

# 种植大豆条件下土壤结皮 对坡耕地径流和侵蚀产沙的影响

马波<sup>1,2</sup>, 由政<sup>2</sup>, 吴发启<sup>2†</sup>, 李占斌<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学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, 712100, 陕西杨凌;

2. 西北农林科技大学资源环境学院, 712100, 陕西杨凌)

**摘要:** 研究作物生长覆盖条件下土壤结皮对坡耕地径流和侵蚀产沙的影响, 可为坡耕地水土流失防治和水土资源合理利用提供科学依据。以种植大豆的坡耕地土壤结皮为研究对象, 利用人工模拟降雨方法, 观测前期土壤结皮和不同结皮厚度、覆盖度下的产流产沙, 分析前期土壤结皮的存在和土壤结皮厚度、覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响。结果表明: 1) 前期土壤结皮的存在对坡面的产流产沙量产生较大影响, 使坡面径流量高于非结皮坡面, 而坡面的土壤流失量又远低于非结皮坡面。2) 裸地前期有土壤结皮的坡面径流量较非结皮坡面高 5.27%, 产沙量则较其降低了 27.66%; 种植大豆条件下, 前期地表有土壤结皮坡面的径流量较非结皮坡面平均增加了 24.81%, 产沙量较非结皮坡面平均降低了 14.26%。3) 大豆作物的存在加大了土壤结皮与非结皮坡面之间径流量的差距, 缩小了二者间产沙量的差异; 坡耕地坡面土壤结皮厚度及其覆盖度的变化对坡面产流产沙的影响却不显著。

**关键词:** 作物; 土壤结皮; 土壤侵蚀; 坡耕地; 黄土高原

**中图分类号:** S157.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-3007(2015)03-0016-08

## Effects of soil crust on slope runoff and sediment yield under soybean cover

Ma Bo<sup>1,2</sup>, You Zheng<sup>2</sup>, Wu Faqi<sup>2</sup>, Li Zhanbin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

**Abstract:** The soil crust on slope farmland is a sort of compact slab structure formed by rainfall on the soil surface, and it has the characteristics of being smooth, compact, and easy to become ramous. Previous researchers have done a multitude of experiments regarding development mechanism, process of formation and factors affecting them, and their findings indicated that the soil crust has effects in decreasing infiltration, improving soil surface runoff amount, influencing the process of sediment yield, and reducing the biomass and yield of crop and so forth. Protecting slope farmland against soil and water loss has become an important issue of constructing bio-environment and realizing sustainable development in China. It is evident that the soil crust is a special underlying surface and it has significant effect on runoff amount and sediment yield on the slope. Planting is the main activity on slope farmland, and it has certain influence on the soil crust. The objectives of this study were to investigate the effects of soil crust on runoff and sediment yield under soybean cover and to provide theoretical basis for soil and water conservation and rational utilization of slope lands. Our study was carried out in the southern fringe of the Loess Plateau in 2010. Soil in the study area is Eum-Orthic Anthrosols. The intensity of the precipitation in this research was 80 mm/h, with each rainfall lasting for 60 min. We took slopes planted with soybean

收稿日期: 2014-06-14   修回日期: 2015-03-24

项目名称: 国家“973”重点基础研究项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程调控研究”(2007CB407201-5); 国家自然科学基金重点项目“黄土高原生态建设的生态-水文过程响应机理研究”(41330858)

第一作者简介: 马波(1982—), 男, 博士。主要研究方向: 黄土区坡耕地土壤侵蚀。E-mail: soilcrop@163.com

†通信作者简介: 吴发启(1957—), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 水土保持与流域管理。E-mail: wufaqi@263.net

as object , and by using simulated rainfalls we investigated the existence of soil crust before rain and influences of its thickness and coverage on runoff and sediment yield. Soil crust before rain had considerable effects on runoff and sediment yield. Analysis of the effects of soil crust on runoff and sediment yield on slope land under soybean cover showed that , the volume of runoff was higher on soil crusted slopes and amount of soil loss was much lower compared to that on slopes without soil crust. The soil crust made the beginning time of runoff yield earlier. With the growth of the soybean , the beginning time of runoff yield on the slope without crust was postponed much. The runoff and sediment yield became lower on slope land with soybean growing , and the soil crust on slope made the surface smoother. Besides , the structure of the soil crust is compact , which speeds up the runoff , lower the infiltration of rainfall and runoff , and keeps the runoff amount on slope with prophase soil crust at a relatively high level. On bare soil , the runoff and sediment yield on soil crusted slopes was 5. 27% higher and 27. 66% lower than that on slopes without soil crust , respectively. On slopes with soybean cover , the runoff and sediment yield on soil crusted slopes was 24. 81% higher and 14. 26% lower than that on slopes without soil crust , respectively. The crust has great influence on the processes of the runoff and sediment yield , which have significant difference between the slope with prophase soil crust and without soil crust. On the whole , the fluctuation of the process of runoff and sediment yield was smooth on slope with prophase soil crust , while the volatility of slope without soil crust fluctuates greatly. The presence of soybean cover increased the difference in runoff yield between slopes with and without soil crust , but reduced the difference in sediment yield. The effect of soybean on the differences of runoff and sediment yield between slopes with and without soil crust became stronger with the growth of soybean plants. Effects of thickness and coverage of soil crust on runoff and sediment yield were not significant. The influence of soil crust on the soil erosion varied greatly due to different soil types , terrain , rainfall , crops and other factors , which makes the problem become more complex. The research on the principle of the influence of soil crust on soil erosion is helpful for illustrating the progress of such effects , which provides reference for agricultural sectors to weigh the pros and cons in the real production.

