

## 人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征\*

胡 霞<sup>1,2,3</sup> 蔡强国<sup>2</sup> 刘连友<sup>1</sup> 蔡崇法<sup>3</sup> 李顺江<sup>2</sup> 朱远达<sup>2</sup>

(1 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(3 华中农业大学资源环境学院, 武汉 430070)

DEVELOPMENT OF SOIL CRUST THROUGH SIMULATED  
RAINFALL IN LABORATORYHu Xia<sup>1,2,3</sup> Cai Qiangguo<sup>2</sup> Liu Lianyou<sup>1</sup> Cai Chongfa<sup>3</sup> Li Shunjiang<sup>2</sup> Zhu Yuanda<sup>2</sup>

(1 College of Resources Science &amp; Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(3 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

关键词 沉积结皮; 结构结皮; 模拟降雨

中图分类号 S157.1 文献标识码 A

结皮是土壤表面普遍存在的致密层, 厚约数毫米至几厘米, 其表面强度较大, 孔隙较细, 且导水性较差<sup>[1-3]</sup>。土壤结皮在坡面侵蚀过程中占据重要的地位, 其直接导致入渗量的减少和地表径流量的增加, 从而极大地增加了诱发细沟侵蚀的可能性, 导致侵蚀量剧增<sup>[2]</sup>。也有研究表明, 结皮形成对土壤具有一定的保护作用, 在一定程度上可以减少溅蚀量、抑制风蚀、降低土壤表面水分蒸发速率<sup>[4,5]</sup>。土壤结皮是在物理分散力和化学分散力作用下形成, 而且土壤质地是影响其形成的最重要因素。研究表明, 结皮结构具有不稳定性, 在降雨过程中可能随时被地表径流的冲刷作用破坏又可能随时重新形成。静态孤立地考虑结皮的形成过程不可能完全了解土壤结皮形成的过程和特征, 因而用时间序列动态的描述结皮的形成过程则显得很有必要。从当前实验手段和方法来看, 通过制作土壤切片进行微形态观察, 并建立系列描述标准来比较不同时间段的土壤切片的结皮特征是研究结皮动态形成过程的较

为现实而有效的方法。本文试图用人工模拟降雨溅蚀的方法, 通过制作土壤切片, 在时间序列中动态地描述结皮的发育特征。

## 1 材料与方法

## 1.1 实验装置

实验在中国科学院地理科学与资源研究所坡地室内人工模拟降雨大厅中进行。模拟降雨装置是由一套直立管道、调压器、压力表、向下的喷嘴装置构成。其装置如图 1。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, 其离地高度 4.75 m。

实验用溅蚀盘为直径 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, 盘底部打上小孔。此装置是在 Morgan 溅蚀盘的基础上, 对盛实验用土的内圆盘外半径加大 1 cm 改进而成。

\* 中国科学院地理科学与资源研究所创新工程项目(CXI0G-A00-05-02)和国家科技攻关项目“黄土高原北部连片沙地开发利用技术示范区”(靖边 2002BA517A04)资助

作者简介: 胡 霞(1978~ ), 女, 江苏淮安人, 北京师范大学资源学院博士研究生, 主要从事土壤水蚀以及风蚀研究。E-mail: hx9210@ires.cn

收稿日期: 2003-12-09; 收到修改稿日期: 2004-04-15

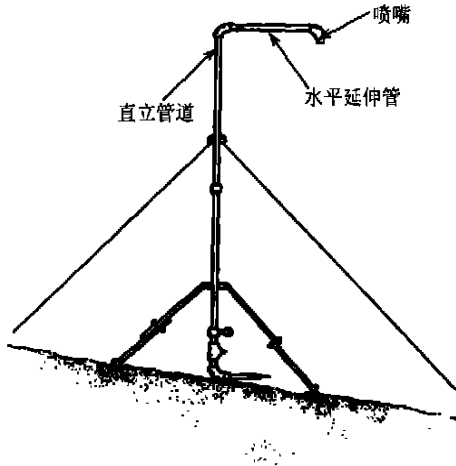


图1 人工模拟降雨装置示意图

## 1.2 土壤样品与实验设计

实验用土样共 4 个, 其中 2 个样品采自湖北省的中低丘陵区, 2 个采自山西省黄土丘陵区, 采样深度 0~10 cm。各土壤类型的取样地点、地形部位和土壤利用状况见表 1。

