

# 降雨及聚丙烯酰胺(PAM)作用下土壤的封闭过程和结皮的形成

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, 北京 100083 2. 中国科学院水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘要** 封闭、结皮是土壤表面水土相互作用的结果,能显著减少土壤入渗、降低水资源的利用率,增加地表径流并导致土壤侵蚀。为深入理解封闭的作用过程和结皮的形成,利用 PAM 能缓解封闭作用并抑制结皮形成的特性,进行了一系列的人工降雨模拟试验,试验采用 3 个重复,包括 3 个雨强(50mm/h、100mm/h 和 150mm/h) 4 个坡度(8.74%、17.63%、36.4%和 46.63%)和 3 个 PAM 覆盖率(80%、60%和 40%)。通过对比土壤表面的电子扫描显微镜(SEM)照片,可以认为土壤结皮是由结构结皮和沉积结皮构成,入渗量与时间的历时曲线反映了结皮的 4 个形成过程。

**关键词** 封闭和结皮;PAM;结构;入渗

## Sealing Process and Crust Formation at Soil Surface Under the Impacts of Raindrops and Polyacrylamide

TANG Ze-Jun<sup>1</sup>, LEI Ting-Wu<sup>2</sup>, ZHANG Qing-Wen<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup> (1. China Agriculture University, Beijing 100083, 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Reso. *Acta Ecologica Sinica* 2002, 22(5): 674~681.

**Abstract** Soil seals and crusts are formed at the surface of soil due to the impacts of raindrops and break of aggregates. Soil seals and crusts can significantly reduce soil infiltration rate and subsequently low the utilization of water resources, and increase runoff, which result in soil erosion. Study of the processes of seals and formation of crusts is of very importance to understand the interrelations of runoff, infiltration, and soil erosion under rainstorms. The objectives of this study were for better understanding of crust formation the processes and mechanisms of seal and crust.

Experiments were conducted with rainfall simulation under laboratory conditions. These experiments involved three different rainfall intensities(50 mm/h, 100 mm/h, 150 mm/h); four slopes(8.74%, 17.63%, 36.4% and 46.63%) and four soil surface treatments(one control and three PAM coverage rates: 80%, 60%, 40%). The flume used for the experiments was formed platform, which is adjustable from 0% to 46.63% slope. The flume of 3 by 8 m was sub-divided with PVC plate into fifteen 800 cm long, 20 cm wide, and 38 cm deep mini-flumes for different soil treatments under the same laboratory conditions. The rainfall simulator is adjustable for its rainfall intensity, from 20 mm/h to 300 mm/h, and drop sizes from 0.6 mm to 3 mm.

Experimental soils used in this study were from Inner Mongolia. A typical loess sampled from top layer of cultivated soils. The soil contents about 60% of silts and about 15% of clays.

Soils, air-dried before passing through a 10mm sieve, were slightly compacted into the flumes for 15 cm in depth, over a 20cm thick layer of sand. The bulk density was 1.2 g/cm<sup>3</sup>, about the same as that of the cultivated

**基金项目** 科技部国家重大产业工程资助项目((内蒙)山丘区雨水储蓄农业高效利用产业化示范工程);中国科学院“百人计划”资助项目

**感谢**中国科学院水土保持研究所唐克丽,中国地质大学翟淑芬教授对本文的帮助。

**收稿日期** 2001-06-25 **修订日期** 2002-01-22

**作者简介** 唐泽军,湖南人,博士生,高级工程师。主要从事水土环境生态的研究。

field. PAM mixed with dry soil was applied uniformly at the soil surface for different coverage rates of PAM accordingly.

Each individual experiment run was divided into two consecutive stages. At the first stage , the designed rainstorm was turned on and runoff and sediment samples were collected from the downstream outlets in regular time( 1 , 3 , 3 , 5 , 5 , 5 , and 5 min ). As soon as the last sample was taken , the first experimental stage ended. After the first stage of experiment , the soil was set for 24 h before the second rainstorm was put on.

Three replicates were adopted for each individual experimental treatment.