**Keywords:** soybean; soil crust; soil erosion; slope farmland; Loess Plateau

我国水土流失问题较为严重 ,其大部分地区坡耕地水土流失量占该地总流失量的比例均高于60%<sup>[1]</sup>;因此 ,坡耕地的水土流失防治是我国生态环境建设和实现可持续发展的重要问题之一 ,也是现代土壤侵蚀最为突出的问题<sup>[2]</sup>。作物由于生长周期短且受人为干扰较大 ,其对坡面径流侵蚀泥沙的影响与林草植被存在较大差异。研究<sup>[3]</sup>表明 ,农田的径流量远大于林草植被类型 ,产沙量是林地的2~4倍 ,是天然荒坡的4~7倍 ,且变化幅度较大。由此可见 ,农田的防蚀能力较差;但是与裸地相比 ,具有一定覆盖度的农田 ,其产流量较少 ,产流时间也会相对延迟<sup>[4]</sup>。孙飞达等<sup>[5]</sup>通过对小麦(*Triticum aestivum* L.)的研究认为 ,小麦地可以将坡面径流量降低约22% ,而裸地与小麦地侵蚀模数之比最大可达25倍。R. K. Singh等<sup>[6]</sup>通过对陡坡耕地上种植大豆(*Glycine max* L.)和花生(*Arachis hypogaea* Linn.)研究认为 ,种植作物可将径流量和泥沙量分别降低29.6%和27.7%。王健等<sup>[7]</sup>研究认为玉米

(*Zea mays* L.)坡面年径流量平均较裸地降低了19% ,年产沙量平均较裸地降低了30%;苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)坡面年径流量平均较裸地降低了76% ,年产沙量平均较裸地降低了86%。可见不同种类的作物对坡面的防蚀能力相对较弱且差距较大。

坡耕地土壤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>[8-11]</sup> ,是在雨滴冲溅和土壤黏粒理化分散作用下 ,土表孔隙被堵塞后形成 ,或挟沙水流程经土表时细小颗粒沉积而形成的一层很薄的土表硬壳<sup>[12]</sup>。众多学者就土壤结皮的发育机制、形成过程及其影响因素进行了大量研究 ,认为其主要具有减少入渗 ,促进地表径流 ,影响坡面产沙过程和降低作物生物量及产量等作用<sup>[13-19]</sup>。目前学界对土壤结皮促进地表径流持一致观点 ,但是对其是否促进坡面产沙量还存在较大的争议。蔡强国等<sup>[20]</sup>研究指出 ,坡耕地前期有土壤结皮时 ,地表更容易形成径

流更易发生侵蚀产沙;在相同情况下,前期有土壤结皮的坡面径流系数、累积径流量、侵蚀模数以及累积产沙量比非结皮坡面高出数倍甚至数十倍;前期土壤结皮密实程度的增加,其对坡面径流量和产沙量影响更大。吴发启等<sup>[21]</sup>研究认为前期有土壤结皮的坡面初始产流时间、径流过程峰值均早于非结皮土壤,坡面径流量增加但是产沙量却是降低的。王辉等<sup>[22]</sup>认为若地表土壤严重结皮,则其具有降低径流和抑制产流产沙的作用。而卜崇峰等<sup>[23]</sup>指出黄土土壤结皮减少入渗,增加径流,对坡面抗蚀性作用微弱,但是结皮效应随降雨进行会逐渐消失。可见,土壤结皮作为一种特殊的土壤下垫面,对坡面产流产沙过程产生了深刻的影响,但是还存在较大的分歧和争议。综上所述,种植作物与土壤结皮均对坡耕地土壤侵蚀产生较大影响。种植作物是坡耕地上最重要的活动,它的存在对土壤结皮的形成和作用可能会产生一定的影响;因此,笔者以种植作物大豆的坡耕地土壤结皮为对象,研究作物生长覆盖条件下土壤结皮对坡耕地径流及侵蚀产沙的影响,以期对坡耕地水土流失防治和水土资源合理利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省杨凌农业高新产业示范区,地处黄土高原南缘地带,为三级阶地地形。该区为大陆性季风型半湿润气候,年降雨量 635~646 mm,年均蒸发量 993 mm,区内 60% 降雨集中于 7—10 月,且多大到暴雨。常年平均气温 12.9℃,月平均气温 7 月份为 26.1℃,1 月份为 -1.2℃。植被主要以温带湿润半湿润森林为主,但分布较少,为农田所取代。该区土壤主要以土垫旱耕人为土(塬土)为主,是当地长期农业耕作和施加土肥积累形成的一种土壤,广泛分布于黄土地区盛产棉麦的地带,其中尤以陕西关中为主,是关中地区的主要农业土壤<sup>[24-26]</sup>。