实验前将土壤样品风干并过筛, 土样容重控制在  $1.30 \text{ g cm}^{-3}$ 。实验前通过吸管法确定了表 1 中各土样的干团聚体颗粒组成(表 2)。人工模拟降雨实验强度为  $1.20 \text{ mm min}^{-1}$ , 历时分别为 5、10、15 和 20 min。通过称重法测定土壤的溅蚀量, 并且用贯入仪测量土壤表面强度随降雨历时的变化。然后, 对降雨后的土壤制切片并且在偏光显微镜下拍照。每个处理采用 5 个重复。

表 1 供试土样状况

土样编号	土壤类型	取样地点	地形部位	土壤利用
1	黄棕壤	湖北罗田骆驼岭	低丘中部	菜地
2	红壤	湖北咸宁贺胜桥	低丘中坡	耕地
3	黄土	山西张家沟	沟坡	草地
4	黄土	山西羊道沟	沟坡	林地

表 2 土壤颗粒组成

样品号	不同粒径颗粒质量所占比例(%)			
	> 0.05 mm	0.05~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	< 0.005 mm
1	75.45	9.52	1.48	13.55
2	9.82	38.3	11.09	40.79
3	27.2	46.35	7.36	19.09
4	9.42	43.64	29.2	17.74

## 2 结果与讨论

### 2.1 结皮的发育特征

从图 2(照片)可以看出湖北罗田黄棕壤表皮层结构随降雨历时的动态变化。当降雨历时 5 min ( $T_1$ ), 土壤结皮发育不明显, 表面较粗糙, 一些大的团聚体颗粒清晰可辨; 当降雨历时 10 min ( $T_2$ ), 土壤表面开始有不完整的结皮形成, 表层以下有一层薄的致密层出现, 颗粒密度增大, 孔隙变小; 在降雨历时为 15 min ( $T_3$ ) 时, 土壤结皮形成趋向完整, 土壤表面变得光滑, 土壤上层颗粒变得更加紧实, 颗粒孔隙更小, 结皮层下部出现较大孔隙。湖北咸宁红壤出现类似的结皮发育过程(图 3, 照片)。图 4(照片)反映山西张家沟黄土结皮的发育过程。黄土在降雨初期经过雨滴打击压实土壤表面就开始发育较明显的结皮。当降雨历时 5 min ( $T_1$ ) 时, 土壤表面形成薄的致密层, 这一层土壤密度很大, 孔隙度较小, 且下层有很明显的大孔隙出现。随着降雨历时的延长, 土壤表面逐渐光滑, 结皮形成趋向完整。导致南方土壤结皮形成滞后的原因可能是相对北方黄土的团聚度较高, 胶结性强, 因此必须经过雨滴打击分散大团聚体后才能导致结皮形成。

从上面分析发现, 土壤结皮的形成都是伴随土壤中大团聚体或者是大颗粒的分散而开始的。在雨滴冲溅作用下, 土壤团聚体颗粒的分散导致土壤表面的孔隙变小, 分散的细颗粒填塞大孔隙, 雨滴打

图 2 降雨历时  $T_1=5 \text{ min}$ ,  $T_2=10 \text{ min}$ ,  $T_3=15 \text{ min}$  湖北罗田黄棕壤结皮发育过程(单偏光,  $4\times 3.3$ )

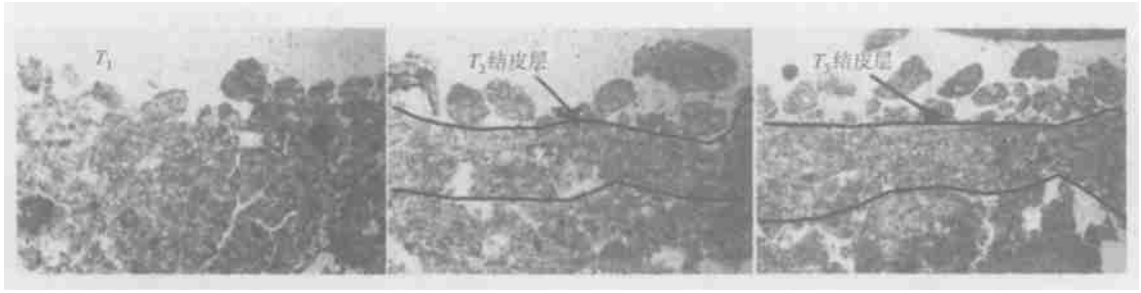


图3 降雨历时  $T_1=5\text{ min}$ ,  $T_2=10\text{ min}$ ,  $T_3=15\text{ min}$  湖北咸宁红壤结皮发育过程(单偏光,  $4\times 3.3$ )