Moist crust samples were taken at lower part of the flume and packed with filter paper and gauze. Samples were dried for at least ten days. After further desiccated , a small piece of the top layer of sample ( crust ) was severed carefully , then fitted on the top of the microscope stub with a thin layer of gold covering. The prepared sample was put into the scanning electric microscope( SEM ). A series of vertical and horizontal photograph were taken at magnification of from 1500 to 3500 times.

Crust classification varies in literature but there is in agreement on two major types : structural crust , which is formed with no involvement of any external imported material , and the depositional crust , which always involves external material into its construction.

SEM photographs showed that the surface of control soils tended to have more compact pile up of particles , higher bulk density , and smaller pores , but on the other hand that the surface of soils treated with PAM have stable aggregation and porosity.

Comparing the micromorphology of soil surface layer of the control with that treated with polyacrylamide ( PAM ), it can be concluded that soil crust should be consisted of depositional crust and structural crust. The conceptual model of soil crust has two main complementary processes : i ) , physical disintegration of soil aggregates and soil compaction caused by raindrops , and ii ) , chemical dispersion and movement of particles that clog the conducting pores and form a less permeable layer below soil surface. From the SEM micrograph of the crust , the effect of rain and runoff on soils was demonstrated. The impact of rainfall caused in situ particles of soils movement to form structural crust , and splash of raindrop and chemical dispersion caused particles downward movement into pores of soils to form depositional crust.

PAM treatment can prevent the disintegration of soil aggregates and even improve the structure of soils. Well-aggregated surfaces of soils were observed on the SEM micrograph of PAM treated soils. Strong bonds between flocci of PAM at the contact points were very important to increase soil strength. The flocculation of PAM seemed to be like “ chemical bond ” to hold particles together.

Infiltration rates for the control and PAM treatments were quite different. The infiltration rate in the control treatment declined rapidly with time , implying the rapid formation of seals , while the infiltration rate in the PAM treatments declined slowly with time , implying the prevention of PAM for the disintegration of soil aggregates. The infiltration curves for different treatments with time indicated the processes of seal formation. Seals were the processes of crusts , on the contrary , crusts was the effect of seals. The curves of infiltration showed that there are four stages of crust formation : i ) from the start of rainstorm to the occurrence of runoff ; ii ) from initial runoff to the steady state of runoff ; iii ) from steady runoff to the stop runoff ; and iv ) infiltration of ponded water.

**Key words** seal and crust ; polyacrylamide ; structure ; infiltration  
**文章编号** :1000-093X( 2002 )05-0674-08 **中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

土壤封闭、结皮(Sealing formation and crust)是土壤中较为普遍的现象。一次大于土壤入渗率的降雨及所产生的径流会产生一系列连续作用过程:土壤颗粒的剥离、搬运和沉积,其结果是导致土壤表层封闭,形成结皮。结皮是土壤表面一层厚 2~3mm 的薄层,具有更大的密度,更细的孔隙,更低的导水性。它能显著地减小土壤的入渗率,增大地表的径流量,妨碍种子发芽<sup>[1~4]</sup>。自 20 世纪 30 年代来,许多学者研究了结皮形成的作用过程,尽管他们各自表述不一,但大都认为结皮形成的主要机制是:①物理机械作用,由于雨滴对土壤表面的打击作用,引起土壤团聚体的分散,使表面的土粒产生位移和压密;②物理-化学作用,由于土壤团聚体的分散、阳离子的交换作用等,细小土粒在运移和沉积过程中堵塞表层土壤的孔隙形成结皮<sup>[2,5~13]</sup>。前者是由雨滴的能量和土壤特性所决定的,而后者则与水和土壤中的离子组成及含量有关。土壤表面封闭或结皮取决于很多因素,如土壤总的粘粒含量,雨强和雨量,坡度,土壤团聚体的稳定性,土壤的结构,及土壤溶液的离子浓度等<sup>[14]</sup>。

