

## 不同粒径黄绵土的溅蚀规律及表土结皮发育研究\*

程琴娟<sup>1, 2, 3</sup> 蔡强国<sup>1, 3†</sup> 胡霞<sup>4</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 中国科学院陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

(4 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

**摘要** 溅蚀是土壤侵蚀过程的开始, 为侵蚀发展提供了物质来源。因此, 对其进行研究有助于对侵蚀过程的深入了解。本文选择了广泛分布于黄土高原地区的黄绵土, 通过对不同粒径的土样进行模拟降雨试验, 分析了土壤颗粒的溅蚀规律和表土结皮的形成过程, 以及溅蚀率变化趋势。结果表明, 不同粒径土样的溅蚀量差异明显, 粒径在 0.15 mm 附近的土壤颗粒最易被溅蚀; 在一定的降雨历时内不同粒径土样的表土结皮发育完善程度不同, 据此可以很好地解释溅蚀率的变化。

**关键词** 溅蚀; 表土结皮; 黄绵土; 土壤粒径

中图分类号 S157; S152 文献标识码 A

Ellison<sup>[1]</sup> 将侵蚀过程描述为两个基本的、连续的部分: 首先是土壤颗粒被剥离, 成为被搬运的物质; 接着被剥离的土壤颗粒被搬运。根据侵蚀力的不同又可分为四个过程, 即雨滴分散过程, 雨滴搬运过程, 径流分离过程, 径流搬运过程。不管何种表达, 雨滴分散、剥离土壤颗粒的过程始终是土壤侵蚀的开始, 因此, 对其进行研究有助于对侵蚀过程的深入认识。

溅蚀是指以雨滴打击为主要动力, 打击地表使土壤颗粒分散、产生跃移的一种侵蚀方式<sup>[2]</sup>。影响溅蚀的因子分为降雨动力与下垫面条件两类, 国内外学者的研究主要集中在降雨特性、土壤特性及地形因子等方面, 得出了溅蚀与影响因子间的各种经验关系式<sup>[3]</sup>。在土壤特性中, Ellison<sup>[1]</sup>、Woodburn<sup>[4]</sup>、范荣生<sup>[5]</sup> 等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, 更细颗粒则因具有粘性也不易被击溅。张科利等<sup>[6]</sup> 对粗颗粒含量高、粘土成分少的土壤溅蚀规律进行了分析, 认为降雨开始的最初阶段, 土面疏松, 可供击溅的物源丰富, 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; 同时, 雨滴打击也使表面变得坚实, 抗蚀强度增大, 结果使溅蚀作用强度随着降雨的持续逐渐减小。虽然一致认为土壤的溅蚀存在着一定的规律, 并且不同粒级的颗粒被溅蚀的难易程度不同, 但是所进行的定量化工作并不多。

表土结皮的形成主要是雨滴冲击对团聚体的破坏、细颗粒的向下移动及雨滴冲击对表面的压实作用<sup>[7-10]</sup>。土壤质地是影响结皮发育最重要的土壤变量, 早在 1952 年 Lutz 就断言表土结皮可以在除含有极少粉粒和粘粒的粗沙土以外的任何土壤上形成。Farres<sup>[11]</sup> 认为一旦结皮形成, 它就保护表面下的团聚体免受雨滴的冲击, 这样就切断了结皮进一步发育的物质来源。吴发启等<sup>[12]</sup> 通过结皮土壤与无结皮土壤的对比得出, 有结皮土壤的溅蚀量总是小于无结皮土壤。可见, 表土结皮与溅蚀之间存在着密切关系。

本文在上述研究的基础上提出了两个假设: 一, 不同粒径土壤颗粒的溅蚀量有差异, 并且存在着使溅蚀量达到最大值的粒径范围; 二, 不同粒径的土壤颗粒形成表土结皮的过程有差异。在这两个假设的