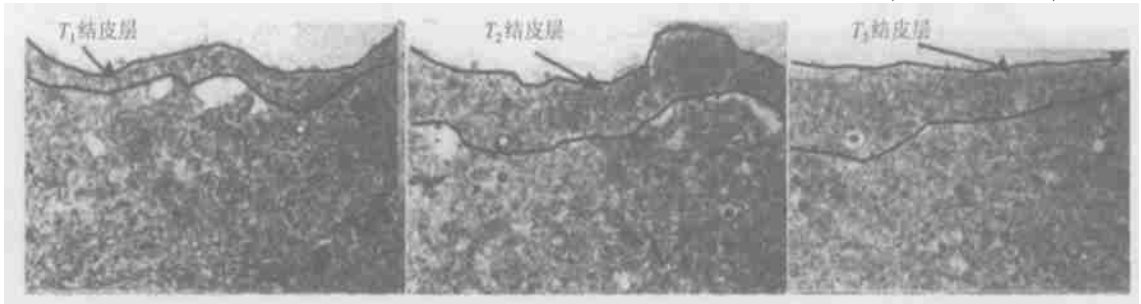


图4 降雨历时  $T_1=5\text{ min}$ ,  $T_2=10\text{ min}$ ,  $T_3=15\text{ min}$  山西张家沟黄土结皮发育过程(单偏光,  $4\times 3.3$ )

击压实土壤表面形成一层薄的致密层。同时发现,结皮的形成过程还伴随着下层大孔隙的出现。

## 2.2 溅蚀速率动态变化

图5表示湖北罗田黄棕壤和山西张家沟黄土两种土壤在降雨过程中溅蚀速率随降雨历时变化。黄棕壤在降雨前期溅蚀速率呈现增大的趋势,当降雨历时为 $10\text{ min}$  ( $T_2$ )时溅蚀速率达到最大值,此后溅蚀速率急剧降低,这可能是因为降雨前期该土壤表面基本没有结皮形成,雨滴的能量主要用来打击分散并且击溅土壤颗粒,其后土壤表面开始形成结皮,土壤的抗溅蚀强度增大,因此溅蚀速率快速下降。而黄土在降雨初期溅蚀速率就达到最大值,土壤结皮迅速发育形成,导致土壤表面抗溅蚀能力增大,因而溅蚀速率呈现减小的趋势。以上分析表明,土壤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。这与已有的研究结果一致。

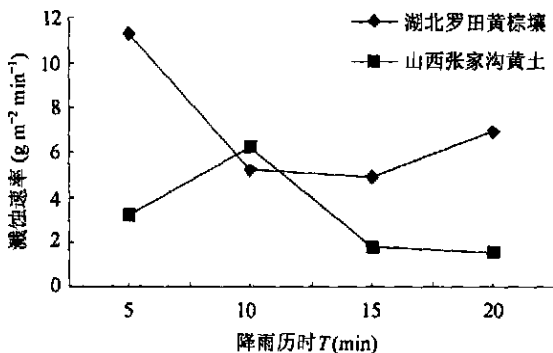


图5 两种土壤溅蚀速率随降雨历时变化

一些研究将土壤结皮分为物理结皮和生物结皮。其中,物理结皮按形成机制又可分为结构结皮和沉积结皮。并且认为结构结皮的形成,是因为雨滴对一个稳定的土壤结构表面不断打击压实,在雨滴打击后紧接着是土壤颗粒的重组。沉积结皮是通过静止或者缓慢流动水中的颗粒沉积而形成,此结皮的发育不仅依赖径流的动力条件,而且和所携带泥沙的物理-化学性质有关。

根据我们的实验观察发现,在降雨冲溅作用下,土壤质地会导致表层土粒破碎和蚀积过程的差异并进而影响结皮发育。图6(照片)和图7(照片)是典型的结构结皮。其厚度约 $0.2\sim 0.4\text{ mm}$ ,位于表层,由细颗粒组成,孔隙较小,颗粒密度很大,在致密层以下有大孔隙出现。它的形成可能与土壤的细颗粒相对较多有关。在雨滴打击下会引起团聚体破碎分散为细小颗粒,同时雨滴打击也引起上层土壤的压实,因此导致土壤表面形成致密结皮层。

实验中形成的沉积结皮是在次表层发育的细颗粒致密层,厚约 $0.2\sim 0.5\text{ mm}$ ,见图8(照片)和图9(照片)。结皮内部孔隙度降低,结皮上部有大颗粒,出现表面粗化现象,结皮层下部有大孔隙出现。沉积结皮的形成可能主要与土壤本身的粗骨性特征有关。在雨滴打击作用下,土壤表面因细颗粒被溅蚀、淋滤而发生“粗化”。“粗化”现象分为两类情况,一类是由大团聚体富集产生的粗化层,另一类是石砾富集导致的粗化层。前者形成可能是因为土壤表面水稳性团聚体含量较多的大团聚体相对较多,而且

