

# 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究\*

卜崇峰<sup>1,2</sup> 蔡强国<sup>2</sup> 张兴昌<sup>1</sup> 程琴娟<sup>2</sup> 吴淑安<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要** 了解土壤结皮的发育特征及其对侵蚀的影响作用, 是认识土壤侵蚀机理、建立精准侵蚀预报模型的重要理论支持之一。本文通过模拟降雨试验, 探讨有无雨滴打击作用下黄土结皮的发育过程以及前期有无结皮时结皮侵蚀效应的动态特征。结果表明: (1) 随降雨的进行, 黄土结皮发生层容重、抗剪强度 (含水率为 20%) 不断增加, 30 min 内形成厚度约 3~4 mm 稳定结皮层; (2) 消除雨滴打击后, 黄土结皮发育过程同有雨滴打击时类似, 但程度减弱。雨滴打击同湿润作用对黄土结皮形成的贡献作用基本相当; (3) 降雨初期有、无结皮处理抗剪强度差别大, 随后急剧下降并趋同, 因而黄土结皮影响抗蚀性的作用微弱, 累积减蚀量的差异主要由减蚀起始时间的变化引起; (4) 黄土结皮的存在明显的减少入渗、增加径流, 但结皮效应随降雨进行逐渐消失。减蚀效应的函数表达式为  $C = 0.667 0 \ln(t) - 3.245 9$ , 结合减蚀量的计算式, 可较为准确地预测前期无结皮时某降雨历时的累积减蚀量。

**关键词** 黄土; 结皮; 发育机理; 侵蚀效应

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

土壤结皮是农耕地土壤普遍存在的一种表土结构致密的现象, 它具有减少降雨入渗、促进产流、改变侵蚀等作用。20 世纪 40 年代以来, 许多学者对不同地区、不同类型土壤的结皮过程及其侵蚀效应做了大量研究工作<sup>[1~8]</sup>。影响团聚体稳定性的所有因素, 均会对土壤结皮的发育产生重要影响<sup>[9]</sup>。研究表明, 有机质含量、含盐量 ( $\text{CaCO}_3$ , CEC)、交换性钠离子百分比 (Exchangeable sodium percentage, ESP)、土壤质地、矿物类型等均会对团聚体、黏粒的分散、崩解作用产生很大的影响, 进而影响结皮的形成<sup>[10~13]</sup>。此外, 雨滴动能和降雨强度则是影响结皮形成的重要外部因素<sup>[14~16]</sup>。显然, 当土壤类型 (土壤特性) 和降雨特征变化时, 结皮的发育特征及其对降雨入渗、侵蚀过程的影响也应发生很大的改变。

黄土高原是我国土壤侵蚀最为剧烈的地区之一, 长期以来侵蚀机理就是研究的热点和难点。20 世纪 90 年代以来, 国内学者便开展了黄土结皮的发育及其侵蚀影响研究, 取得了一些认识。张光远等发现, 30 min 降雨内 (雨强  $50 \text{ mm h}^{-1}$ ), 黄土形成厚

约 3 mm 厚的结皮层, 其发育同有机质、碳酸钙含量无明显关系<sup>[17~19]</sup>。蔡国强等<sup>[3]</sup>认为, 30 min 降雨过程中, 土壤团聚体被破坏、颗粒发生垂直和水平分选, 且结皮层发育经历形成破坏再形成过程。吴发启等<sup>[20]</sup>认为, 结皮的形成是以细砂和粗粉沙为骨架, 以小于 0.01 mm 的细小颗粒填塞土壤孔隙的一个物理过程; 而且, 降雨主要起打击夯实作用, 径流起淤积压实的作用。Cai 等<sup>[21]</sup>的研究显示, 前期有无结皮的坡面上的产流产沙则有着数量级的差异; 陆兆雄<sup>[22]</sup>发现, 初始有结皮的黄土平均减蚀分散率较无结皮的减少 38%~75%; 吴发启等<sup>[23]</sup>发现, 前期无结皮土壤的平均入渗率是结皮土壤的 1.25 倍, 平均产沙总量为 1.28 倍, 而结皮土壤的产流总量是前者的 1.15 倍。

可以发现, 已有关于黄土结皮发育的研究多采用单一指标、不利于对结皮发育动态的准确认识, 侵蚀效应探讨也多停留在静态层面, 在一定程度上限制了精准侵蚀预报模型的构建。为此, 本文通过模拟降雨试验, 探讨有、无雨滴打击作用下黄土结皮的发育过程以及前期有、无结皮存在时的结皮侵

\* 国家自然科学基金项目 (40701096, 40471084)、国家重点基础研究发展规划 973 课题 (2007CB106803)、国家科技支撑计划课题 (2006BAD09B06)、西北农林科技大学人才基金联合资助