### 1.2 研究方法

本研究在西北农林科技大学水土保持工程实验室径流小区和径流冲刷槽上进行,采用人工模拟降雨方法分阶段进行观测。

1.2.1 室外径流小区观测实验 径流小区长 4 m 宽 1 m,依据该区地形起伏较缓陡坡较少,将坡度设计为 10°,下设 4 个径流小区。在其中 2 个径流小区上按行距 40 cm 株距 20 cm 种植大豆,并设相同条件裸坡对照 2 个。供试大豆品种为中黄 13,于 2010

年 6 月 30 日种植于径流小区,并在同一时间种植于实验大田,以供大豆叶面积指数观测之需。在每一观测阶段,采用土钻法( $\varphi = 5\text{ cm}$ )对径流小区表层土壤含水量进行测量,将每场降雨实验前的土壤含水率控制在 18% 左右。对其中一个作物小区和裸地小区地表进行细微锄耕破坏土壤结皮并耙平平整,另外一个小区和裸地小区在整个生长过程中始终保留土壤结皮不锄耕。降雨前测量保留土壤结皮小区土壤结皮的厚度,然后利用降雨机对径流小区进行模拟降雨。待小区产流开始时,利用塑料小桶收集径流泥沙样 1 min,后每隔 2 min 采集径流泥沙样本 1 min,直至产流结束。采集径流泥沙样带至室内测量其总体积(测量精度为 0.1 mL),然后澄清 24 h 后倒掉上清液将沉淀泥沙在 105℃ 下烘干后称量得泥沙质量(测量精度为 0.01 g)。根据当地夏秋 2 季多大到暴雨的特点,设计降雨强度为 80 mm/h,每场降雨历时为 60 min。大豆的种植与管理按当地农作习惯进行,并依据大豆生长、叶片数量及面积将大豆生育期划分为幼苗期、始花期、盛花期、结荚期和始粒期 5 个生长阶段分别进行人工降雨试验,每次观测前还需测量当前阶段大豆的叶面积指数。

降雨机采用侧喷式降雨机,由中国科学院水利部水土保持研究所研制,将降雨机置于径流小区两侧实行对喷。降雨装置包括降雨系统和供水系统 2 部分。降雨系统由 2 个单一降雨支架组成,降雨支架主要包括侧式喷头、喷头支架和压力控制部分。降雨喷头由喷头体、碎流挡板、出流孔板等部分组成。喷头安装在由三角架固定的降雨支架上,喷头高 6 m,喷头出水高度约 1.5 m,有效降雨面积 5 m × 7 m,降雨雨滴终点速度近似天然降雨速度,降雨均匀度高于 80%。供水压力由压力表控制,降雨强度主要通过孔板的孔径来调节,孔径 3~10 mm,可控制降雨强度范围为 30~140 mm/h。

1.2.2 室内冲刷槽观测实验 与室外径流小区相同时间,在 3 个径流冲刷槽上分别种植大豆,并在大豆生长旺盛期时于降雨前分别测定土壤结皮厚度,然后进行人工模拟降雨观测径流量和产沙量,方法与室外实验相同。

室内模拟降雨实验采用下喷式降雨机,由中国科学院水利部水土保持研究所生产,降雨高度为 4 m,有效降雨面积为 3 m × 3 m,降雨动能约为天然降雨的 75%,降雨均匀度高于 80%。通过不同的喷头-阀门开关组合来实现供水压力的调节,从而达到调节降雨强度的目的。经测试,调节至任一喷头和压强组合下的降雨都是稳定的,可以被实验采用。

1.2.3 土壤结皮观测 利用数码照相机对保留土壤结皮的小区坡面进行垂直拍照,并利用电脑计算土壤结皮覆盖度。在保留土壤结皮的小区分别在上、中、下坡位采集土壤结皮样本,带回室内利用刀片和软刷去掉结皮下方的土壤,再利用游标卡尺测量土壤结皮厚度(测量精度为0.01 mm),每个小区的土壤结皮样本测量15次并取其平均值。