土壤表面封闭和结皮是土壤侵蚀的早期作用过程,并且影响着土壤的可蚀率和径流率。结皮和侵蚀都涉及土粒的剥离和运移过程,虽然大多数土壤侵蚀模型还没有考虑结皮对土壤侵蚀的影响,但学者们对土壤封闭和结皮的现象越来越感兴趣,越来越意识到土壤封闭和结皮对土壤侵蚀模型的重要性。一些新概念已经开始引进,并对土壤的剥离和运移已勾画出清晰的轮廓<sup>[7]</sup>。可以预见新的土壤侵蚀模型一定会将土壤封闭和结皮的基本概念作为自己的基本内涵之一。

土壤表层结皮是干旱和半干旱地区特别是黄土高原常见的问题,它的两个主要副作用是:减少土壤入渗、降低水资源的利用率,增加地表径流并导致土壤侵蚀。许多学者在研究结皮的同时,也在寻找抑制结皮形成的方法,他们进行了大量的野外和室内模拟试验,发现采用高分子作为土壤改良剂能改善土壤的结构和增加土壤中团聚体的(水)稳定性,特别是 Polyacrylamide(PAM),它不但能有效地维护土壤团聚体的结构,而且能形成新的团聚体,PAM 与水相互作用形成的黏絮作用有效地缓解了雨滴对土壤表面的打击并抑制了土壤团聚体的物理-化学分解,抑制了结皮的形成,从而可以增加土壤的入渗能力,降低地表径流<sup>[13,15~17]</sup>。

土壤表层封闭和结皮是看似简单而明了的自然现象,但它们的自然动力机制十分复杂,至今还不很清楚。正因如此,大家对土壤结皮的形成过程、结皮的基本结构都还没有达成统一的认识,甚至无法给土壤结皮形成一个合适的定义,许多文献资料对土壤封闭和土壤结皮也没有严格区分,而是将它们视为同一现象。这些都妨碍对土壤封闭和结皮的本质的理解及进一步的研究。

本文试图在前人的基础上提出对土壤封闭和结皮基本概念的理解,以及对土壤结皮的形成过程和结构的认识。本试验是用 PAM 对土壤表面进行处理,利用人工降雨进行模拟试验,并用电子扫描显微镜(SEM)对试验土壤的表层微观结构进行观察,以对比结皮和未结皮土壤微观形态的特征。本试验基于以下两个基本事实:①一定规模的降雨事件必然会产生土壤表层封闭并形成结皮,②一定量的 PAM 能有效地维护土壤的团聚体的结构,抑制土壤结皮的形成。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置

试验是在中国科学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行的。试验装置由一液压升降平台和降雨系统组成,试验土槽可以在平台上任意搭建。试验所用土槽大小为 300cm×800cm 矩形试验槽,在土槽框架内用 0.3cm 厚的 PVC 板将土槽划分成 15 个长 800cm 宽 20cm 高 38cm 的小槽,这可以使不同的处理处在同样的降雨条件下。每小槽下游端连接一鸭嘴型集流槽,供收集径流、采集样品用。整个试验槽底部用 100cm 长 3cm 宽 0.3cm 厚的铁片顺坡构成相距 50cm 的“人”字型格子与升降平台基座焊接相联,使试验槽与基座之间有一定的空隙以有利于渗流的畅通。试验槽坡度变化范围为 0%~58%。降雨系统由两个侧喷系统相互对喷构成,有效降雨覆盖面积为 13×15m<sup>2</sup>,降雨高度 16m,雨强可变化范围为 20~300mm/h,雨滴直径变化范围 0.6~3mm。

### 1.2 试验材料

试验土样取自于内蒙古清水河县耕层土壤,是典型的黄绵土,为淡黄色。土壤颗粒以粉沙为主,粉沙

粒占总量的 60% 左右,粘粒约占 15% 左右,容重约为  $1.2\text{ g/cm}^3$ ,土体松软,有团粒或团块结构。试验前将土样风干并过  $1\times 1\text{ cm}^2$  的粗筛,剔除植物根系等杂物。

PAM 是一种线型水溶性高分子聚合物,一般为白色粉末晶体,可溶于水,具有很强的黏聚作用,PAM 的分子链很长,它的酰胺基可与许多物质亲和、吸附形成氢键,它能在两个粒子之间产生黏结,通常一个 PAM 分子能同时黏结几个粒子。

