

## 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究\*

唐泽军<sup>1</sup> 雷廷武<sup>1,2,-</sup> 张晴雯<sup>2</sup> 赵 军<sup>2</sup>

(1 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

(2 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

QUANTITATIVE DETERMINATION OF THE IMPACTS OF RAINDROP SPLASH  
AND CRUST ON SOIL EROSION WITH REE EXPERIMENTAL DATATang Zejun<sup>1</sup> Lei Tingwu<sup>1,2,-</sup> Zhang Qingwen<sup>2</sup> Zhao Jun<sup>2</sup>

(1 Faculty of Irrigation and Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

关键词 雨滴溅蚀; 土壤结皮; 土壤侵蚀; 细沟; 沟间

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

五十多年以前, Ellison<sup>[1]</sup> 将土壤侵蚀的过程分为四个基本过程: 降雨冲击引起的剥蚀, 降雨飞溅引起的剥蚀, 地表径流引起的剥蚀, 及径流迁移引起的剥蚀。最近, Kinnell<sup>[2]</sup> 根据土壤侵蚀中雨滴和径流的相互作用建立了土壤侵蚀的四个输沙系统: 雨滴剥蚀和溅蚀迁移系统, 雨滴剥蚀和雨滴引发的水流迁移系统, 雨滴剥蚀和水流的迁移系统, 水流剥蚀和水流迁移系统。这些系统可能是独自起作用, 也可能是共同的作用。在不算太长的研究历史进程中, 学者们对土壤侵蚀中雨滴的溅蚀作用、结皮的形成及细沟的侵蚀作用等分别进行了很好的深入研究, 并对各自的机理获得了深入的了解而且取得了许多好的成果<sup>[3,4]</sup>。但从整体上评价各个作用对土壤侵蚀的影响时, 仍然有很多问题令人困惑。由于土壤侵蚀是一次降雨事件中一系列作用的集合, 所以无论是在实验室还是在野外, 都没有适当的方法来鉴别雨滴溅蚀在土壤侵蚀中的构成。虽然明确知道结皮对土壤侵蚀有影响, 但不知道结皮影响所产生的侵蚀量在土壤侵蚀中所占的比重, 结皮影响土壤侵蚀的机理也还不是十分清晰<sup>[5,6]</sup>。所以大多数基于物理过程的土壤侵蚀模型还没有考虑结皮对土壤侵

蚀的影响, 显然, 这对一个要正确解析土壤侵蚀过程及准确预报土壤侵蚀的物理模型来说是不足的。

本文通过稀土元素示踪土壤侵蚀过程的降雨模拟试验, 由土壤侵蚀量沿坡面的分布的规律与坡面径流量的关系, 确定了雨滴溅蚀量在土壤侵蚀量中的构成; 并分析了雨滴打击下土壤表面结皮的形成、结皮形成后土壤径流的变化特征、结皮对土壤侵蚀的影响以及计算结皮影响所产生的土壤侵蚀量。

## 1 雨滴溅蚀

雨滴冲击引起的土壤溅蚀是雨滴大小、速度和形状的函数, 本质上来说, 雨滴溅蚀与雨滴打击土壤时的动能有关, 雨滴的动能是由雨滴的质量和雨滴接触土壤表面时的终端速度决定的。

雨滴溅蚀量的计算方法有多种, 但应用最广的是 Sharma 和 Gupta<sup>[7,8]</sup> 提出的雨滴溅蚀线性模型:

$$D_s = k_s(E - E_0) \quad (1)$$

式中:  $D_s$  为雨滴溅蚀量 ( $\text{g m}^{-2}$ );  $k_s$  为土壤可蚀率 ( $\text{g m}^{-2} \text{J}^{-1}$ );  $E$  和  $E_0$  分别为雨滴动能和临界动能 ( $\text{J}$ )。