1.2.4 叶面积指数测量 将大豆叶片扫描至电脑,利用Image J对叶面积进行测量(测量精度达到0.01 pixel)。在叶面积测定的基础上按单位土地面积上的总叶面积占土地面积的比计算叶面积指数<sup>[27]</sup>。

### 1.3 数据分析

本研究的数据计算和分析分别采用Excel和SPSS完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 前期土壤结皮的存在对坡面产流产沙的影响

种植大豆条件下,坡面前期土壤结皮的存在对坡面产流产沙的影响如表1所示,可知,前期土壤结皮的存在,使产流开始时间较早。随着大豆的生长,非结皮坡面的产流开始时间向后推迟的幅度较大。裸地前期有土壤结皮的坡面,径流量较非结皮坡面高5.27%,而产沙量则较其降低了27.66%,其径流含沙量也相应较非结皮降低了25.42%。这说明土

壤结皮的存在可以增加坡面径流,又因其结构致密而使坡面产沙量有所降低。与裸地相比,大豆的存在使前期保留土壤结皮与非结皮坡面之间的差异产生了较大变化。种植大豆条件下,前期土壤结皮坡面的径流量较非结皮坡面平均增加了24.81%,产沙量较非结皮坡面平均降低了14.26%。其中,前期土壤结皮坡面的径流量在幼苗期(叶面积指数 $I_{LA}=0.61$ )较非结皮坡面下增加了15.26%,至始粒期( $I_{LA}=6.59$ )时其增幅已上升至43.18%;而其产沙量较非结皮坡面的降幅由幼苗期的15.05%下降至始粒期的8.66%。

大豆的存在使坡面产流产沙量随其生长逐渐减小,坡面土壤结皮的存在使地表较为光滑,且土壤结皮结构致密紧实,因此土壤结皮的存在可加快径流的流速,降低降雨和径流的入渗,使前期土壤结皮坡面的径流量处于较高的水平;但正因为土壤结皮特殊的结构和较大的抗蚀强度,使其坡面具有较高的抗蚀性和抗冲性,从而使产沙量降低,加之作物对产流产沙的阻滞作用,使种植作物前期土壤结皮的坡面具有更低的土壤侵蚀量。与前期土壤结皮坡面相比,非结皮地面地表较为粗糙,对径流的阻碍较强,可有效提高降雨和径流的入渗速率,因此其坡面径流量低于保留土壤结皮的坡面。加之作物的影响,使非结皮的坡面径流量随作物生长逐步降低,且

表1 大豆不同生育期前期土壤结皮的存在对产流产沙的影响

Tab.1 Effects of presence of soil crust on runoff and sediment yield in different growth stages of soybean

生育期 Growth stage	叶面积指数 Leaf area index	前期有无土壤结皮 Existence of soil crust before rain	产流时刻 Time producing runoff	产流量 Runoff amount/ ( $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	径流系数 Runoff coefficient	产沙量 Sediment yield/ ( $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	含沙量 Sediment concentration/ ( $g \cdot L^{-1}$ )
幼苗期 Seedling stage	0.61	有 Existence	1'21"	51.81	0.65	314.17	5.54
		无 Inexistence	2'02"	44.95	0.56	361.45	7.63
始花期 Initial blossoming stage	1.99	有 Existence	2'02"	40.53	0.51	243.09	5.32
		无 Inexistence	2'49"	37.62	0.47	292.60	7.50
盛花期 Full flowering stage	3.82	有 Existence	0'43"	33.29	0.42	149.21	4.27
		无 Inexistence	10'54"	26.58	0.33	172.74	5.75
结荚期 Pod bearing stage	4.83	有 Existence	1'25"	30.89	0.39	113.01	3.56
		无 Inexistence	3'00"	23.29	0.29	125.98	5.34
始粒期 Initial pod filling stage	6.59	有 Existence	1'25"	28.14	0.35	97.34	3.17
		无 Inexistence	3'54"	19.65	0.25	105.78	5.20
裸地 Bare soil	平均 Average	有 Existence	1'03"	52.42	0.66	399.90	7.63
		无 Inexistence	3'34"	49.91	0.62	510.50	10.23

注:以室外10°径流小区为例,降雨强度为80 mm/h。Note: Taking outdoor runoff plot of 10 degrees as an example. The rainfall intensity was 80 mm/h.