\* 国家自然科学基金项目(40471084)和中国科学院地理科学与资源研究所自然科学基金延伸支持领域前沿项目(CXI0G A04 10)资助

† 通讯作者: 蔡强国, 男, 研究员, 博士生导师。Tel: 010 64889310, E-mail: caiqg@igsnr.ac.cn

作者简介: 程琴娟(1981~), 女, 博士研究生, 主要从事坡地侵蚀及模拟研究。E-mail: cqj759@163.com

收稿日期: 2006-03-15; 收到修改稿日期: 2006-08-30

基础上, 本文通过试验进行了实际验证, 试图揭示黄绵土不同粒径土壤颗粒的溅蚀规律及表土结皮的形成过程。

## 1 材料与方 法

将采自黄土高原晋西离石王家沟流域坡耕地的黄绵土风干后, 过 3 mm 土筛筛去石块及植物根系等杂质, 根据实验室现有的 13 种不同孔径的土筛, 将土壤筛分为不同直径的 14 个级别, 由此得到 14 种不同粒径范围的土壤样品, 分别为: > 0.9 mm、0.63~0.9 mm、0.4~0.63 mm、0.355~0.4 mm、0.3~0.355 mm、0.22~0.3 mm、0.15~0.22 mm、0.105~0.15 mm、0.096~0.105 mm、0.076~0.096 mm、0.057~0.076 mm、0.043~0.057 mm、0.038~0.043 mm、< 0.038 mm。用湿筛法对 14 种土样的水稳性团聚体含量进行了分析, 结果见表 1。

表 1 不同粒径土壤水稳性团聚体组成

Table 1 Composition of water stable aggregates in soils different in particle size (%)

粒径等级 Particle size fractions (mm)	水稳性团聚体直径 Diameters of water stable aggregates (mm)			
	$d > 1$	$0.5 < d < 1$	$0.25 < d < 0.5$	$d > 0.25$
$D > 0.9$	1.42	5.52	4.06	11.00
$0.63 < D \leq 0.9$	-	5.30	6.06	11.36
$0.4 < D \leq 0.63$	-	3.80	13.52	17.32
$0.355 < D \leq 0.4$	-	-	24.96	24.96
$0.3 < D \leq 0.355$	-	-	15.76	15.76
.....	-	-	-	-
$D \leq 0.038$	-	-	-	-

试验研究是在室内人工模拟降雨条件下进行的。人工模拟降雨装置是由一套直立管道、调压器、压力表、向下的喷嘴四部分构成, 其中直立管道高 4.75 m, 水平延伸管长 0.9 m, 向下的喷头连接于水平延伸管上, 喷嘴型号是美国 Spraco, 离地高度 4.57 m。为了保证一定的可用面积, 采用两个喷头对喷的方式。试验前进行了多次率定, 降雨强度为  $1.2 \text{ mm min}^{-1}$  时, 水压需调节到 0.08 MPa, 均匀系数达 97%。试验用溅蚀盘为直径 30 cm、高 10 cm 的圆型盘, 盘中心是一直径 10 cm、高 3 cm 的圆型活动装土盘, 盘底部有渗水小孔。此装置是在 Morgan 溅蚀盘的基础上对盛试验用土的内圆盘外半径加大 1 cm 改进而成<sup>[13]</sup>。

试验中, 降雨强度控制在  $1.2 \text{ mm min}^{-1}$ , 降雨历时分别为 5 min (T1)、15 min (T2)、25 min (T3), 装土容重约  $1.3 \text{ g cm}^{-3}$ ; 通过称重法测定土样的溅蚀量, 取 3 个重复的平均值; 微形态观察所用处理样品取自相应时段的溅蚀试验, 用不饱和聚酯树脂固化<sup>[14]</sup>磨片后在偏光显微镜下拍照。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同粒径土样的溅蚀量

