚀率  $g/(min \cdot m^2)$

土样	降雨时段/min				变化趋势
	0~5	5~10	10~15	15~20	
$L_1$	6.88	5.35	4.84	7.39	, ,
$L_2$	7.13	3.82	9.94	5.86	, ,
$L_3$	6.62	11.72	8.66	4.59	, ,
$R_1$	3.31	4.84	4.08	2.29	, ,
$R_2$	3.06	5.10	8.41	1.02	, ,
$R_3$	5.10	7.39	6.88	1.53	, ,
$R_4$	6.11	4.84	2.04	1.27	, ,
B	0.00	1.02	4.33	4.84	, ,
P	10.19	1.27	0.76	4.59	, ,

注: 、均是与前一时段相比得出; 代表增大, 代表降低。

在降雨作用下, 土壤颗粒排列发生变化, 团聚体会逐渐分散, 土壤孔隙会被细小颗粒填充堵塞, 土壤表面结构会发生变化<sup>[17]</sup>。即, 雨滴打击土表引起溅蚀的同时还会因其夯实作用导致某些土壤上形成薄的致密层, 即表土结皮。在裸露的耕地表面, 表土结皮发育是表面结构变化的主要特征<sup>[18]</sup>。因此, 溅蚀率波动的原因是表土结皮发育不完善, 形成与破坏交替进行。

黑土土样(B)在经历雨强为  $1.2 \text{ mm/min}$ , 历时为  $40 \text{ min}$  的降雨后, 土壤仍保持团聚体状态, 表土结皮发育的物质基础不充分, 表面没有结皮出现<sup>[11]</sup>。但是随着降雨历时的延长, 某些团聚体会慢慢破坏分散, 逐渐释放出一些细颗粒, 导致溅蚀率递增。

黄土土样  $L_1, L_2$  的粉粒含量超过  $70\%$ , 黏粒含量为  $17\% \sim 19\%$ , 有机质含量在  $0.7\%$  左右(表 1), 具备表土结皮发育的物质基础, 在降雨过程中均发育了表土结皮。表土结皮大约在  $5 \text{ min}$  开始发育, 在降雨结束时( $20 \text{ min}$ ), 表面逐渐光滑, 表土结皮趋于稳定; 但由于表土结皮发育是一个形成与破坏交替进行的过程<sup>[19]</sup>, 因此溅蚀率出现升降波动。

黄土土样( $L_3$ )砂粒含量  $73.9\%$ , 粉粒与黏粒含量不足  $30\%$ (表 1), 不具备发育表土结皮的物质基础, 因此没有发育表土结皮。溅蚀率先增大而后降低, 是因为降雨刚开始时( $0 \sim 5 \text{ min}$ ), 土壤干燥, 雨滴

更多地被土壤吸收而不是用来溅蚀土粒, 因此  $5 \sim 10 \text{ min}$  的溅蚀率高于  $0 \sim 5 \text{ min}$ , 之后溅蚀率降低是因为易被溅蚀的颗粒越来越少。张科利等<sup>[20]</sup>认为在降雨开始阶段, 土面疏松, 可供击溅的物质丰富, 溅蚀率主要取决于降雨动能的大小; 随着降雨历时的持续, 由于溅蚀过程中的分选特征, 地表面可供溅蚀迁移的物质, 即有利于溅蚀发生的最佳粒径范围的颗粒含量不断减少, 土壤表面渐渐粗化, 形成阻碍溅蚀的保护层; 结果使溅蚀作用强度随着降雨的持续逐渐减小。

所有红壤土样( $R_1, R_2, R_3, R_4$ )与紫色土土样(P)在降雨历时内都有致密层出现, 这可以用来解释溅蚀率的波动。但与黄土土样  $L_1, L_2$  不同的是, 致密层出现的部位并不在表层, 而在次表层。致密层上要么覆盖有砂粒(如  $R_1, R_2, P, R_4$ ), 要么覆盖有大团聚体(如  $R_3$ )。红壤土样  $R_1$  中砂粒含量  $82.4\%$ , 在降雨下细颗粒部分被溅蚀, 部分被淋溶, 只剩下大的砂粒留在表面, 次表层的致密层为小颗粒聚积所致; 红壤土样  $R_2$  含有  $57.4\%$  的砂粒, 表面疏松, 降雨结束时次表层有明显的颗粒聚积; 红壤土样  $R_3$  含有较多的黏粒, 有机质含量也较高, 导致团聚体的含量较高, 团聚体在被溅蚀分散的同时, 部分稳定团聚体留在了表面; 红壤土样  $R_4$  黏粒含量较高, 团聚体较稳定, 表层稍致密; 紫色土土样 P, 发育了表土结皮, 但表层有少量砂粒覆盖。