下降幅度较前期土壤结皮坡面大,因此使2种处理坡面间径流量的差距逐渐扩大。与此同时,由于非结皮坡面地表粗糙,地表土粒较为分散,更易被径流冲刷,产生较强的土壤侵蚀量。在大豆幼苗期( $I_{LA}=0.61$ )时,由于作物对地表的保护作用最弱,使非结皮坡面的土壤流失量远高于前期保留土壤结皮的坡面。而随着作物生长,作物对径流的阻滞作用加强,使坡面径流量逐渐降低,加之大豆冠层对地表的覆盖,使地表粗糙的表面可以维持较长的时间;因此径流对地表的作用力大大减弱,使坡面的产沙量大幅度降低,从而使其与前期保留土壤结皮坡面

的差距逐渐缩小。由此可见,对于前期保留土壤结皮的坡面和非结皮坡面,大豆的存在具有拉大两者间径流量差距和降低产沙量差距的倾向。

土壤结皮的存在,对坡面产流产沙的过程也产生了较大的影响。为便于分析,将降雨过程中任一时刻下单位面积单位时间内产生的径流量定义为径流强度 $I$ ( $\text{mL}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ );将单位面积单位时间产生的泥沙量定义为泥沙强度 $S$ ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ )。种植大豆条件下,前期保留土壤结皮的坡面和非结皮坡面的产流产沙过程存在显著差异(图1)。

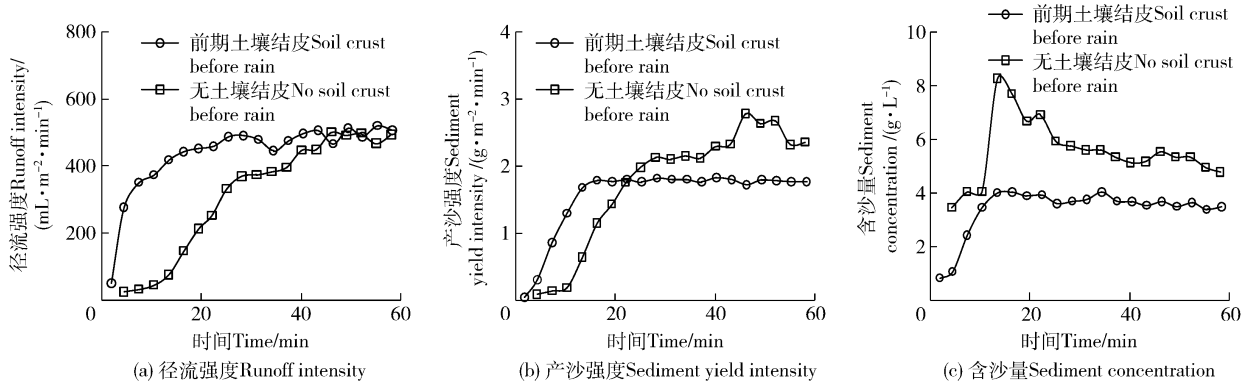


图1 土壤结皮对大豆坡面产流产沙过程的影响(以鼓粒期为例  $I_{LA}=6.59$ )

Fig. 1 Effects of soil crust on process of runoff and sediment on soybean slope land taking seed filling stage as an example when the leaf area index was 6.59

前期保留土壤结皮坡面的产流产沙自产流开始会在较短的时间内迅速上升并接近稳定产流产沙状态,直至降雨结束。而非结皮坡面,由于地表粗糙对径流和泥沙形成阻碍,因此在产流开始后较长一段时间内均处于缓慢上升阶段并伴有较大波动。与此同时,由于降雨和径流的共同作用,使地表松散的土体逐渐密闭并形成土壤结皮,这一方面使坡面的产流产沙发生较大的波动,一方面使粗糙的地表开始趋于平整光滑,在加剧径流下移的同时又逐渐使坡面产流产沙量趋于稳定。待坡面上形成一定面积的土壤结皮后,坡面的产流产沙量便达到稳定产流产沙水平。由此也可表明,种植大豆条件下,前期保留土壤结皮的坡面因受降雨和径流的影响较小,使坡面径流和产沙过程较为稳定;而非结皮坡面受降雨和径流影响较大,使地表在降雨过程中产生一系列变化,导致坡面径流和产沙过程波动较大。作物在其变化过程中主要有2方面作用:一方面作物的存在增加了坡面入渗,减少了坡面的径流量和产沙量;另一方面作物冠层对地表的覆盖不仅保护前期保留土壤结皮坡面上的土壤结皮免受降雨和径流破坏而损失,还使非结皮坡面的粗糙程度得以较长时间维

持,减缓了地表土体的密闭过程,有利于径流入渗,从而降低径流的挟沙能力。

## 2.2 前期土壤结皮厚度对坡面产流产沙的影响

大豆生长旺盛期时,地表不同土壤结皮厚度对坡面产流产沙量的影响详见表2,可以看出,种植大豆条件下,坡面前期土壤结皮厚度的变化并未使坡面产流产沙量显著变化。不同土壤结皮厚度的坡面径流量和产沙量虽有差异,但是随机性较大,并没有因土壤结皮厚度的增减而规律变化。与此同时,土壤结皮的覆盖度与坡面产流产沙量之间亦不存在明确的关系。这说明土壤结皮厚度的变化并不是影响坡面产流产沙发生变化的主要因子。作物的存在以及不同坡面状况的差异是造成两者间产流产沙有所差别的主要原因。