试验数据表明, 历时 5 min (T1)、15 min (T2)、25 min (T3) 时, 溅蚀量最大值对应的粒径分别为 0.355~0.4 mm (次大值对应的粒径为 0.105~0.15 mm)、0.105~0.15 mm、0.105~0.15 mm。但从总体变化趋势 (图 1 中的趋势线) 来看, 历时 T1、T2、T3 各粒径土样的溅蚀量随粒径的变化表现出相似的规律, 即随着粒径由小增大, 溅蚀量逐渐增大, 在粒径为 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。溅蚀量最大值对应的粒径为 0.15~0.22 mm。实测值与理论值之间出现偏差, 可能是因为溅蚀量最大值对应的粒径正好介于两个粒级之间。

图 1 中, 历时 5 min 时, 溅蚀量最大值对应的粒径与 15 min、25 min 不一致, 这可能是不完全相同的前期土壤条件及降雨历时太短两方面原因所致。研究发现小粒径土样与大粒径土样的溅蚀量都低于粒径 0.105~0.15 mm 土样的溅蚀量, 也就是说, 存在着使溅蚀量达到最大值的粒径范围。虽然小粒径土样与大粒径土样的溅蚀量都不高, 但是内在的原因却是不同的: 小粒径土样 ( $\leq 0.105 \text{ mm}$ ) 中, 粘粒含量较多, 在雨滴的打击、湿润作用下非水稳性团聚体分散、崩解的同时, 粘粒的吸水膨胀作用使得土壤颗粒之间的粘结力增大, 这样就很容易在土表形成一致密层, 阻止溅蚀的进一步发生, 因此溅蚀量低; 而大粒径土样 ( $> 0.15 \text{ mm}$ ) 随着粒径的增大, 打击分散土粒所需的雨滴能量增大, 再加上水稳性团聚体的含量也较高 (表 1), 土粒不易被分离溅散, 因此溅蚀量不高。

### 2.2 不同粒径土样的表土结皮形成过程

表土结皮是在雨滴打击夯实作用下, 团聚体的分散、颗粒重新排列的结果<sup>[7~10]</sup>。文献 [3] 中指出, 若土壤中含有较多的细颗粒, 击溅在破坏土壤表层结构的同时还会产生表层土壤结皮现象。可见, 细颗粒在表土结皮形成过程中起着重要作用。由于不

