

# 大豆调节坡耕地径流和泥沙作用研究

徐宁<sup>1</sup>, 吴发启<sup>2</sup>, 杨一凡<sup>1</sup>, 林青涛<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**黄土高原地区坡耕地面积占该区总耕地面积的 75%, 产生严重的水土流失, 治理坡耕地水土流失对该地农业生产和生态环境建设具有重大意义。大豆是黄土高原坡耕地的重要作物, 然而, 目前对于大豆在该地区调节径流和泥沙的能力还缺乏深入了解。以种植大豆的坡耕地为研究对象, 研究在不同坡度和不同降雨强度下大豆调节径流和泥沙能力。试验设计包括大豆的 5 个生育期(幼苗期、始花期、盛花期、结荚期和始粒期), 5 个坡度(3°, 5°, 10°, 15°, 20°)和 2 个降雨强度(40, 80 mm/h)。将大豆调节径流和泥沙的作用分为 2 部分: 减少产流和减少产沙。采用产流时间、降雨初损量、径流量、产沙量、减流效益(RRB)和减沙效益(SRB)6 个指标进行综合对比分析。结果表明: 大豆在调节径流和泥沙方面作用显著。与裸地相比, 大豆从幼苗期到始粒期, 坡面径流量减少 10.75%~64.94%, 产沙量减少 15.38%~84.24%。大豆的 RRB 和 SRB 值从整个生育期来看整体均呈增大趋势, 且均与坡度成反比。同样, 随着降雨强度增加, 大豆的 RRB 和 SRB 略有降低且差异不显著, 并且 SRB 值始终大于 RRB 值, 因此发现大豆在减少泥沙方面比减少径流更有效。综上, 黄土高原坡耕地上种植大豆对坡耕地土壤侵蚀具有积极的作用, 并且对泥沙的拦截作用强于对径流的拦蓄作用。

**关键词:** 大豆; 土壤侵蚀; 坡度; 降雨强度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0042-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.007

## Regulation Effect of Soybean on Runoff and Sediment on Sloping Farmland

XU Ning<sup>1</sup>, WU Faqi<sup>2</sup>, YANG Yifan<sup>1</sup>, LIN Qingtao<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** The sloping farmland in the Loess Plateau accounts for 75% of the total cultivated land area in the region, resulting in serious soil erosion. It is of great significance for agricultural production and ecological environment construction to control the soil erosion of sloping farmland. Soybean is an important crop on sloping farmland in the Loess Plateau. However, at present, the ability of soybean to regulate runoff and sediment in this area needs further study. Taking the sloping farmland with soybean as the research object, and the ability of soybean to regulate runoff and sediment under different slopes and rainfall intensities were studied. The experimental design included five growth stages of soybean (seedling stage, initial flowering stage, full flowering stage, pod-forming stage and granulation stage), five slope gradients (3°, 5°, 10°, 15° and 20°), and two rainfall intensities (40 and 80 mm/h). The effect of soybean on regulating runoff and sediment was divided into two parts, which were reducing runoff and reducing sediment yield. Comprehensive comparative analysis was carried out using six indicators, which were runoff time, initial rainfall loss, runoff, sediment yield, reduced flow benefit (RRB) and sediment reduction benefit (SRB). The results showed that soybean played an important role in regulating runoff and sediment. Compared with bare land, the runoff of the slope decreased by 10.75%~64.94% and the sediment yield decreased by 15.38%~84.24% from the seedling stage to the granulation stage. The RRB and SRB of soybean showed an overall increasing trend from the whole growth period, and they were inversely proportional to the slope. Similarly, with the increasing of rainfall intensity, the RRB and SRB of soybean decreased slightly and the difference was not

收稿日期: 2019-10-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41977065)

第一作者: 徐宁(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 471835123@qq.com

通信作者: 吴发启(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: wufaqi@263.net

significant, and the SRB value was always greater than RRB value, so it was found that soybean was more effective in reducing sediment than in reducing runoff. In summary, planting soybean on sloping farmland in the Loess Plateau had a positive effect on control soil erosion of sloping farmland, and the interception effect on sediment was stronger than the interception of runoff.