\* 教育部科学技术研究重大项目(ZD01-10)、中国科学院“引进国外杰出人才”项目(982602)资助

- 通讯作者

作者简介: 唐泽军(1958~), 湖南人, 博士, 副教授, 主要从事水土环境的研究。E-mail: tangzejun@sina.com.cn

收稿日期: 2003-03-02; 收到修改稿日期: 2003-08-02

土壤表面的径流对雨滴溅蚀有着很大的影响, 只有降雨形成径流后, 雨滴的溅蚀才能形成真正意义上的土壤侵蚀。同时, 雨滴溅蚀与土壤表面的径流厚度有密切关系, 当径流水深大于某一临界厚度时, 雨滴打击在水面的动能会以波运动的方式消耗在水层中, 不能对土壤形成有效的溅蚀。这个临界深度通常称为“浅水”(Shallow water), 但是关于“浅水”的深度和“浅水”是怎样影响雨滴溅蚀的还存在不一致的意见, 有人认为当雨滴的直径小于“浅水”的深度时, 雨滴的溅蚀作用会大大降低。

土壤侵蚀包含细沟和细沟间侵蚀, 雨滴的溅蚀常常被合并到细沟间侵蚀中。实际上雨滴溅蚀发生的条件和机理都与细沟间的侵蚀不同, 当土壤表面的径流沿坡面的深度大于“浅水”时, 雨滴的溅蚀作用就被屏蔽了, 而细沟间侵蚀依然存在。对于模拟或小区试验来说, 坡上端的雨滴溅蚀和坡下端的细沟侵蚀就是这样的情形。通常情况下, 雨滴溅蚀、细沟间侵蚀和细沟侵蚀产生的土壤侵蚀量是混合在一起的, 很难将雨滴溅蚀量从其中鉴别出来, 所以雨滴溅蚀的计算很难, 常常采用估算的方法来评价雨滴的溅蚀。

REE 示踪土壤侵蚀过程的方法可以很好地示踪土壤侵蚀的过程, 揭示不同时刻土壤侵蚀率沿土壤坡面变化的规律, 从而可以将雨滴溅蚀、细沟侵蚀和细沟间侵蚀区分开来。图 1 是雨强  $150 \text{ mm h}^{-1}$  坡度  $36.4\%$  条件下, 土壤侵蚀率沿坡面变化的趋势图。图 1 显示的土壤侵蚀沿坡面变化的过程表明, 径流形成后, 在坡面某处存在一个临界细沟侵蚀距离。从临界距离处往下, 径流的剪应力开始大于土壤的抗细沟侵蚀的临界剪应力, 土壤的侵蚀率显著增大, 以细沟侵蚀为主; 从临界距离往上, 土壤侵蚀率小而且均匀, 径流属于“浅水”区域, 雨滴能在这里产生有效的溅蚀。其它条件下的降雨模拟试验都显示了土壤侵蚀沿坡面类似的变化趋势。在“浅水”区域, 径流的水深与雨滴的平均半径大致相当, 大约  $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$  左右。由于任何一定强度降雨的雨径分布是不均匀的, 有的雨滴半径是小于“浅水”深度的, 它们的有效溅蚀作用比较小。所以考虑单个雨滴动能产生的溅蚀对小区或模拟降雨试验的土壤侵蚀计算来说是没有太多的实际意义, 考虑单位面积上降雨的动能对溅蚀的作用则更为合理。