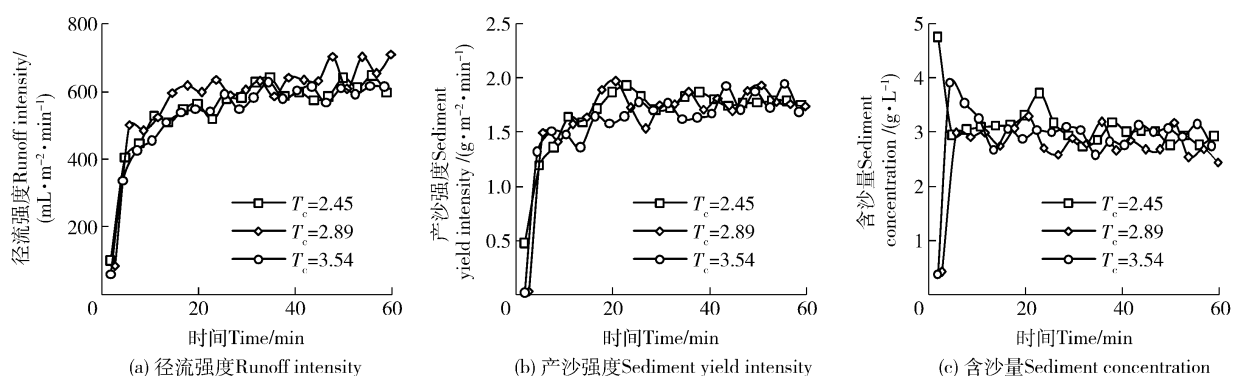
种植大豆条件下,不同前期土壤结皮厚度坡面的产流产沙过程变化如图2所示,可以看出,不同土壤结皮厚度的坡面产流产沙随降雨时间的变化过程本质上并无差别,均在产流开始后较短时间内便接近稳定产流产沙状态,且过程曲线均较为平稳,波动较小。由此也可说明,土壤结皮厚度的变化,对坡面产流产沙过程的影响不显著,其变化不是坡面产流

表 2 不同土壤结皮厚度下坡面的产流产沙

Tab. 2 Runoff and sediment yield in different soil crust thickness on slope land

叶面积指数 Leaf area index	前期土壤结皮厚度 Soil crust thickness before rain/mm	前期土壤结皮覆盖度 Soil crust coverage before rain/%	径流量 Runoff amount/ (L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	径流系数 Runoff coefficient	产沙量 Sediment yield/ (g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	含沙量 Sediment concentration/ (g·L <sup>-1</sup> )
6.50	2.45	85.43	33.61	0.42	100.26	2.98
	2.89	80.54	32.04	0.40	101.89	3.18
	3.54	86.25	33.54	0.42	98.85	2.95

注: 以室内 10°冲刷槽为例, 降雨强度为 80 mm/h, 降雨历时 60 min。Note: Taking indoor runoff plot of 10 degrees as an example. The rainfall intensity was 80 mm/h and the duration of rainfall was 60 min.



$T_c$  为前期土壤结皮厚度, mm。  $T_c$  in figures was soil crust thickness before rain, mm.

图 2 前期土壤结皮厚度对大豆坡面产流产沙过程的影响

Fig. 2 Effects of soil crust thickness on process of runoff and sediment on soybean slope land

产沙过程变化的主要因子。

由以上分析可知,土壤结皮厚度和覆盖度对坡面产流产沙的影响较小,坡面产流产沙量的改变受大豆作物自身影响较大。将不同生长阶段室外径流小区的前期土壤结皮坡面相关土壤结皮指标和产流产沙量进行方差分析(表 3),结果表明叶面积指数与坡面径流量、产沙量和含沙量之间均存在极显著差异( $P < 0.01$ ),前期土壤结皮厚度和覆盖度与坡面径流量、产沙量和含沙量之间均不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。由此可知,种植大豆条件下,作物植株的生长发育对坡面产流产沙量有重要的影响,前期土壤结皮厚度和覆盖度对其影响不显著。而在相同条件下,作物的叶面积指数仍然是影响坡面产流产沙量发生显著变化的主要原因。

通过对室外径流小区保留土壤结皮坡面产流产沙量的回归分析,可获得以下回归方程,如表 4 所示。可以看出,种植大豆的坡面产流产沙量以及径流含沙量与大豆冠下前期土壤结皮厚度、覆盖度和叶面积指数呈线性关系,且相关性较高,回归结果达到了显著水平。结合方差分析结果可知,土壤结皮厚度和覆盖度 2 个因子的系数的正负性质不统一,这说明土壤结皮厚度和覆盖度对坡面产流产沙量的影响作用不明确,其回归方程的高相关性主要源自