细颗粒被雨滴淋洗进入下部大团聚体之间的孔隙中。而后的形成是因为土壤本身质地粗, 表层石砾较多, 雨滴洗涤细颗粒进入下层土壤孔隙中发生沉积而形成次表层结皮。上述两类沉积结皮形成的主要机制是水分下渗对细颗粒的淋滤及细颗粒的沉积, 雨滴的打击压实作用可能相对微弱。另外, 沉积结皮上部表层粗化引起的抗蚀能力的增强可能是降雨后期溅蚀速率降低的一个重要原因。

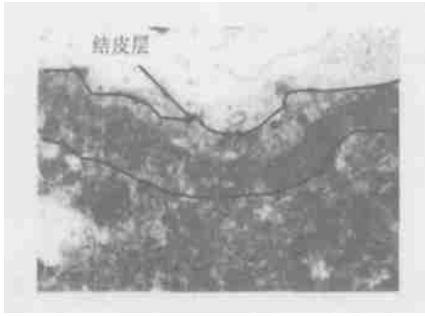


图6 山西羊道沟黄土降雨历时 15 min  
(结构结皮, 单偏光,  $4\times 3.3$ )

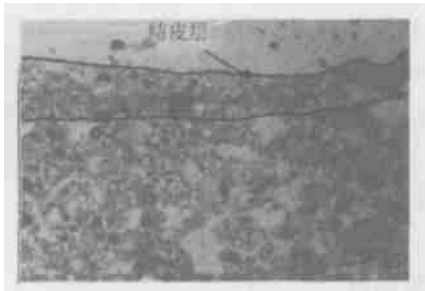


图7 山西张家沟黄土降雨历时 15 min  
(结构结皮, 单偏光,  $4\times 3.3$ )

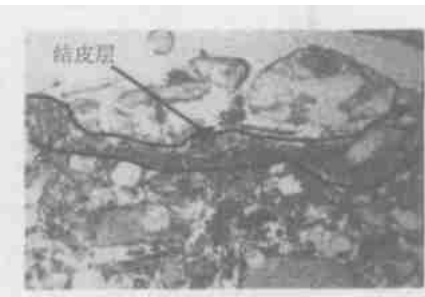


图8 湖北罗田黄棕壤降雨历时 10 min  
(沉积结皮, 单偏光,  $4\times 3.3$ )

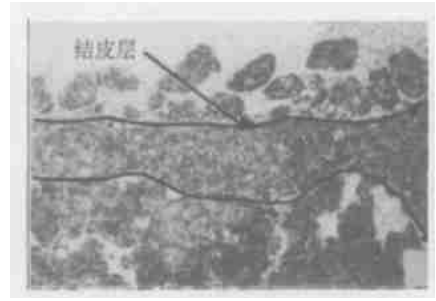


图9 湖北咸宁红壤降雨历时 15 min  
(沉积结皮, 单偏光,  $4\times 3.3$ )

### 3 结 论

实验揭示出土壤结皮的发育过程与土壤质地密切相关。北方黄土在降雨前期结皮即迅速发育, 南方黄棕壤结皮的发育则相对缓慢。在本实验条件下, 结皮的形成能够增强土壤抗蚀性, 导致溅蚀速率下降。由于土壤质地的差异, 在降雨过程形成了结构结皮和沉积结皮两种不同成因类型的结皮。结构结皮对土壤颗粒破碎和压实作用; 沉积结皮的发育主要与土壤细颗粒的淋滤和再沉积过程有关。本研究结构有助于细致了解土壤结皮形成过程、溅蚀速率的动态变化及结皮类型的发育机制。结皮层发育是土壤表面的一个普遍现象, 研究结皮结构、理化和力学、微生物活动等特性, 对深入理解这一特殊表面层在地表生物过程和物理过程中的作用具有重要理论和实际意义。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] McIntyre D S. Permeability measurements of soil crusts formed from raindrop impacts. *Soil Sci.*, 1958, 85: 185~ 189
- [ 2 ] Onofriok O, Singer M J. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48: 1 137~ 1 143
- [ 3 ] Bradford J M, Ferris J E, Renley P A. Interill soil erosion processes I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. *Soil Sci.*, 1987, 51: 1 566~ 1 577
- [ 4 ] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 ④ 侵蚀. *土壤学报*, 2003, 40(2): 401~ 406
- [ 5 ] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 iv. 入渗. *土壤学报*, 2003, 40(2): 178~ 195