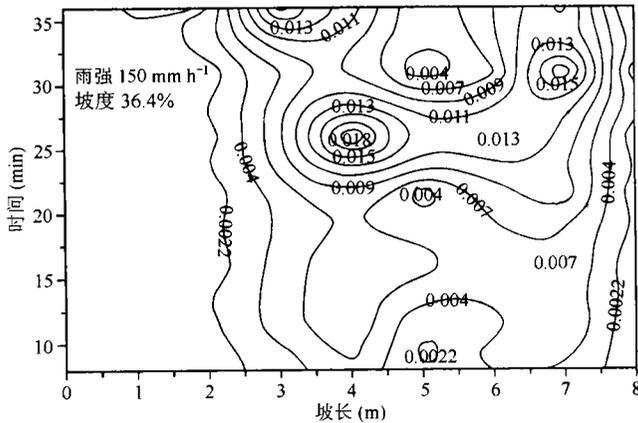


图 1 土壤侵蚀率随坡面和时间变化等值线图

根据稀土元素示踪土壤侵蚀沿坡面的变化情况, 将确定的临界细沟侵蚀距离和雨滴溅蚀、细沟侵蚀及细沟间侵蚀的鉴别计算列于表 1, 从表 1 可以看出如下趋势:

(1) 据临界细沟侵蚀距离确定的土壤表面“浅水”区域面积随降雨强度增大而减小, 随坡度增大而减小。

(2) 雨滴溅蚀、细沟侵蚀和细沟间侵蚀间的比例构成与降雨强度和坡度有密切关系, 随降雨强度

和坡度的增大, 降雨溅蚀的比例减小, 细沟侵蚀的比例增大, 细沟间侵蚀的变化不一定。

(3) 雨滴溅蚀量随雨强和坡度的增大而增大。

雨滴溅蚀是降雨强度和坡度的函数, 雨滴溅蚀与降雨动能之间有良好的线性关系, 坡度越大, 雨滴溅蚀与降雨动能之间的线性关系越好, 相关系数大于 0.94 以上。但小坡度的线性关系不好, 这可能是因为小坡度条件下雨滴溅蚀的“浅水”区域面积较大原因。一般情况下, “浅水”区域径流的剪应力小于

土壤的抗细沟侵蚀临界力,不会产生细沟侵蚀,这里的土壤侵蚀主要是由雨滴溅蚀产生的。但在小雨强小坡度条件下,“浅水”区域的面积相对较大,可能会出现如气体从土壤中或团聚体中逸出时产生爆破而

形成的土壤侵蚀。而且这里的雨滴溅蚀量本身就很小,所以其它因素产生的微量土壤侵蚀也会影响雨滴溅蚀与降雨动能之间的线性关系。

表1 雨滴溅蚀、细沟侵蚀和细沟间侵蚀的比例及雨滴侵蚀率

| 雨强<br>(mm h <sup>-1</sup> ) | 坡度<br>(%) | 临界距离<br>(m) | 雨滴溅蚀<br>(%) | 细沟侵蚀<br>(%) | 细沟间侵蚀<br>(%) | 降雨量<br>(mm) | 雨滴溅蚀率<br>(g mm <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ) |
|-----------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--|
| 50                          | 8.74      | 6.5         | 47.82       | 38.94       | 13.23        | 88.33       | 0.01   |
| 50                          | 36.4      | 3           | 11.35       | 87.69       | 0.96         | 69.17       | 0.55   |
| 50                          | 46.63     | 2.5         | 8.72        | 89.42       | 1.86         | 56.67       | 0.63   |
| 100                         | 8.74      | 3.4         | 10.27       | 77.34       | 12.39        | 128.33      | 0.31   |
| 100                         | 17.63     | 2.9         | 10.10       | 82.14       | 7.76         | 83.33       | 0.48   |
| 100                         | 36.4      | 2.5         | 13.55       | 85.32       | 11.39        | 98.33       | 0.80   |
| 100                         | 46.63     | 1.3         | 5.09        | 93.89       | 1.02         | 68.33       | 0.82   |
| 150                         | 8.74      | 3           | 20.00       | 78.8        | 2.2          | 103.75      | 0.06   |
| 150                         | 17.63     | 2.5         | 10.10       | 82.14       | 7.76         | 92.5        | 0.54   |
| 150                         | 36.4      | 1.5         | 5.04        | 93.86       | 4.48         | 90          | 0.92   |
| 150                         | 46.63     | 0.8         | 2.94        | 95.42       | 1.63         | 90          | 0.98   |