作者简介: 卜崇峰 (1977~), 陕西榆林人, 助理研究员, 从事水土保持与土壤侵蚀研究工作

收稿日期: 2007-04-23; 收到修改稿日期: 2007-08-26

蚀效应的动态特征,研究结果将增加对黄土结皮的科学认识,为精准侵蚀预报模型的建立提供理论借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

试验土壤样品来自山西省离石市王家沟小流域,为黄土丘陵沟壑区的典型小流域。流域面积 9.1 km<sup>2</sup>,多年平均降水量 498.8 mm,降雨多集中在 6~9 月份,年产沙量多大于 50 t km<sup>-2</sup>。气候为温带大陆性季风气候,一年四季分明。流域地势高差

170 m,地形起伏变化大,大致可划分为四个地形带:Ⅰ顶部缓坡带,坡度 < 10°,多为梯田;Ⅱ沟缘线以上的坡地带,坡度为 15°~35°,多为耕地、部分为梯田;Ⅲ沟缘线以下的陡坡带,坡度常 > 30°,为林草地;Ⅳ沟谷谷底带,沟槽狭窄,沟口筑坝后已有冲击堆积物。本研究土壤采集于地带Ⅱ,为典型的离石黄土,常年种植玉米、谷子、马铃薯等。采集土壤带回室内过 4 mm 筛风干待用,经测定知 CEC、ESP、OM 含量分别为 80.6 mmol kg<sup>-1</sup>、0.6%、9.82 g kg<sup>-1</sup>,机械组成中砂粒、粉粒、黏粒含量分别为 332、613、55 g kg<sup>-1</sup>,质地为粉砂壤土。土壤团聚体分析结果见表 1。

表 1 黄土土壤团聚体分析结果

Table 1 Soil aggregation of loessial soil

土壤类型 Soil type	测定方法 Determination method	各级团聚体含量 Content of aggregates in various particle-size grades (%)				
		5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
黄土 Loessial soil	干筛 Dry sieving	8.3	14.0	7.8	10.1	59.8
	湿筛 Wet sieving	0.6	1.2	1.7	7.9	88.6

### 1.2 试验设计

模拟降雨装置是由一套直立管道、调压器、压力表、向下的两个对喷嘴装置构成;喷嘴是美国的轴流实心锥形 SPRACO 降雨喷嘴。其中,直立管道高 4.75 m,水平延伸管长 0.9 m,架设方法与率定结果同文献 [24]。试验设计 3 个处理,分别为盖网处理、不盖网处理以及前期有结皮处理。其中,不盖网处理指将土样放在率定点,进行历时 120 min 的降雨。盖网指在溅蚀盘上方 10 cm 高度处覆盖普通窗纱网(孔径约 1 mm × 1 mm),据前人研究判断这样可消除绝大部分的雨滴动能<sup>[25]</sup>。前期有结皮指将样品连续降雨 120 min 后取出,自然风干,进行同有结皮处理相同的试验。通过不盖网处理试验,认识结皮在雨滴打击下的自然发育过程;同盖网处理比较,探讨降雨动能对结皮形成的影响;无盖网同前期有结皮处理相比,了解黄土结皮对降雨入渗、产流、溅蚀的影响。试验中,降雨历时均为 120 min,前 15 min 取样间隔 2.5 min,20 min 后间隔 5 min,测算每个时段结皮样品的强度(贯入仪法<sup>[22]</sup>)、容重(涂膜法<sup>[26~29]</sup>)。装土前,首先将同小盘直径相当的塑料袋套上,挤出里面的空气,装好试验土壤。试验中,按设计时间间隔取出溅蚀盘,

划破小盘塑料袋收集并测定入渗量;然后,倾斜大盘排出底部集水,放置自然晾干后用毛刷刷出溅蚀量、称重得到该时段的累积溅蚀量。每个时段放置 4 个溅蚀盘,1 个作容重样,2 个用于强度测试。第 4 个风干后制作土壤薄片,在偏光显微镜下拍照分析结皮微结构。每个指标的测定均有 3 次重复。

## 2 结果与分析

### 2.1 结皮发生层容重的变化

容重是反映土壤或土壤结皮物理特性的重要指标,它的变化可以反映表层土壤孔隙状况、水分入渗能力以及抗侵蚀强度的变化<sup>[27]</sup>。测定结皮容重之前,确定一个合理的取样厚度至关重要。太厚,结皮层容重的变化可能由于整个土层的容重仅有微弱的变化而被掩盖;太薄,则可能由于提前人为结束剖面容重的变化而使形成稳定结皮的时间提前。比较结皮土样的剖面结构、土壤薄片的显微照片同原始土样的差异(见图 2),确定当前试验条件下,黄土结皮发育的最大厚度约 3~4 mm。同早前报道的方法<sup>[24]</sup>,确定黄土结皮的“发生层厚度”为 4 mm,将该厚度作为结皮容重取样的统一厚度。