### 1.3 试验设计与试验方法

试验由 3 个雨强(50mm/h,100mm/h,150mm/h)和 4 个坡度(8.74%,17.63%,36.40%,46.63%)相互交叉的 12 个试验构成。每个试验又分两个阶段,在前一阶段降雨试验完成后,将试验土样静置 24h,再重复前一阶段降雨试验过程。

试验过程中,土壤表面采用 4 个处理,即一个对照和覆盖率分别为 80%,60%,40% 三个 PAM 覆盖。每试验小槽采用一个处理。PAM 均匀播撒。试验采用 3 个重复。

试验程序 选定试验坡度和雨强。每次降雨试验前进行雨强标定。试验槽底部先装 20cm 厚的细沙,以利于渗入水的排放,然后在细沙上装 15cm 厚的试验土,细沙与土之间用细纱布隔开(纱布的作用是下次试验只须换黄土)。装土的容重约为  $1.2\text{ g/cm}^3$ ,与野外耕作土基本保持相同。按试验设计的土壤表面 PAM 覆盖率,分别在实验小槽的土壤表面上均匀播撒 PAM。装土完毕后,将试验槽调整到选定的坡度。开始连续不断的降雨,一旦开始产流,立即按一定的时间间隔测定径流量。降雨时间取决于产流时间,一般在最后一个试验小槽产流 30min 后停止降雨,完成试验的前一阶段。24h 后,重复前一阶段的降雨过程,完成一个试验。

SEM 样品的采取与制备 试验结束后,将试验土样静置一段时间(约 12h),在试验小槽的中下部位用宽刀采取 5cm 长 5cm 宽 3cm 高的土样,用化学滤纸将其包好,然后再用纱布包好放在室外不太强的阳光下风干。待样品完全干固后,用刀片采取表层土壤薄片,用胶固定在载物台上,再在土壤的表面撒上金粉。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SEM 照片与结皮结构

SEM 照片显示,对照和 PAM 处理的土壤表面具有完全不同的结构特点,对照土壤表层的土壤颗粒堆积紧密,孔隙小,在较大的孔隙中多见小颗粒的充填,表明具有明显的土壤结皮的结构特点。PAM 处理的土壤表面则不相同,在 PAM 的黏聚作用下,土壤中的大颗粒表面吸附很多细颗粒,颗粒之间多见絮状物的联结,形成类似格架状的结构,土壤中孔隙大而且连通好。

分类是结皮研究中十分重要的一个问题,它是土壤结皮形成动力机制的客观反映。自 1980 年 Chen 等<sup>[18]</sup>给出沉积结皮(Depositional crust)和结构结皮(Structural crust)的定义以来,尽管结皮的概念和分类还有争议,但有一点认识是比较一致的:根据结构中有或没有外来物质,结皮可分为沉积结皮和结构结皮两大类<sup>[6,19]</sup>。

结构结皮形成于位移物质原地的重新分布,这是由于雨滴打击作用,土壤颗粒物质不断地被夯实和板结的结果。图 1 是这种作用的很好注解。这是在雨强 50mm/h,坡度 8.74% 条件下形成的结皮,由于雨强相对较小,坡度平缓,产流初始点出现较晚,所以雨滴能不断地对土壤表面进行打击,使土壤团聚体不断地分裂,甚至形成单粒级土壤颗粒,同时土壤颗粒不断地在原地产生震动和位移,土壤颗粒在震动和位移过程中,不断地调整取向以寻找自己最合适的位置,从不太稳定状态达到稳定状态,最终形成凹凸相嵌式紧密结构的结皮。沉积结皮是在产流形成后由于土壤颗粒的分选、位移和沉积而形成。图 2,图 3 显然都是这种作用的结果。图 2 也是在雨强 50mm/h,坡度 8.74% 条件下形成的结皮,是细颗粒充填并堵塞孔隙的结果。图 3 是在雨强 150mm/h,坡度 17.63% 条件下形成的结皮,则是径流中悬浮土壤颗粒沉积的结果。图 2,图 3 虽然都是沉积结皮,但结皮结构中的外来物质的来源方式却不一样。图 2 中土壤孔隙中的细粒物质可能是入渗过程中悬浮颗粒的沉积,也可能雨滴飞溅引起的充填。图 3 则完全是悬浮颗粒的沉积形成的,不过,这种沉积不仅仅包含物理机械的沉积作用,化学沉积也起着十分重要的作用。由于雨水是由极性分子构成,加上雨滴对土壤团聚体的不断剥离,使得土壤颗粒表面会形成正负电荷不平衡得双层结