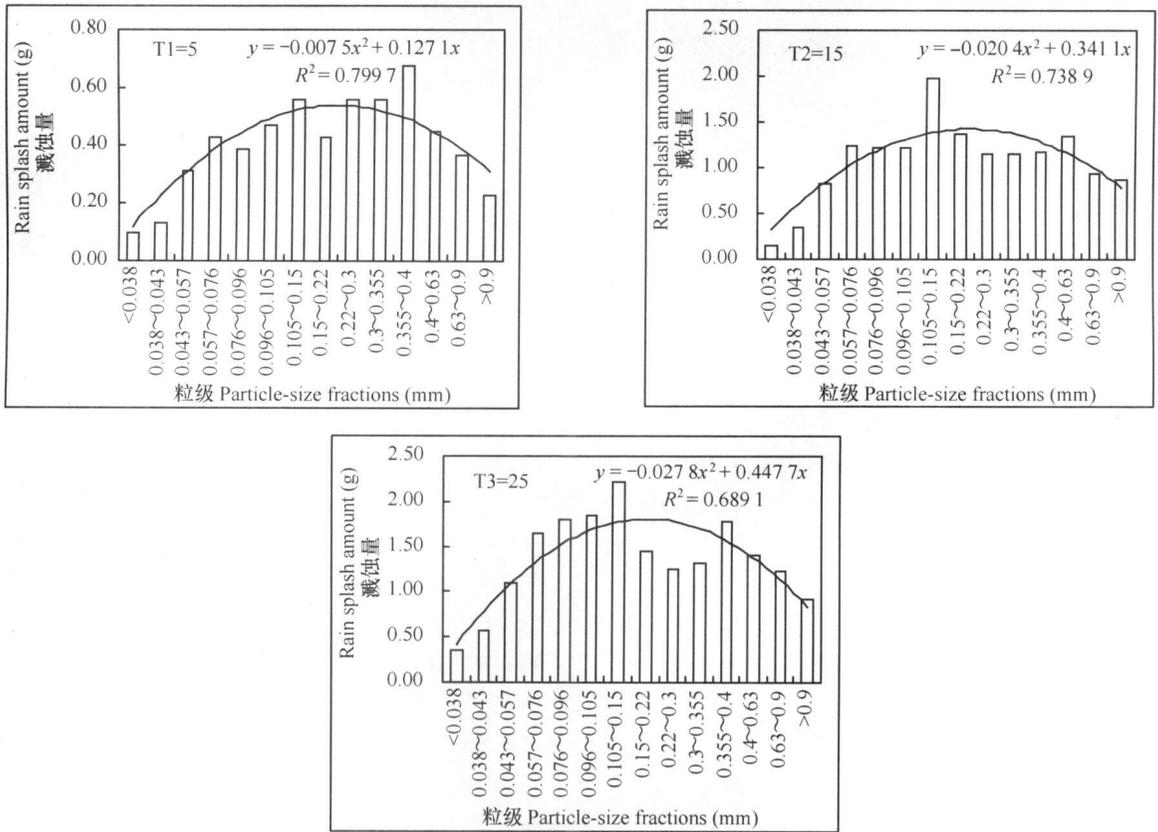


图 1 降雨历时 T1、T2、T3 溅蚀量与粒级的关系  
Fig. 1 Relationship between splash amount and particle size

同粒径的土样含有的水稳定团聚体、细颗粒有差别，因此表土结皮形成的过程也有差异。

试验中所有粒径土样在降雨过程中，表面都发育了表土结皮，只是随着粒径的减小，土样开始发育表土结皮的时间提早，图 2 给出了两个代表性粒径土样的微形态。小粒径土样在降雨初期就具备了表土结皮发育的条件，其开始发育表土结皮的时间相对要早(图 2d)；并且随着团聚体的分散，表土结皮发育所需的物质可以得到不断补充，在雨滴的打击夯实下，细颗粒不断堵塞下层大孔隙(图 2e)，逐渐在表面形成一层平滑的、较薄的致密层(图 2f)。大粒径土样在降雨初期含有的细颗粒有限，在降雨初期不具备表土结皮发育的条件(图 2a)，只有团聚体分散、崩解释放出细颗粒，土样才具有形成表土结皮的物质基础(图 2b)，因此，大粒径土样表土结皮完全形成需要相对较长的时间，随着时间的延续，表面逐渐平滑、致密(图 2c)。

2.3 表土结皮形成过程与溅蚀过程

雨滴打击土表造成溅蚀的同时，也致使土壤发育表土结皮；两者共处于降雨-土壤系统中。因此，

表土结皮的形成过程与溅蚀过程有着密切的关系。

表 2 是不同粒径土样溅蚀率随时间的变化趋

表 2 不同粒径土样溅蚀率随时间的变化  
Table 2 Variation of splash rate with time (g min<sup>-1</sup>)

粒径 Particle size fractions (mm)	历时 Rainfall time		
	5 min	15 min	25 min
< 0.038	0.02	0.01	0.01
0.038~0.043	0.03	0.02	0.02
0.043~0.057	0.06	0.05	0.04
0.057~0.076	0.09	0.08	0.07
0.076~0.096	0.08	0.08	0.07
0.096~0.105	0.09	0.08	0.07
0.105~0.15	0.11	0.13	0.09
0.15~0.22	0.09	0.09	0.06
0.22~0.3	0.11	0.08	0.05
0.3~0.355	0.11	0.08	0.05
0.355~0.4	0.14	0.08	0.07
0.4~0.63	0.09	0.09	0.06
0.63~0.9	0.07	0.06	0.05
> 0.9	0.05	0.06	0.04