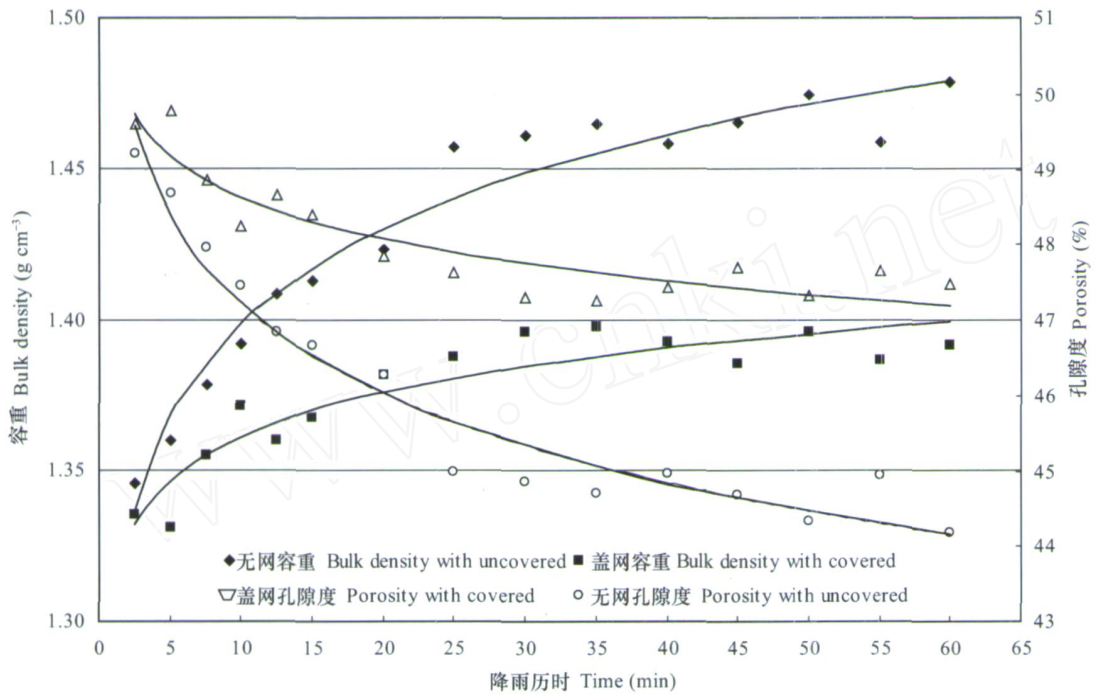


图 1 60 min 降雨过程黄土结皮发生层容重及孔隙变化

Fig. 1 Variation of bulk density and porosity of the crusting layer of loess during 60 minutes of rainfall

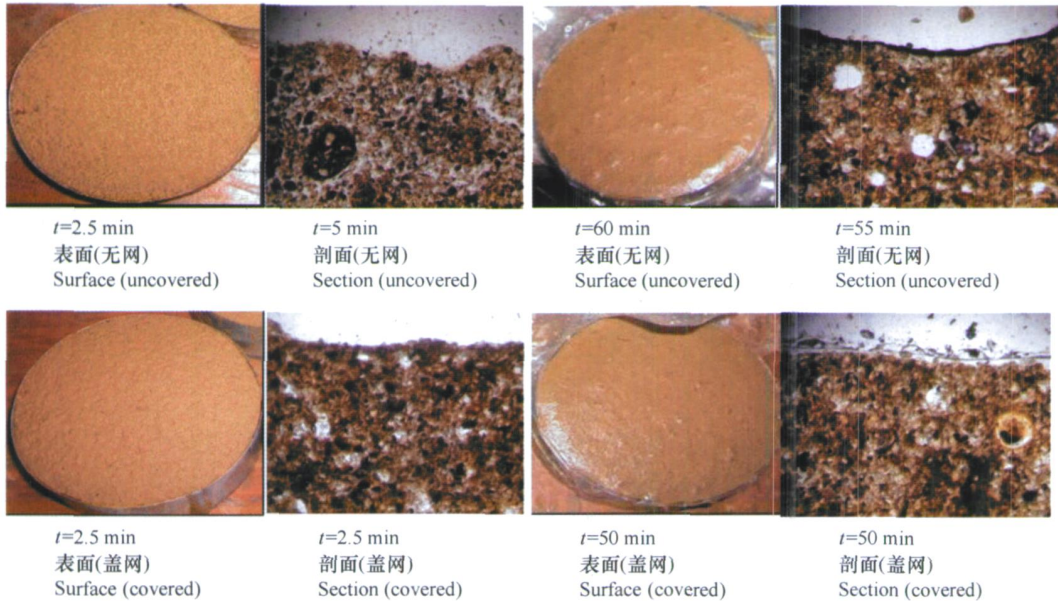


图 2 降雨过程中黄土结皮的结构变化(偏光显微照片,放大 4 倍,视野 1.6 mm × 2.0 mm)

Fig. 2 Change in micro-structure of crust of loess during rainfall (polarization microscope, ×4, field of vision 1.6 mm × 2.0 mm)