于作物叶面积指数。这同时也证实了作物的生长是影响坡面产流产沙量的主导因素之一。

### 3 结论与讨论

在土壤和降雨等因素的共同作用下,使坡耕地地表普遍存在土壤结皮,对坡耕地土壤侵蚀、水分利用和作物生长均造成较大影响。通过对种植大豆条件下前期土壤结皮对坡耕地产流产沙的作用分析,结果表明:前期土壤结皮的存在对坡面的产流产沙量产生较大影响,使坡面径流量高于非结皮坡面,而坡面的土壤流失量又远低于非结皮坡面。种植大豆条件下,前期土壤结皮的存在使径流量较非结皮坡面平均增加了 24.81%,产沙量较非结皮坡面平均降低了 14.26%。大豆作物的存在加大了土壤结皮与非结皮坡面之间径流量的差距,但同时又缩小了二者间产沙量的差异,且随着作物的生长使其对土壤结皮与非结皮坡面产流产沙的影响逐渐加强。种植大豆条件下,坡面前期土壤结皮厚度及其覆盖度的变化对坡面产流产沙的影响不显著,并不是影响坡面产流产沙的主要因素。

同其他学者的研究结果<sup>[13-19]</sup>类似,无论作物覆盖与否,前期土壤结皮可延长坡面产流开始时间,并增加了坡面的径流量;但本研究作用壤土条件

表 3 大豆生育期内结皮对坡面产流产沙影响的方差分析

Tab. 3 Analysis of variance for effect of soil crust on runoff and sediment yield in the entire growth stages of soybean

独立变量 Independent variable	变差来源 Sources of variation	离差平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Mean squared error	<i>F</i>	显著性概率 Significance probability
径流量 Runoff amount	叶面积指数 Leaf area index	211.86	1	211.86	31.31	0.01
	前期土壤结皮厚度 Soil crust thickness before rain	16.09	1	16.09	2.38	0.20
	前期土壤结皮覆盖度 Soil crust coverage before rain	16.36	1	16.36	2.42	0.20
	误差 Error	27.06	4	6.77		
	总和 Total	10462.36	8			
产沙量 Sediment yield	叶面积指数 Leaf area index	23047.85	1	23047.85	32.11	0.01
	前期土壤结皮厚度 Soil crust thickness before rain	591.15	1	591.15	0.82	0.42
	前期土壤结皮覆盖度 Soil crust coverage before rain	630.27	1	630.27	0.88	0.40
	误差 Error	2871.05	4	717.76		
	总和 Total	232510.46	8			
含沙量 Sediment concentration	叶面积指数 Leaf area index	2.69	1	2.69	22.54	0.01
	前期土壤结皮厚度 Soil crust thickness before rain	0.09	1	0.09	0.71	0.45
	前期土壤结皮覆盖度 Soil crust coverage before rain	0.00	1	0.00	0.03	0.88
	误差 Error	0.48	4	0.12		
	总和 Total	127.65	8			

表 4 不同作物全生育期内土壤结皮与产流产沙各项回归关系

Tab. 4 Regression between runoff and sediment yield and soil crust in the entire growth stages

项目 Item	回归关系 Regression relationship	$R^2$	$F$
径流量 Runoff amount	$M_w = -3.817L_{AI} - 0.297T_c - 0.446C_c + 94.885$	0.913	10.505*
产沙量 Sediment yield	$M_s = -44.077L_{AI} - 32.591T_c - 5.189C_c + 721.272$	0.961	24.767*
含沙量 Sediment concentration	$C = -0.522L_{AI} + 0.484T_c - 0.045C_c + 8.771$	0.990	95.677**

注: 以室外 10° 径流小区为例;  $M_w$  为径流量, mm/h;  $M_s$  为产沙量, g/(m<sup>2</sup>·h);  $C$  为含沙量, g/L;  $L_{AI}$  为叶面积指数;  $C_c$  为前期土壤结皮覆盖度, %; \* 为 0.05 显著水平; \*\* 为 0.01 显著水平。Note: Taking outdoor runoff plot of 10 degrees as an example.  $M_w$  was runoff amount, mm/h;  $M_s$  was sediment yield, g/(m<sup>2</sup>·h);  $C$  was sediment concentration, g/L;  $L_{AI}$  was leaf area index;  $C_c$  was soil crust coverage before rain, %; \* was significant at 0.05 level; and \*\* was significant at 0.01 level.