构<sup>[20]</sup> ,当携带悬浮颗粒的径流在土壤表面入渗时 ,其流速会成几何级数地减小 ,这样悬浮颗粒的动能不足以克服土壤表面的吸引力而被吸附在土壤的表面 ,很快土壤孔隙被堵塞封闭而形成结皮。

无论是室内模拟实验条件下形成的结皮还是自然条件下形成的结皮 ,都应该是由结构结皮和沉积结皮组成的 ,而不会存在单一类型的结皮 ,不过由于降雨性质的不同 ,可能是以结构结皮为主 ,也可能是以沉积结皮为主。



图 1 结构结皮×3500

Fig. 1 SEM micrograph of structural crust. Original magnification(O. M. )3500×



图 2 沉积结皮×1500

Fig. 2 SEM micrograph of depositional crust(O. M. ) 1500×

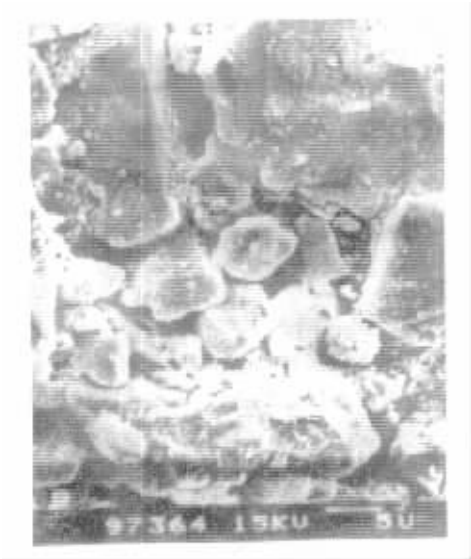


图 3 沉积结皮×2000

Fig. 3 SEM micrograph of depositional crust(O. M. ) 2000×



图 4 PAM 处理土壤结构

Fig. 4 SEM of soil treated with PAM.(O. M. )1000×



团聚体的分解及随后细粒充填和位移是结皮形成的基础,当土壤表面经 PAM 处理后,形成结皮的基础就会被破坏。图 4 是 PAM 覆盖率 80% 时在雨强 50mm/h,坡度 46.63% 条件下形成的土壤表面结构。与对照实验相比,两者的表面结构完全不同。PAM 处理土壤表层孔隙中不见充填和沉积的特征,多见围绕大土壤颗粒而形成的新的团聚体结构,而且这种新的团聚体结构更大,也更稳定,在对照实验土壤表面结构中所见土壤颗粒几乎全是单粒级颗粒,没有发现团聚体结构。PAM 溶解后形成的粘絮物质类似分子结构中的键,可以连接两个或多个土壤颗粒,形成稳定的结构。起着黏絮作用的 PAM“键”在土壤表层结构中随处可见(图 4),这种 PAM“键”实际是 PAM 溶解后的丝状黏絮物质,具有较强的黏结力,其作用就象分子结构中的化学键一样,可以使得土壤颗粒相互之间不再是点对点式的接触,土壤的结构更为稳定,土壤中格架式的孔隙不易遭受破坏。