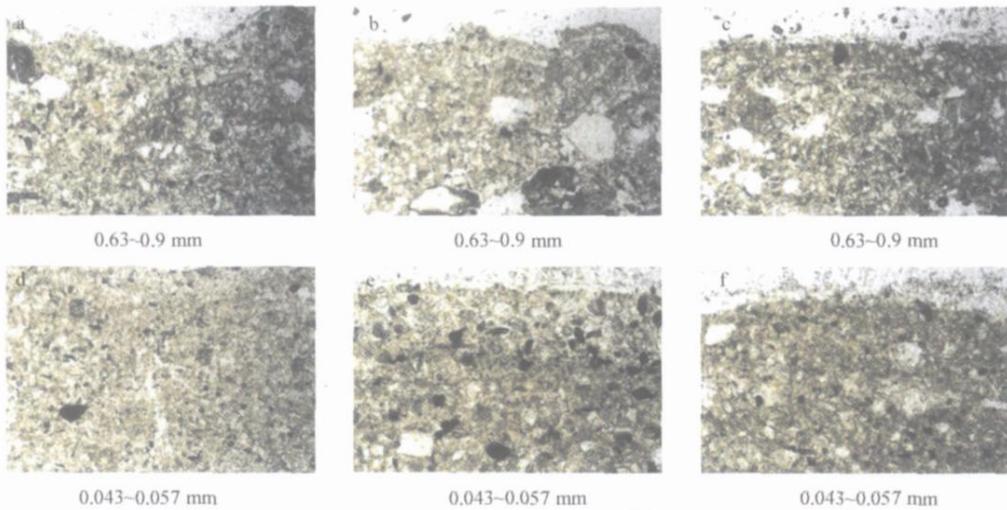


图2 降雨历时 T1、T2、T3 代表性粒级表土结皮发育过程(单偏光  $4\times 3.3$ )

Fig. 2 Developing processes of soil crust at the time of T1, T2, T3 on soils samples of representative particle sizes (plainlight  $4\times 3.3$ )

势。从中看出,随着粒径的增大,在不同历时下溅蚀率均呈现出先增大而后减小的趋势;这主要是因为土样颗粒大小不同,其被雨滴溅蚀的难易程度不同所致。对同一粒径土样,随着时间的延续,溅蚀率呈现降低的趋势(0.105~0.15 mm 与 > 0.9 mm 例外,可能是试验误差);这是因为雨滴打击土壤发生溅蚀的同时也引发表土结皮的发育,而表土结皮发育需要一定量的细颗粒<sup>[15]</sup>,土壤中细颗粒有两个来源,一是土样本身所具有,一是土样中非水稳性团聚体释放所得,不论来源于何处,都是一部分供溅蚀,一部分供表土结皮发育;可见,溅蚀与表土结皮存在着一定的竞争关系;另外,表土结皮发育完善的过程,也是土表抗溅蚀能力逐渐增强的过程<sup>[13]</sup>。在试验历时内,可以说由于表土结皮的不断发育造成溅蚀率呈降低趋势。

### 3 结 论

在以上试验分析的基础上,本研究初步得出以下结论:

1) 不同粒径土样,在雨强  $1.2 \text{ mm min}^{-1}$ , 历时分别为 5 min、15 min、25 min 的模拟降雨条件下,表现出随着粒径的增大,溅蚀量逐渐增大,在粒径为 0.15 mm 附近达到最大值;之后,随着粒径的增大,溅蚀量逐渐减少。

2) 不同粒径土样,在试验条件下均发育了不同程度的表土结皮;细颗粒是表土结皮发育的物质基础。

3) 历时 5 min、15 min、25 min 时,溅蚀率均随着粒径的增大先增大后减小。对同一粒径土样,随着时间的持续,表土结皮不断发育完善,因而溅蚀率逐渐降低。