不盖网处理时,在 60 min 降雨过程中表层土壤容重呈不断增加的变化趋势(图 1)。0~30 min 时段内,表层容重增加最快,30 min 以后,容重呈现稳定趋势。说明,黄土结皮在 30 min 降雨内,发育基本完成并形成稳定的结皮层。Phillips 等<sup>[12]</sup>认为,

土壤有机质大于 20 g kg<sup>-1</sup>、交换性钠离子百分比小于 10% 时,土壤团聚体才具有相对的稳定性。据此判断,黄土团聚体含量低且易于被分散,而且水稳性团聚体含量远低于总团聚体含量,因此黄土迅速发育结皮。60 min 降雨内,容重增加 10.8%,孔隙

度下降 5.4%。盖网处理下,容重的变化趋势同不盖网处理相同,但容重增加、孔隙下降的幅度约为后者的 1/2。研究表明,土壤团聚体的分散源于湿润消散 (breakdown slaking)、黏粒膨胀 (microcracking)、雨滴打击 (mechanical breakdown) 和物理化学弥散 (physical-chemical dispersion) 四种机制<sup>[30, 31]</sup>。当土壤黏粒含量较少时 ( $< 190 \text{ g kg}^{-1}$ ), 雨滴打击和湿润消散作用是团聚体分散破坏即结皮发育的主要动力<sup>[32]</sup>; 另外, 一般情况下特别是当 CEC 或 ESP 含量较低时, 理化弥散作用对团聚体破坏、结皮发育的影响很微弱<sup>[12]</sup>。据此再分析试验黄土的理化性状, 可以判断, 黄土结皮发育的主要动力是雨滴打击与湿润分散作用。而且, 盖网与不盖网处理的差异主要是雨滴打击作用的强弱, 显然, 据容重的变化态势、大小判断, 湿润作用同雨滴打击对黄土结皮的发育作用基本相当。

## 2.2 结皮发生层的微结构变化

黄土的表面、剖面结构照片均显示 (图 2), 随降雨进行, 团聚体不断分散, 小土颗粒增加, 表层黄土结构变的紧实、孔隙度明显下降。这同上述容重的分析结果基本吻合, 但值得注意的是, 可能由于黄土的团聚体含量低且粒径小, 降雨前后土壤薄片的微结构差异不如紫色土那样清晰可辨<sup>[24]</sup>。

## 2.3 表层土壤的强度变化

研究表明, 贯入仪贯入深度 ( $P$ ) 同土壤抗剪强度 ( $\tau$ ) 之间存在幂函数关系<sup>[22]</sup>。含水率 ( $Y$ ) 同贯入深度 ( $x$ ) 值之间具有很好指数函数关系,  $Y = ae^{bx}$ 。含水率相等时, 降雨历时较长的土样有着较密实的表层, 对应着较浅的贯入深度表现较高的抗剪强度。据此, 首先测得某时段的土样在风干过程中, 不同土壤含水量对应的贯入深度; 根据二者的拟合方程关系, 求算每个样品在同一含水量 (20%) 时对应的深度值, 用  $1/P^2$  换算为强度值。测算结果显示 (图 3), 同容重的分析相似, 黄土结皮的抗剪强度随降雨历时的延长有递增趋势。不论盖网处理还是不盖网处理, 结皮强度变化最剧烈的时段在 0 ~ 30 min 之间, 30 min 后趋于稳定态势。表明 30 min 降雨是黄土结皮的发育关键期, 此后结皮的形成破坏作用处于平衡, 稳定结皮基本形成。

上述分析中的抗剪强度并非降雨过程中真实的抗剪强度的变化, 它仅从一个侧面反映了结皮的动态发育特征。事实上, 黄土结皮的发育过程中, 土壤含水率、物理结构同时发生变化, 抗剪强度亦同时有加强与削弱的两种相反驱动力, 因此有必要

求算、分析结皮发育过程中真实抗剪强度的变化动态。为求得真实抗剪强度值, 需要知道任意时段的土壤含水率, 根据抗剪强度同含水率之间的函数关系即可求知。试验中, 土壤饱和之前的降雨除了湿润土壤外, 部分以产流、入渗的方式排出土体。由于试验条件的限制, 未能获取径流数据, 故不能直接得到湿润土壤的那部分水量。但是, 考虑到降雨初始土壤干燥, 吸纳水分能力较强、入渗速率较快, 产流量很小, 因此作者假定降雨完全被土壤吸纳, 以此求算土壤的动态含水率, 最终计算得真实抗剪强度动态见图 4。结果表明: 随着降雨的进行, 土壤不断被润湿, 抗剪强度在前 15 min 迅速下降, 土壤水分达到饱和以后处于稳定的低值状态, 该结果也将为下一节中的侵蚀效应分析提供依据。