## 3 结论

溅蚀为后续的侵蚀搬运过程提供物质来源, 在坡面侵蚀中具有重要的作用。土壤溅蚀受土壤理化性质及降雨特征的影响, 而我国水土流失典型区代表性土壤的溅蚀特征却未受到应有的重视。基于这方面的不足, 本文采集了各区有代表性的土样, 并进行了模拟降雨溅蚀实验。

(1) 在相同的模拟降雨下, 黑土土样由于团聚体含量及稳定性高, 导致累积溅蚀量最低; 而黄土土样  $L_3$  因含有高的砂粒(易被溅蚀的颗粒范围), 其溅蚀量最高; 所有红壤土样、两种黄土土样( $L_1, L_2$ )及紫色土土样因粉粒含量占多数或微团聚体含量大导致累积溅蚀量居中。

(2) 降雨作用下因土壤发育表土结皮, 溅蚀率呈现波动态势。表土结皮发育受土壤结构及粒级的影响, 可以在两个空间位置发育: 一为表层, 一为次表层。究竟发育哪一种结皮取决于土壤结构: 在松散的含有适量砂粒或团聚体的土壤上, 表土结皮出现在次表层; 在紧实的, 细颗粒含量占主导的土壤上, 表土结皮出现在表层; 而在紧实的, 砂粒含量占主导或者团

聚体稳定性很高的土壤上不发育表土结皮。

(3) 不同地区土壤的减蚀特征差异很大,而减蚀在坡面侵蚀中的贡献之大已得到共识,因此采取不同的措施降低减蚀发生的几率,减少侵蚀物质来源很有必要。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Meyer L D, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water [J]. Trans. ASAE, 1969, 12(6):754-758,762.
- [2] Foster G R. Modeling the erosion process [M]// Haan C T. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. St. Joseph: ASAE, 1982: 297-379.
- [3] Bradford J M, Ferris J E, Remly P A. Interrill soil erosion processes: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1987, 51:1566-1571.
- [4] Watson D A, Laflen J M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion [J]. Trans. ASAE, 1986, 29(1):98-102.
- [5] Mazurak A P, Mosher P N. Detachment of soil particles in simulated rainfall [J]. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1968, 32: 716-719.
- [6] 高学田,包忠谟. 降雨特性和土壤结构对减蚀的影响[J]. 水土保持学报,2001,15(3):24-26.
- [7] 范荣生,李占斌. 坡地降雨减蚀及输沙模型[J]. 水利学报,1993(6):24-29.
- [8] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 雨滴减蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报,2004,41(4):632-635.
- [9] 程琴娟,蔡强国,马文军. 我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性[J]. 地理研究,2008,27(6):1290-1298.
- [10] 孙鸿烈,张荣祖. 中国生态建设地带性原理与实践[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [11] 卜崇峰. 表土结皮的发育机理及其侵蚀效应研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.
- [12] 陆兆熊,蔡强国,王贵平. 黄土丘陵沟壑区表土结皮与坡度对径流产沙的影响[M]//王福堂. 晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究. 北京:科学出版社,1992:66-79.
- [13] 程琴娟. 我国水土流失典型区土壤表土结皮发育因子及侵蚀响应研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2008.
- [14] Wakindiki I I C, Beir Hur M. Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66(3):897-905.
- [15] 中国科学院林业土壤研究所. 中国东北土壤[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [16] 李庆逵. 中国红壤[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [17] Römken M, Baumhardt R, Parlange J, et al. Rain-induced surface seals: Their effect on ponding and infiltration [J]. Ann. Geophys. (Series B), 1985,4(4):417-424.
- [18] Le Bissonnais Y, Cerdan O, Lecomte V, et al. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion [J]. Catena, 2005, 62(2/3):111-124.
- [19] Luk S H, Cai Q G. Laboratory experiments on crust development and rainsplash erosion of Loess soil, China [J]. Catena, 1990, 17(3):261-276.
- [20] 张科利,细山田健三. 坡面减蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究[J]. 地理科学,1998,18(6):561-566.