在降雨动能一定的条件下,雨滴溅蚀率随坡度增大而增大,但在坡度大于36.4%后,雨滴溅蚀率增加的幅度减小。由于土壤表面“浅水”区域是随坡度增大而减小的,所以总的雨滴溅蚀量不一定是随坡度增大而增大的。大坡度能增加雨滴溅蚀率的原因与雨滴打击土壤表面时的角度有关,显然,坡度增大时,雨滴溅蚀土壤时在下游方向遇到的阻力会变小,而且溅蚀后土壤颗粒飞行的距离和散落的面积都会增大,所以雨滴溅蚀率会随坡度增大而增大。

## 2 结皮效应对土壤侵蚀的影响

除了雨滴溅蚀引起土壤侵蚀外,雨滴打击还能在土壤表面形成结皮影响土壤侵蚀。结皮是怎样影响土壤侵蚀的问题至今还不十分清楚。无法从总土壤侵蚀量中分离出结皮影响形成的那部分土壤侵蚀量,也不能给出结皮影响下土壤侵蚀的数学表达式。虽然越来越多的研究已经意识到结皮对土壤侵蚀影响作用,但大多数土壤侵蚀模型中都没有考虑结皮的影响。

结皮是怎样影响土壤侵蚀的问题一直是土壤侵蚀研究中的重要问题。一般认为,结皮增强了土壤表面的抗剪切应力,减少了雨滴的溅蚀,同时结皮又降低了土壤的入渗率,增大了土壤表面的径流,因而增加了径流的剪应力以及径流的输沙能力。虽然减少的溅蚀量能减少土壤的侵蚀量,但增加的径流量又增加了土壤的剥离和运移量,因而增加了土壤的

侵蚀量。从土壤侵蚀的构成中知道雨滴的溅蚀量本身所占比重比较小,所以,结皮对土壤的影响主要反映在径流造成的土壤侵蚀中,如果忽略结皮对雨滴溅蚀的影响,那么结皮对土壤侵蚀的影响就可以用增加的径流所带来的那部分土壤侵蚀来评价了。

大量的降雨模拟试验和野外降水入渗情况表明,土壤结皮在降水入渗过程中起着十分重要的作用,它显著地降低了土壤的降水入渗。由于结皮形成在土壤的表层,它起着类似水阀的作用控制着降水的入渗,入渗的减少必然导致土壤径流的增加。试验中为了控制土壤表面不结皮或不完全结皮,在土壤表面分别覆盖了覆盖率为80%、60%和40%的PAM,没有覆盖PAM的土壤表面结皮发育完整。PAM覆盖率为40%和60%的土壤表面结皮不完全,结皮不完全程度随PAM覆盖率增大而增大,PAM覆盖率80%的土壤表面则没有形成结皮。结皮的径流量远大于未结皮的径流量。

结皮增加的径流量必然改变径流的动力学特征,使径流对土壤的剪应力增大。如果假定结皮增大的临界细沟抗剪应力相对径流的剪应力可以忽略不计,同时在一定的降雨动能和坡度的条件下,对于一定的土壤来说,可蚀率和临界细沟抗剪应力是不变的,可以定义一个结皮效应率来评价结皮对土壤侵蚀的影响。

$$F_c = (R_c C_c - R_{uc} C_{uc}) / R_c C_c \quad (2)$$

式中:  $F_c$  为土壤侵蚀结皮效应率;  $R_c$  为结皮土壤径流率( $\text{ml m}^{-1} \text{min}^{-1}$ );  $C_c$  为结皮土壤径流含沙率

( $\text{g ml}^{-1}$ );  $R_{uc}$  为未结皮土壤径流率( $\text{ml m}^{-1} \text{min}^{-1}$ );  
 $C_{uc}$  为未结皮土壤径流含沙率( $\text{g ml}^{-1}$ )。