### 参 考 文 献

- [1] Ellison W D. Soil erosion studies Part I. Agricultural Engineering, 1947, 28: 145~ 147
- [2] 吴普特,周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响. 水土保持通报, 1991, 11(3): 8~ 13. Wu P T, Zhou P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11(3): 8~ 13
- [3] 杨明义,田均良. 坡面侵蚀过程定量研究进展. 地球科学进展, 2000, 15(6): 649~ 653. Yang M Y, Tian J L. Research progress in erosion process on hillslope quantitatively (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2000, 15(6): 649~ 653
- [4] Woodburn R. The effect of structural condition on soil detachment by raindrop action. Agricultural Engineering, 1948, 29: 154~ 156
- [5] 范荣生,李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型. 水利学报, 1993(6): 24~ 29. Fan R S, Li Z B. Rainfall splash and sediment transportation model on slope land (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 1993(6): 24~ 29
- [6] 张科利,细山田健三. 坡面溅蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究. 地理科学, 1998, 18(6): 561~ 566. Zhang K L, Hosoyamada K. Splash erosion process and its relation to slope gradient (In Chinese). Scientific Geographica Sinica, 1998, 18(6): 561~ 566
- [7] Norton L D. Micromorphological study of surface seals developed under simulated rainfall. Geoderma, 1987, 40: 127~ 140
- [8] McIntyre D S. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. Soil Science, 1958, 85: 261~ 266
- [9] McIntyre D S. Penneability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. Soil Science, 1958, 85: 185~ 189

- [10] 朱远达, 蔡强国, 胡霞, 等. 土壤理化性质对结皮形成的影响. 土壤学报, 2004, 41(1): 13~ 19. Zhu Y D, Cai Q G, Hu X, *et al.* Effects of soil physical and chemical properties on soil crusting (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 13~ 19
- [11] Farres P. The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surface Processes*, 1978, 3: 243~ 254
- [12] 吴发启, 范文波. 土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究. 水土保持学报, 2001, 15(3): 1~ 3. Wu F Q, Fan W B, Study on relationship of soil crust and rainfall splash (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(3): 1~ 3
- [13] 胡霞, 蔡强国, 刘连友, 等. 人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征. 土壤学报, 2005, 42(3): 504~ 507. Hu X, Cai Q G, Liu L Y, *et al.* Development of soil crust through simulated rainfall in laboratory (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 504~ 507
- [14] 曹升庚, 金光. 土壤和非固结物质薄片的系统制备方法. 土壤专报, 1989, 第 43 号: 83~ 90. Cao S G, Jin G. Systematic preparation of thin sections of soils and unconsolidated materials (In Chinese). *Soil Bulletin*, 1989, No. 43: 83~ 90
- [15] Eldridge D J, Green R S B. The effect of time since fire on the cover and composition of crytoganic soil crusts on a eucalyptus shrubland soil. *Cunninghamia*, 1994, 3: 581~ 599

## RAIN SPLASH EROSION AND SOIL CRUST DEVELOPMENT OF LOESS SOILS DIFFERENT IN PARTICLE SIZE

Cheng Qinjuan<sup>1,2,3</sup> Cai Qiangguo<sup>1,3†</sup> Hu Xia<sup>4</sup>

(1 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

(2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(3 *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

(4 *College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

**Abstract** When raindrops hit the soil, they trigger rain splash and formation of soil crust. Researchers used to pay attention to interactions of them. However, the relationships between the two varying with particle size of the soil have seldom been reported. Under simulated rainfalls in laboratory, splash erosion and soil crust development of Loess soils different in particle size are observed and analyzed. Results show that distinct differences exist in amount of rain splash between soil samples. Soil samples about 0.15 mm in particle size are the most susceptible to rain splash. Within a given duration of rainfall, the development of soil crust also varies with particle size of the soil, which explains variation of splash rate.

**Key words** Rain splash erosion; Soil surface sealing/crusting; Loess soil; Soil particle size