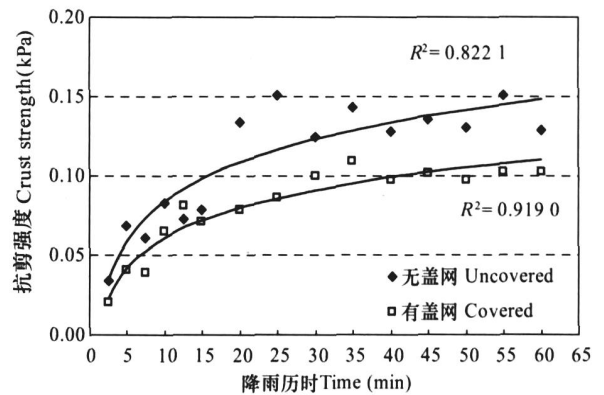


图 3 降雨过程中黄土结皮的抗剪强度变化

Fig. 3 Variations of shear strength of loess crust during rainfall

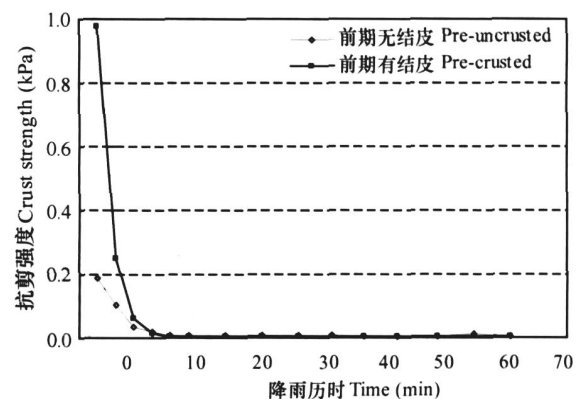


图 4 降雨过程中黄土表层真实抗剪强度的变化特征

Fig. 4 Variation of the real strength of the surface soil layer of loess during rainfall

## 2.4 黄土结皮的侵蚀效应

为揭示土壤结皮对侵蚀的影响, 参照唐泽军

等<sup>[33]</sup>曾使用的算法来反映黄土的结皮效应,公式为  $C = 1 - S_{uc} / S_c$ ,式中,  $C$ 为结皮溅蚀效应值;  $S_c$ 为有结皮时的累积溅蚀量;  $S_{uc}$ 为无结皮时的累积溅蚀量。用有、无结皮时的累积溅蚀量、累积入渗量分别代替公式中相应的指标,计算溅蚀效应值、入渗效应值。两个指标分别表示前期稳定结皮的存在对溅蚀、入渗的影响程度,  $C$ 值越大表示影响越明显。同时,利用总降雨量与入渗量的差值,计算结皮的径流效应值,计算方法与值的含义同入渗效应值、溅蚀效应值相同。

图 5、图 6反映了前期有无结皮两种状况下黄土的入渗、溅蚀量在降雨过程中的变化情况。分析、计算发现, 120 min降雨内,已形成稳定结皮的土壤,起始入渗时间推迟 10 min,累积入渗减少 45%,入渗效应值为 - 0.83。表明黄土结皮的存在,由于孔隙度的下降,也使得土壤入渗能力明显减弱。相

应的,结皮发育后径流量有所增加,径流效应值为 +0.06,增加幅度为 6.1%。从入渗、径流变化来看,黄土结皮的入渗效应虽较高,但由于累积入渗占降雨总量的比例小(无结皮的 11.9%,有结皮的 6.5%),因而其径流效应仍然很小。也就是说,黄土结皮的发育对径流量的增加幅度仍很微弱,作者推测在坡面尺度上黄土结皮对产流的影响作用可能也很小。黄土发育结皮后,溅蚀速率并无太大变化(图 5中曲线的斜率),累积溅蚀量仅下降 15%,溅蚀效应值为 - 0.18。两种处理的差异是由产生溅蚀的起始时间推迟引起。原因是:一方面随降雨的进行,前期无结皮黄土逐渐发育形成稳定结皮层,随之黄土表面的结构、力学特性基本保持稳定;另一方面,1 mm厚度的试验黄土层约重 10 g,两种处理下累积溅蚀量均不足 6 g,由此判断,前期有结皮的黄土不能被彻底击溅破坏,加之结皮的发育还历经“形成 破坏 形成”的动态过程<sup>[3]</sup>,所以随降雨的进行表层黄土结构特性变化也不会很大。因此,两种处理下黄土的溅蚀速率本应有的微弱变化,由于试验中击溅侵蚀量本身较小,试验误差可能掩盖了溅蚀速率在理论上应有的变化。

上述结皮效应的分析是静态的(降雨 120 min时刻的计算值),实际上随降雨的进行、结皮的不断发育,结皮侵蚀效应也当是动态变化的。溅蚀效应动态变化显示(图 7),黄土结皮的溅蚀效应总为负值,且随着降雨历时的延长而向零值逼近。即黄土结皮的存在具有削弱溅蚀的作用,但这种作用随着结皮的不断发育逐渐消失。原因是:前期有、无结皮处理下,表土抗剪强度的差异在降雨初期较大且对溅蚀的影响较明显(如真实抗剪强度的分析,见图 4),黄土水分饱和后,包括抗剪强度等在内影响