下, 前期土壤结皮对坡面产沙量具有减少的作用。这与吴发启等<sup>[21]</sup>在黄壤土条件下所得结论较为一致, 而与蔡强国等<sup>[28]</sup>和卜崇峰等<sup>[19]</sup>在黄土条件下的实验结果相反。这一方面可能是由于土壤质地的不同导致土壤结皮的理化性质产生较大差异所致; 另一方面也可能是由于坡面在降雨过程中是否产生

了细沟侵蚀所致。土壤结皮增加径流量, 增强了径流侵蚀力, 利于细沟的产生, 而一旦坡面形成细沟, 会导致坡面侵蚀量剧烈增加<sup>[29]</sup>。本研究在作物覆盖的 10° 坡度条件下进行, 实际观测中发现由于作物覆盖, 使降雨过程中很少形成细沟。坡面上大豆作物的覆盖一方面减缓了降雨的侵蚀力, 有利于入

渗,减少坡面径流;另一方面也可减缓坡面径流对前期土壤结皮的冲刷破坏,维持其较高的抗蚀强度:因此,大豆作物覆盖不仅起到了减少坡面土壤侵蚀量的作用,而且对土壤结皮的形成和发育存在较大的影响。土壤结皮的存在可以增加地表的径流量,这无疑会减少作物对水分的有效利用,对作物的生长和产量都具有较大的负面影响。由于研究对象、观测条件不尽相同,对土壤结皮是否增加坡面土壤侵蚀目前还没有定论。土壤结皮对土壤侵蚀的影响因土壤、地形、降雨、植被等因素的影响而产生较大的差异,使问题更加复杂多变。对土壤结皮影响土壤侵蚀机理的研究有助于阐明土壤结皮的作用过程,也为在实际生产中趋利避害为农业生产服务。

#### 4 参考文献

- [1] 唐克丽. 中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 2-7
- [2] 唐克丽. 退耕还林还牧与保障食物安全的协调发展问题[J]. 中国水土保持, 2000(8): 35-37
- [3] 李森, 宋孝玉, 沈冰, 等. 黄土沟壑区不同植被对产流产沙的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 117-120
- [4] 宋孝玉, 李永杰, 陈洪松, 等. 黄土沟壑区不同下垫面条件农田降雨入渗及产流规律野外试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(4): 68-75
- [5] 孙飞达, 蒋志荣, 王立. 不同降雨强度下农地的产流产沙研究[J]. 甘肃科学学报, 2005, 17(1): 53-56
- [6] Singh R K, Panda R K, Satapathy K K, et al. Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4): 261-276
- [7] 王健, 尹武君, 刘旦旦. 玉米苜蓿间作对黄土坡耕地降雨产流产沙的影响[J]. 节水灌溉, 2011(8): 43-46
- [8] McIntyre D S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact [J]. Soil Science, 1958, 85(4): 185-189
- [9] McIntyre D S. Soil splash and the formation of water drops and raindrops [J]. Trans Am Geophys, 1958, 22: 709-721
- [10] Onofriok O, Singer M J. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall [J]. Soil Sci Soc Am J, 1984, 48: 1137-1143
- [11] Bradford J M, Ferris J E, Remley P A. Interill soil erosion processes: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment [J]. Soil Science, 1987, 51: 1566-1577
- [12] Singer M J. Physical properties of arid region soils//Skujins J. Semi-arid land sand deserts: soils resource and reclamation [M]. New York: Marcel Dekker, 1991: 81-109
- [13] Moore D C, Singer M J. Crust formation effect on soil erosion processes [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54: 1117-1123
- [14] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 203-209
- [15] 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[J]. 应用基础与工程科学学报, 1996, 4(4): 363-370
- [16] 吴发启, 范文波. 坡耕地土壤结皮形成的影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 33-36
- [17] 吴发启, 范文波, 郑子成, 等. 坡耕地暴雨结皮对作物生长发育影响的实验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 100-105
- [18] 胡霞, 严平, 李顺江, 等. 人工降雨条件下土壤结皮的形成以及与土壤溅蚀的关系[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 13-16
- [19] 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[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 385-391
- [20] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [21] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 97-101
- [22] 王辉, 王全九, 邵明安, 等. 表土结皮影响坡地产流产沙及养分流失的试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 35-38
- [23] 卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 16-23
- [24] 潘继花, 张甘霖. 土垫旱耕人为土中磷的分布特征及其土壤发生学意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 43-49
- [25] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论 方法 实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [26] 朱显谟. 壤土[M]. 北京: 农业出版社, 1964
- [27] 程武学, 潘开志, 杨存建. 叶面积指数(LAI)测定方法研究进展[J]. 四川林业科技, 2010, 31(1): 51-54
- [28] 蔡强国, 陈浩, 陆兆雄. 表土结皮在溅蚀和坡面侵蚀过程中的作用//陈永宗. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究[C]. 1985: 57-64
- [29] 程琴娟, 蔡强国, 李家永. 表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4): 114-121

(责任编辑: 程 云)