实验表明 PAM 能改善土壤表面的结构,提高团聚体的稳定性,有效地抑制土壤结皮的形成。降雨初期, PAM 没有溶解时,雨滴同样会对土壤颗粒进行打击,使团聚体崩解,产生一部分细粒物质,随着 PAM 的逐步溶解,将缓解雨滴的打击作用,使团聚体不再分解,同时 PAM 捕获一部分产生的细粒物质而形成新的团聚体,团聚体和团聚体之间也会黏结形成更大的团聚体。径流形成的初期,由于还存有一部分细粒物质,径流中的含沙量将和对照试验径流中的含沙量相当,随后,径流中的悬浮颗粒迅速减少,PAM 覆盖率 40% 的将减少泥沙 70% 以上,PAM 覆盖率 60% 和 80% 的将减少泥沙 80~90% 以上,这大大地减少了形成沉积结皮的物质来源。抑制结皮形成的另外一个原因是,土壤表面格架式的孔隙削弱了土壤的封闭作用,相对对照试验来说,提高了土壤的入渗率,这一方面,增加了渗流的动能和携带物质的能力,使得很少的那部分悬浮颗粒能随渗流在土壤深处沉积;另一方面,将减少土壤表面的径流量,并降低径流的冲刷作用,从而减少径流中悬浮物质的含量。

## 2.2 入渗与封闭和结皮

入渗是一个非常复杂的问题,影响的因素很多,这里仅讨论入渗与封闭和结皮之间的关系。一般地说来,任何土壤表面的水土作用过程中都存在封闭作用,封闭作用使水的入渗减小,因此,入渗率是封闭作用量化的一个表征,入渗率随时间或累积降雨量的变化规律通常可用来刻画封闭作用的特征<sup>[10]</sup>。土壤表面的封闭现象非常复杂,它包括一系列的物理、化学作用过程,如雨滴的冲击引起土壤表面孔隙变小,细颗粒在大孔隙中的充填、堵塞,土壤孔隙的负压和毛细现象,土壤表面径流中悬浮颗粒的运移和沉积等,有些封闭作用至今还不很清楚。封闭作用的一个直接结果就是在土壤表面形成一层致密的连续薄层,封闭和结皮之间的联系非常紧密,一旦封闭开始作用,形成结皮的作用也随之开始,以至很多学者都不将它们区分而视为同一现象,但两者还是有着本质区别的,封闭是结皮的形成作用,而结皮是封闭作用的结果。反过来,结皮又进一步地影响水的入渗,使得入渗率急剧地下降,增加土壤表面径流量,并造成土壤侵蚀。Remley and Bradford<sup>[14]</sup> 1989 年曾定义表面封闭为结皮的初始阶段或湿润阶段,而结皮为随后的干固阶段,这个定义过于简单,虽然明确了封闭和结皮之间的差别,但没有揭示他们之间的本质区别。封闭是发生在土壤表面的一系列减少土壤入渗的水土相互作用过程。这些作用过程包括一系列的物理、化学作用。结皮则是在土壤表层因封闭作用形成的一层具有更大的密度,更细的孔隙,更低的导水性等特点的连续薄层。

图 5~图 7 是各种条件下,对照和 PAM 处理的降雨入渗随时间的变化曲线,这些曲线揭示了土壤封闭的历时过程。对比对照和 PAM 处理的入渗曲线,可以看出对照的入渗率无论在何种条件下都比各种 PAM 处理的入渗率要小,而 PAM 处理中,PAM 的覆盖率越大,其入渗率就越大。这表明在土壤表面经 PAM 处理后能有效地减少封闭作用并抑制土壤结皮的形成。对照试验的入渗量随累积降雨量(时间)变化规律显示了土壤封闭的规律,同时也展示了土壤结皮的形成过程。试验表明,每一实验的对照入渗曲线都显示了一个大致相同的趋势,产流形成后,在最初的短时间内,土壤的入渗量急剧地减少,然后逐步地趋于稳定并达到最小入渗量。现以在雨强 100mm/h 和坡度 8.74% 条件下的入渗曲线为例来说明(图 5),由于坡度相对比较平缓,初始产流时刻出现比较晚,直到 55min 才在部分对照实验土壤表面出现积水,60min 开始产流,这一阶段入渗率大于或等于降雨强度(1.67mm/min),雨滴的击打作用以及与其相关的封闭作