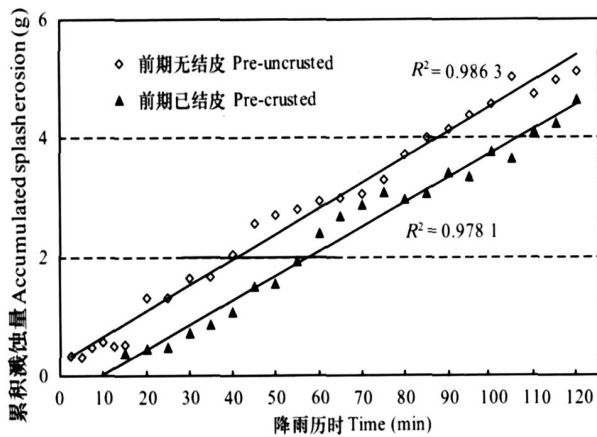


图 5 前期有无结皮时黄土的累积溅蚀量比较

Fig. 5 Comparison between the two treatments in splash erosion

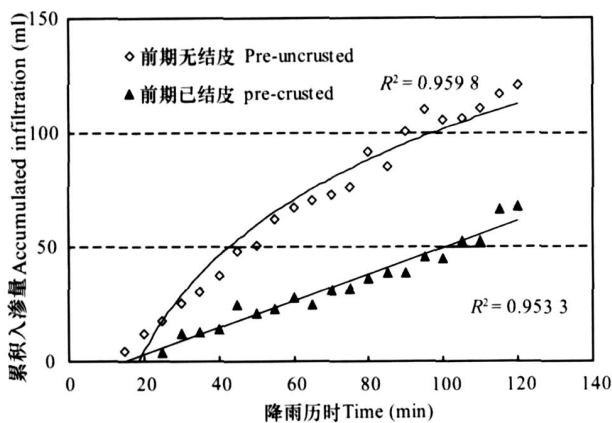


图 6 前期有无结皮时黄土的累积入渗量比较

Fig. 6 Comparison between the two treatments in soil infiltration

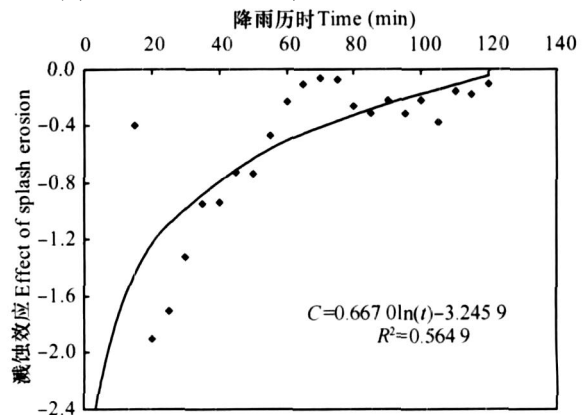


图 7 黄土结皮的溅蚀效应的动态变化

Fig. 7 Variation of the effect of splash erosion on bess crust

溅蚀的因素在两个处理之间便无明显差异。同理可知,黄土结皮的入渗效应、径流效应的变化趋势与溅蚀效应一致,故不再进一步的分析。若将溅蚀效应的拟合函数  $C = 0.667 0 \ln(t) - 3.245 9$  代入溅蚀量公式  $S_c = S_{uc} / (1 - C)$ ,则可以较为精确地预测前期无结皮时某降雨历时内的累积溅蚀量。当然,预测的准确性受降雨强度、降雨动能的影响,这里模型的更多意义是提供建立含有结皮因子侵蚀模型的一种思路。