**Keywords:** soybean; soil erosion; slope; rainfall intensity

水土流失是制约我国生态环境和社会可持续发展的主要因素之一,在黄土高原地区,水土流失主要发生在坡耕地上<sup>[1]</sup>,因此,治理坡耕地水土流失具有重大意义。与林地或草原不同,农田因单一的物种组成、简单的植被结构及人类管理实践的频繁干扰而更容易受到土壤侵蚀的影响<sup>[2]</sup>。然而,作物调节农田径流和泥沙的贡献作用不可忽视<sup>[3]</sup>。首先,作物覆盖均匀,能削减雨滴能量,截留一定量的降水;其次,作物种植密度很大,其茎秆能够阻滞径流,影响和改变径流状态,减缓流速,从而增加了土壤入渗,减少了冲刷;再次,作物生育过程中的人为管理虽扰动地表土壤,但同时会形成大小不等、高低不一的微地形,影响地表的粗糙度,从而影响土壤侵蚀。与裸地相比,种植作物可以使农田的水土流失维持在一个较低水平<sup>[4]</sup>。农作物和农作物残余物可以有效地保护土壤表面并减少水土流失,然而,在中国的黄土高原地区,对水土流失的研究主要集中在林地和草地上<sup>[5-6]</sup>,针对作物对坡耕地产流产沙影响作用的研究相对较少<sup>[7]</sup>。因此,作物对坡耕地径流和泥沙调节作用还需进一步研究,以阐明作物对坡耕地产流产沙抑制的机理及程度。作物的防蚀能力与作物本身的种类有关。朱司航等<sup>[8]</sup>研究石灰岩坡地不同的作物种类对土壤侵蚀的影响发现,红薯地保土蓄水能力优于花生地;罗兴录等<sup>[9]</sup>研究了广西地区玉米、甘蔗、木薯地的水土流失,发现水土流失量大小关系为:玉米>木薯>甘蔗;马波等<sup>[10]</sup>研究表明,与裸地相比,大豆整个生育期的减蚀量可减小61%,减蚀会使得土壤结构遭到破坏,土壤孔隙遭到堵塞,降低了土壤的入渗,从而促进了地表径流的产生;王健等<sup>[11]</sup>研究认为,玉米坡面年径流量平均较裸地降低了19%,年产沙量较裸地降低了30%;宋孝玉等<sup>[12]</sup>研究发现,玉米和麦茬比裸地更易拦截降雨,从而减少了产流量,但玉米坡面的产流产沙量均小于小麦残茬地。

除作物种类外,坡度和降雨强度<sup>[13]</sup>也是影响土壤侵蚀过程的2个关键因素。但是,降雨强度和坡度如何共同影响农作物调节径流和泥沙的效果尚不清楚。在影响土壤侵蚀的诸多因素中,降雨强度是影响土壤侵蚀产流产沙最直接也是最主要的动力因素<sup>[14]</sup>,坡度由于制约坡面降雨径流的冲刷以及坡面土壤颗粒的稳定性从而对侵蚀产流产沙产生影响<sup>[15]</sup>。朱燕琴等<sup>[16]</sup>将降雨分为