用在这一阶段占主导地位。雨滴的打击对结皮的形成具有重要的意义:①引起颗粒的崩解,使团聚体分散,为沉积结皮提供物质来源。②使土壤颗粒产生位移,由不稳定状态达到稳定状态。③飞溅作用,使细小颗粒充填堵塞土壤表面的孔隙。随后的3~4min内,入渗率迅速地降低,达到0.8mm/min,曲线的切线斜率很大,这意味着这一阶段内,土壤表面的封闭作用迅速地达到完善的程度,也表明水土之间的阳离子交换作用和径流中的悬浮物质的沉积作用是在短时间内完成的。68min后,入渗率开始稳定于一个常数0.5mm/min左右,当然,本阶段的稳定只是一个动态的稳定,入渗率会因为某一原因而上下波动,这说明土壤表面的封闭过程也是一个动态的过程。对比PAM处理的入渗曲线,它们都不存在这些特定,显然,由于PAM的黏聚作用,抑制了水土之间的阳离子交换作用和径流中的悬浮物质的沉积作用,所以入渗率在产流后的短时间内不会急剧地下降,当然,水土表面的其他封闭作用仍然存在,使得入渗率逐步减小,但是,这时的封闭作用已不足已形成土壤表面结皮。

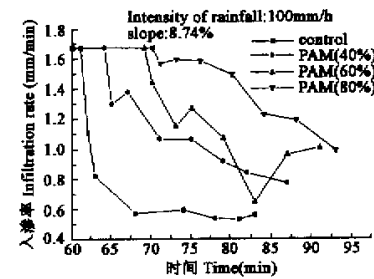


图5 对照与PAM处理的入渗随时间曲线

Fig.5 The infiltration rate curves vs. time applied for different treatment of PAM( Intensity of rainfall :100mm/h slope 8.74% )

上述的土壤封闭的历时过程实际上也是土壤表面结皮的形成过程。许多学者正是根据土壤封闭的这一历时过程提出了一个土壤结皮形成3个阶段的大致类似的模型<sup>[8,13,18]</sup> ①从降雨起始点到径流初始点,②径流初始点到径流稳定状态的出现,③径流和入渗的稳定阶段。Moore and Singer<sup>[21]</sup>认为在第一阶段,雨滴冲击的物理分散、压密和土粒地搬运作用是结皮形成的主要机制,在第二阶段,由水流引起的分散、携带、和土粒地沉积作用逐渐取得主导地位。第三阶段,结皮的均衡是主要特点。但土壤结皮还有一个第四阶段,尽管这一阶段在入渗曲线上没有反映出来,但是存在,而且也是一个很重要的阶段。降雨停止后,土壤表面会滞留大面积的静止水体,水体中的悬浮颗粒会根据粒径的大小依次沉积在土壤的表面,最终形成结皮。这一阶段在野外尤为重要,也正是野外结皮常见微层理结构的原因。

图6是雨强50mm/h,坡度8.74%条件下第二阶段降雨试验的入渗随时间的变化曲线,经过第一阶段长达2h的降雨,可认为对照土壤表面结皮已充分发育,此时的曲线实际上是结皮的入渗随时间的变化曲线,可以看出,降雨一开始,便很快形成径流,结皮的入渗率迅速下降,然后趋于稳定。对照PAM处理的入渗曲线,初始产流的时点相对滞后,也就是说,仍要经过一段土壤表面封闭时间,入渗率才会逐步减小,而

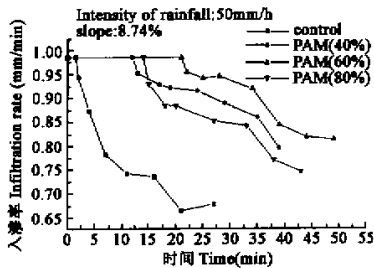


图6 结皮后对照与PAM处理的入渗随时间曲线

Fig.6 The infiltration rate curves vs. time applied for different treatment of PAM( Intensity of rainfall 50mm/h , slope 8.74% )

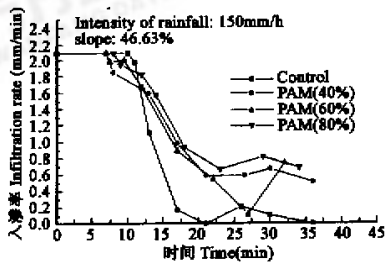


图7 大雨强、大坡度条件下入渗随时间的变化曲线

Fig.7 The infiltration rate curves vs. time applied for different treatment of PAM( Intensity of rainfall :150mm/h slope 46.63% )