### 3 结 论

同前人研究结果类似<sup>[3,6,17]</sup>,随降雨的进行,发生层容重不断增加、孔隙下降、致密度增加(等含水率时的抗剪强度递增),黄土结皮不断发育,30 min内形成厚度约3~4 mm的稳定结皮层。另外,消除雨滴打击后,黄土结皮发育过程同有雨滴打击时类似但程度较弱,雨滴打击同湿润作用对黄土结皮形成的贡献作用基本相当。前期有、无结皮试验处理的结果显示,黄土结皮削弱溅蚀的作用较弱,120 min内溅蚀效应值为-0.18,累积溅蚀量下降15%,溅蚀量差异主要是由产生溅蚀的起始时间推迟引起,原因是降雨初期两种处理真实抗剪强度差别大而后逐渐下降并变的相当。另一方面,黄土结皮加强入渗、产流的作用较强,120 min内,入渗效应值为-0.83,累积入渗减少45%,径流效应值为+0.06,累积增加6.1%。值得注意的是,黄土结皮具有微弱的影响抗蚀能力但明显减少入渗、增加径流的特点,这对水土流失的防治是非常不利的。扩大到坡面尺度后,侵蚀效应又会表现什么特征,有什么可行、合理的措施来调控土壤结皮,回答这些问题还需要进一步的试验研究。土壤结皮的侵蚀效应随着结皮的发育逐渐消失,将侵蚀效应的拟合函数(如溅蚀效应拟合函数  $C = 0.667 0 \ln(t) - 3.245 9$ )代入相应指标的计算公式(如溅蚀量计算公式  $S_c = S_{uc} / (1 - C)$ ),可实现前期无结皮某降雨历时的指标值预测。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Morin J, Winkel van J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1 223 ~ 1 227
- [ 2 ] Wakindiki IC, Ben-Hur M. Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 897 ~ 905
- [ 3 ] 蔡强国,陆兆熊. 黄土发育表土结皮过程和微结构分析的试验研究. *应用基础与工程科学学报*, 1996, 4(4): 363 ~ 370. Cai Q G, Luk S H. Experimental study of surface crusts process and microfabric analysis on loess soil (In Chinese). *Journal of Basic Science and Engineering*, 1996, 4(4): 363 ~ 370
- [ 4 ] 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
- [ 5 ] Singer M J. Physical properties of arid region soils. In: Skujins J. ed. *Semi-arid Lands and Deserts: Soils Resource and Reclamation*. New York: Marcel Dekker, 1991. 81 ~ 109
- [ 6 ] Li Z X, Cai C F, Shi Z H, et al. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 129 ~ 136
- [ 7 ] 崔燕,吕贻忠,李保国. 鄂尔多斯沙地土壤生物结皮的理化性质. *土壤*, 2004, 36(2): 197 ~ 202. Cui Y, Lü Y Z, Li B G. Physico-chemical properties of soil microbiotic crusts on erdos plateau (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(2): 197 ~ 202
- [ 8 ] Chen Y, Tarchitzky J, Brouwer J, et al. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Sci*, 1980, 130: 49 ~ 55
- [ 9 ] Mamedov A I, Shainberg I, Levy G J. Wetting rate and sodicity effects on interrill erosion from semi-arid Israeli soils. *Soil and Tillage Research*, 2002, 68: 121 ~ 132
- [ 10 ] Kemper W D, Koch E J. Aggregate stability of soils from western USA and Canada. *USDA Technical Bulletin No 1355*. US Government Printing Office, Washington D C, 1966
- [ 11 ] Kay B P, Angers D A. Soil structure. In: Sumner M E. ed. *Handbook of Soil Science*. New York: CRC Press, 1999. 229 ~ 269
- [ 12 ] Phillips C P, Robinson D A. The impact of land use on the erodibility of dispersive clay soils in central and southern Italy. *Soil Use Mgmt*, 1998, 14: 155 ~ 165
- [ 13 ] Abu Sharar T M, Bingham F T, Rhoades J D. Stability of soil aggregates as affected by electrolyte concentration and composition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, 51: 309 ~ 314
- [ 14 ] Jiang Z S, Liu Z. Effect of natural raindrop impact on loess crust, infiltration and erosion. *Proceedings of the 4th International Symposium on River Sedimentation*. Beijing: China Ocean Press, 1989
- [ 15 ] Agassi M, Morin J, Shainberg I. Effect of raindrop impact energy and water salinity on the infiltration rate of sodic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 186 ~ 190
- [ 16 ] 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
- [ 17 ] 张光远,蔡崇法,蔡强国,等. 黄绵土表土结皮的微形态特征及某些理化性质的研究. *晋西黄土高原土壤侵蚀规律试验研究文集*. 北京:中国水利水电出版社,1990. 68 ~ 75. Zhang G Y, Cai C F, Cai Q G, et al. Study on the micro-structure and