3种雨型,研究了不同雨型下5种植被类型产流产沙的特征;耿晓东等<sup>[13]</sup>通过研究坡度和降雨强度对紫色土坡面产流产沙的影响,得出坡度和降雨强度对坡面产流产沙以及侵蚀形态的演变而言具有显著的影响作用。因此,研究坡度及降雨强度对作物调节径流及泥沙作用的影响具有重要意义。坡耕地是黄土高原土壤流失的主要来源,作为黄土高原上的主要农作物,大豆和其他当地农作物(例如玉米、小麦)在保持水土方面发挥着重要作用<sup>[17]</sup>。本试验以种植大豆的坡耕地为研究对象,通过降雨模拟试验评估不同生育期大豆对调节不同坡度和降雨强度下的径流和泥沙的影响,增强对农作物在水土保持方面作用的了解,提高对作物减少坡耕地土壤侵蚀的认识,有助于进一步明晰作物防蚀机理,为黄土高原农耕地土壤侵蚀防治提供理论依据和科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于中国陕西省黄土高原南部(34°14'—34°20' N, 107°59'—108°08' E),海拔高度为468 m。该区属于半湿润大陆性季风气候,年平均降水量635~646 mm,年平均蒸发量为993 mm,大约60%~70%的降水发生在7—9月,常年平均温度为12.8℃。黄土高原典型的黄土地貌分为谷间地地貌和沟谷地貌,坡度大多处于13.98°~28.01°。该区植被主要以温带湿润半湿润森林为主,但其分布较少,为农田所取代<sup>[18]</sup>。该区土壤主要类型为壤土,有机质含量较高,是陕西关中地区的主要农业土壤,为当地森林褐土经长期施加土肥以及农业耕作所逐渐形成的特殊耕作土壤。

### 1.2 研究方法

试验于2018年7—8月在西北农林科技大学水土保持与荒漠化防治教学试验基地的径流小区上进行。试验采用中国科学院水土保持研究所制造的侧喷降雨模拟器。降雨装置包括喷头支架、侧式喷头以及压力控制部分。降雨侧式喷头高6 m,安装于由三脚架固定的降雨支架上,降雨高度7.5 m,有效降雨面积为35 m<sup>2</sup>,降雨均匀度达到80%以上,并且试验之前要进行率定。可通过调节供水压力,进而达到控制降雨强度的目的。

径流小区长4 m,宽1 m,供试大豆品种为“中黄13”,株行距为20 cm×40 cm。设置5个坡度(3°,5°,8°,10°,15°),研究了不同雨型下5种植被类型产流产沙的特征;耿晓东等<sup>[13]</sup>通过研究坡度和降雨强度对紫色土坡面产流产沙的影响,得出坡度和降雨强度对坡面产流产沙以及侵蚀形态的演变而言具有显著的影响作用。因此,研究坡度及降雨强度对作物调节径流及泥沙作用的影响具有重要意义。坡耕地是黄土高原土壤流失的主要来源,作为黄土高原上的主要农作物,大豆和其他当地农作物(例如玉米、小麦)在保持水土方面发挥着重要作用<sup>[17]</sup>。本试验以种植大豆的坡耕地为研究对象,通过降雨模拟试验评估不同生育期大豆对调节不同坡度和降雨强度下的径流和泥沙的影响,增强对农作物在水土保持方面作用的了解,提高对作物减少坡耕地土壤侵蚀的认识,有助于进一步明晰作物防蚀机理,为黄土高原农耕地土壤侵蚀防治提供理论依据和科学参考。

10°, 15°, 20°) 和 2 个降雨强度 (40, 80 mm/h), 布设裸地处理为对照。大豆播种时间及后续田间管理均参考黄土高原大田实际情况进行, 并且依据大豆生长、叶片的面积及数量将大豆的生育期划分为 5 个生育期 (幼苗期、始花期、盛花期、结荚期及始粒期), 在每个生育期均进行降雨试验。降雨试验开始后, 观察径流小区出口处的水流, 待其呈连续流出状态时即为产流开始。从小区产流开始, 在径流小区出口处用塑料小桶每 3 min 收集径流和泥沙样品 1 min, 降雨历时 1 h。将收集的径流样本静置 24 h 后倒掉上清液, 将沉淀的泥沙样品在 105 °C 下烘干称得的重量即为产沙量。40, 80 mm/h 雨强下均重复同样的操作, 且 2 个雨强试验间隔 5~7 天, 期间对小区进行遮盖保证其不受天然降雨的影响, 试验重复 2 次。