且达不到结皮的入渗率值,PAM覆盖率越高,这值的差距就越大。对于雨强150mm/h,坡度46.63%这样的大雨强、大坡度的情形(图7),对照和PAM处理的入渗曲线都具备了形成土壤结皮的封闭入渗曲线的特征,只是PAM处理的入渗率要大于对照的入渗率,表明大雨强、大坡度条件下,PAM的黏结会被削弱,对照和PAM处理都会形成土壤结皮,只是PAM处理所形成结皮的完善程度不如对照形成的结皮。

### 3 结论

对照和PAM覆盖土壤表面的模拟降雨试验及电镜扫描(SEM)的照片,充分揭示了土壤表面结皮的形成过程和结皮的结构形态。结皮的微结构形态表明结皮应该是由结构结皮和沉积结皮组成的,而不会存在单一类型的结皮。入渗率随降雨累积量(时间)的曲线特征很好地刻画了土壤表面的封闭作用过程,同时,也揭示了土壤结皮的形成机理,曲线的两头平缓中间陡的形态特征,对映了土壤结皮形成的各个阶段及各个阶段中起着主导作用的封闭作用,展示了结皮形成的4个阶段。

### 参考文献

- [1] Smith H J C, Levy G J and Shainberg I. Water-droplet energy and soil amendments: effect on infiltration and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 1084~1087.
- [2] Gal M, Arcan L, Shainberg I, *et al.* Effect of exchangeable sodium and phosphogypsum on crust structure-Scanning electron microscope observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, **48**: 872~878.
- [3] Helalia A M, Letey J, Graham R C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, **52**: 251~255.
- [4] Beh-hur M and Letey J. Effect of polysaccharides, clay dispersion, and impact energy on water infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, **53**: 233~238.
- [5] Duley F I. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1939, **4**: 60~64.
- [6] Morin J and 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] Bissonris Y L, Fox D, Bresson L-M. Incorporating crusting processes in erosion models. NATO ASI Series, Vol. 155. P237~246. *Modelling soil erosion by water*. Edited by John Boardman and David Favis-Mortlock. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- [8] Onofiok O and Singer M J. Scanning electron microscope studies of soil surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, **48**: 1137~1143.
- [9] Giménez D, Dirksen C, Miedema R, *et al.* Surface sealing and hydraulic conductances under varying-intensity rains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, **56**: 234~242.
- [10] Levy G J, Evin J L and Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, **58**: 203~209.
- [11] Agassi M, Shainberg I and Morin J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **45**: 848~851.
- [12] McIntyre D S. Permeability measurements of soil crust formed by raindrop impact. *Soil Sci.*, 1958, **85**: 813~817.
- [13] Cai Q Q (蔡强国), Wang G R (王贵平) and Chen Y Z (陈永宗). Process and simulation of small watershed soil erosion in Loess Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998.
- [14] Remley P A and Bradford J M. Relationship of soil crust morphology to inter-rill erosion parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, **53**: 1215~1221.
- [15] Aly S M and Letey J. Physical properties of sodium-treated soil as affected by two polymers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 501~504.
- [16] Ben-hur M, Letey J and Shainberg I. Polymer effects on erosion under laboratory rainfall simulator conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 1092~1095.
- [17] Nadler A, Perfect E and Kay B. D. Effect of polyacrylamide application on the stability of dry and wet aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, **60**: 555~561.
- [18] Chen Y, Tarchitzky J, Brouwer J, *et al.* Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Sci.*, 1980, **130**: 49~55.
- [19] Bresson L M and Cadot L. Illuviation and structural crust formation on loamy temperate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, **56**: 1565~1570.
- [20] Marshall T J and Holmes J W. Soil physics. © Cambridge university press, 1988.
- [21] Moore D C and Singer M J. Crust formation effects on soil erosion processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 1117~1123.