- physi-chemical characteristics of loessial soil surface crust (In Chinese). Sino-Canadian Symposium of Experimental Researches on the Law of Soil Erosion in the Loess Plateau Region, Western Shanxi Beijing: China WaterPower Press, 1990. 68 ~ 75
- [18] Luk S H, Cai Q G Laboratory experiments on crust development and rain splash erosion of loess soils, China Catena, 1990, 17: 261 ~ 276
- [19] 陆兆熊,蔡强国,王贵平,等. 黄土丘陵沟壑区表土结皮与坡度对径流产沙的影响. 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. Luk S H, Cai Q G, Wang G P, *et al* The impact of soil surface crust and slope on the runoff and sediment in the hilly and gully of Loess Plateau (In Chinese). Management of Soil Erosion and GIS Application in the Loess Plateau Region, Western Shanxi Beijing: Science Press, 1992. 66 ~ 79
- [20] 吴发启,范文波. 坡耕地土壤结皮形成的影响因素分析. 水土保持学报, 2002, 16(1): 33 ~ 36. Wu F Q, Fan W B. Analysis on factors affecting soil crust formation on slope farmland (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 33 ~ 36
- [21] Cai Q G, Luk S H, Chen H, *et al* Effect of surface crusting on water erosion: Laboratory experiments on loess soils, China Proceedings International on the Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting Belgium, 1985. 99 ~ 105
- [22] 陆兆熊,蔡强国. 黄土表土结皮强度和溅蚀试验研究. 见:陈永宗,等. 中加项目——晋西黄土高原侵蚀规律试验研究文集. 北京:中国水利水电出版社, 1990. 58 ~ 67. Luk S H, Cai Q G The experimental study on the loessial soil shear strength and splash erosion (In Chinese). In: Chen Y Z ed Sino—Canadian Symposium of Experimental Researches on the Law of Soil Erosion in the Loess Plateau Region, Western Shanxi Beijing: China WaterPower Press, 1990. 58 ~ 67
- [23] 吴发启,范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 97 ~ 101. Wu F Q, Fan W B. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 97 ~ 101
- [24] 卜崇峰,蔡强国,程琴娟,等. 紫色土表土结皮发育特征的试验研究. 土壤学报, 2007, 44(1): 1 ~ 6. Bu C F, Cai Q G, Chen Q J, *et al* Development of soil crust on the surface of purple soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 1 ~ 6
- [25] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究. 土壤学报, 1998, 35(1): 95 ~ 103. Zheng F L. Study on the rill and interill erosion in Loess Plateau region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 95 ~ 103
- [26] Blake G R, Hartge K H. Bulk density. In: Klute A. ed Methods of Soil Analysis Part I. 2<sup>nd</sup> Ed. Agron Monogr. 9. Madison, WI: ASA and SSSA, 1986. 363 ~ 375
- [27] Ali Saleh. Soil aggregate and crust density prediction. Soil Sci Soc. Am. J., 1993, 57: 524 ~ 526
- [28] 蔡崇法. 涂膜法测定黄土表面结皮的容重. 见:陈永宗,等. 中加项目——晋西黄土高原侵蚀规律试验研究文集. 北京:中国水利水电出版社, 1990. 45 ~ 48. Cai C F. The measurement of bulk density of soil surface crusting with polychloroethylene coated on Loess (In Chinese). In: Chen Y Z ed Sino—Canadian Symposium of Experimental Researches on the Law of Soil Erosion in the Loess Plateau Region, Western Shanxi Beijing: China WaterPower Press, 1990. 45 ~ 48
- [29] 范文波,李小娟. 涂膜法测定黄土结皮容重. 山西水土保持科技, 2001, 3: 9 ~ 10. Fan W B, Li X J. The measurement of bulk density of loessial surface crust (In Chinese). Shanxi Soil and Water Conservation, 2001, 3: 9 ~ 10
- [30] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I Theory and methodology. Eur. J. Soil Sci., 1996, 47: 425 ~ 435
- [31] Le bissonnais Y, Arrouays D. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. Eur. J. Soil Sci., 1997, 48: 39 ~ 48
- [32] Le Bissonnais, Olivet. Experimental study and modeling of soil surface crusting processes. Catena, 1990, 17(Suppl): 13 ~ 28
- [33] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 632 ~ 635. Tang Z J, Lei T W, Zhang Q W, *et al* Quantitative determination of the impactors of raindrop splash and crust on soil erosion with REE experimental data (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 632 ~ 635

## MECHANISM AND EROSION EFFECT OF DEVELOPMENT OF SOIL CRUST OF LOESS

Bu Chongfeng<sup>1,2</sup> Cai Qiangguo<sup>2</sup> Zhang Xingchang<sup>1</sup> Cheng Qinjuan<sup>2</sup> Wu Shu'an<sup>2</sup>

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract** The knowledge about characteristics and erosion effect of the development of soil crust is very important to exploration of soil erosion mechanism and construction of accurate prediction model for soil erosion. Through experiments

of events of simulated rainfall, development process of soil crust with or without raindrop impact and dynamic soil erosion effect of crusting in the initial period with or without soil crust on loess was discussed. Results show that (1) with rainfall going on, bulk density and shear strength (with moisture content at 20%) of the crust genetic horizon increased steadily; a stable crust, 3~4 mm thick, formed within 30 min; (2) soil crust development process remained more or less the same with or without raindrop impact, except for variation in degree, and the contribution of raindrop impact to crust formation was basically similar to that of soil humidification; (3) shear strength of the soil surface varied sharply between with crust and without crust at the initial period of rainfall, and the difference narrowed rapidly and tended to merge. Therefore, the effect of crust development on anti-erodibility was very weak. Variation of cumulative splash erosion was attributed to variation of the starting time of splash erosion; (4) the existence of soil crust on loess significantly decreased infiltration but increased runoff. But the effect of crust disappeared gradually with rainfall going on. The function of splash erosion is expressed as  $C = 0.667 0 \ln(t) - 3.245 9$ , which, coupled with the splash erosion model ( $S_c = S_{uc} / (1 - C)$ ), can be used to accurately predict the cumulative splash erosion within a certain period during the rainfall in loess without crust.

**Key words** Loessial soil; Surface crust; Development mechanism; Erosion effect