式(2)中的未结皮土壤径流中的含沙率  $C_{uc}$  可以通过未结皮土壤径流的动力特征来求得, 如果考

虑  $C_{uc}$  与  $C_c$  变化不大, 则式(2)可以简化为:

$$F_c = (R_c - R_{uc})/R_c \quad (3)$$

现将不同试验条件下的土壤侵蚀结皮效应率计算列于表 2。

表 2 结皮和未结皮对土壤侵蚀的效应率

| 雨强( $\text{mm h}^{-1}$ ) | 坡度(%) | 不完全结皮 <sup>1)</sup> | 不完全结皮 <sup>2)</sup> | 完全结皮 <sup>3)</sup> |
|--------------------------|-------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 50                       | 8.74  | 0.19                | 0.40                | 0.81               |
| 50                       | 36.4  | 0.41                | 0.60                | 0.88               |
| 50                       | 46.63 | 0.57                | 0.68                | 0.86               |
| 100                      | 8.74  | 0.41                | 0.55                | 0.79               |
| 100                      | 17.63 | 0.31                | 0.56                | 0.69               |
| 100                      | 36.4  | 0.37                | 0.66                | 0.86               |
| 100                      | 46.63 | 0.30                | 0.34                | 0.54               |
| 150                      | 8.74  | 0.09                | 0.11                | 0.14               |
| 150                      | 17.63 | 0.34                | 0.39                | 0.46               |
| 150                      | 36.4  | 0.50                | 0.60                | 0.63               |
| 150                      | 46.63 | 0.29                | 0.39                | 0.44               |

1) PAM 40%; 2) PAM 60%; 3) PAM 80%

从表 2 可以看出, 结皮对土壤侵蚀的影响是较大的, 在小雨强条件下, 土壤侵蚀结皮效应率在 0.8 以上, 大雨强条件下, 土壤侵蚀结皮效应率减小, 坡度对土壤侵蚀结皮效应率的影响不大, 这也表明土壤结皮对降雨的动能比较敏感, 而对坡度不敏感。显然, 抑制或减少土壤结皮能减少土壤侵蚀。

由于过去测定土壤侵蚀沿坡面变化的方法有限, 所以, 测定的雨滴的溅蚀量、细沟侵蚀量以及细沟间侵蚀量和土壤侵蚀能力之间的关系是不清楚的。在过去许多试验中, 土壤侵蚀沿坡面变化率的测定不能准确地获得, 而准确的测定在详细研究降雨引起的土壤侵蚀过程是必需的。

REE 可以很好地示踪土壤侵蚀的过程, 展示土壤侵蚀率沿土壤坡面变化的规律, 区分雨滴溅蚀、细沟侵蚀和细沟间侵蚀, 确定雨滴溅蚀、细沟侵蚀和细沟间侵蚀间的比例构成。结皮有效地影响了土壤侵蚀, 结皮对土壤的影响主要反映在径流造成的土壤侵蚀中, 结皮对土壤侵蚀的影响可以用一个结皮效应率来进行评价。

## 参考文献

[ 1 ] Ellison W D. Studies of raindrop erosion. Agr. Eng., 1944, 25:

131~ 136, 181~ 182

- [ 2 ] Kinnell P I A. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 1004~ 1008
- [ 3 ] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 203~ 209
- [ 4 ] Bajracharya R M, Lal R. Crusting effects on erosion processes under simulated rainfall on a tropical alfisol. Hydrol. Process., 1998, 12: 1927~ 1938
- [ 5 ] Nearing M A, Bradford J M. Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49: 547~ 552
- [ 6 ] Morin J, van Winkel J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 1223~ 1227
- [ 7 ] Shama P P, Gupta S C. Sand detachment by single raindrops of varying kinetic energy and momentum. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53: 1005~ 1010
- [ 8 ] Shama P P, Gupta S C, Rawls W J. Soil detachment by single raindrops of varying kinetic energy. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 301~ 307