### 1.3 指标测定

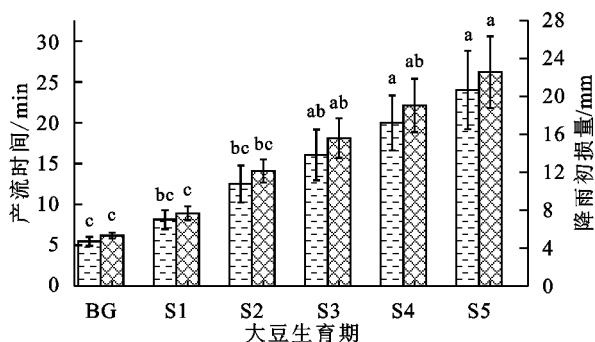
为了研究在不同坡度和不同降雨强度下大豆调节径流和泥沙能力, 将大豆调节径流和泥沙的作用分为 2 部分: 减少产流和减少产沙。采用产流时间 ( $TR$ , min)、降雨初损量 (ILR, mm)、径流量 ( $RV$ , L/m<sup>2</sup>)、产沙量 ( $SY$ , g/m<sup>2</sup>)、减流效益 (RRB, %) 和减沙效益 (SRB, %) 这 6 个指标进行综合对比分析。 $TR$  表示从开始室外人工模拟降雨到坡面产生径流所需的时间, ILR 表示开始产生径流前降到地表的降雨量, RRB 和 SRB 分别表示与裸地相比作物地减少的径流和泥沙量百分比, 是作物削减径流和拦蓄泥沙能力的度量, 也可以体现作物植被对保护土壤及减少径流的重要性。

其中 ILR、RRB 和 SRB 计算公式为:

$$ILR = \frac{TR \times I}{60} \quad (1)$$

$$RRB = \frac{RV_b - RV_v}{RV_b} \times 100\% \quad (2)$$

$$SRB = \frac{SY_b - SY_v}{SY_b} \times 100\% \quad (3)$$



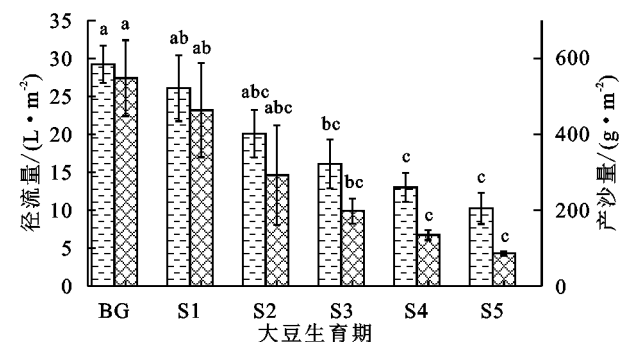
式中:  $I$  为降雨强度 (mm/h);  $TR$  为开始产生径流的时间 (min);  $RV_b$  和  $RV_v$  分别为裸地和作物地的径流量 (L/m<sup>2</sup>);  $SY_b$  和  $SY_v$  分别为裸地和作物地的产沙量 (g/m<sup>2</sup>)。

利用 SPSS 21.0 软件进行数据分析, 利用 Excel 2007 及 Origin 9.1 软件进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育期大豆的产流时间、降雨初损量、径流量和产沙量变化

裸地和不同生育期大豆平均产流时间、降雨初损量、径流量和产沙量呈现一定规律 (图 1)。大豆地的  $TR$  和 ILR 普遍比裸地 (BG) 更长或更高。大豆始粒期的  $TR$  和 ILR 显著高于裸地, 并且也显著高于幼苗期和始花期, 但是与结荚期和盛花期相比差异不显著。随着大豆的生长, 从幼苗期到始粒期大豆地的  $TR$  和 ILR 从 BG ((5.49 ± 0.56), (5.34 ± 0.32) mm) 的 1.5 倍 ((8.15 ± 1.16), (7.83 ± 0.720) mm) 迅速增加到 4.2 倍 ((23.02 ± 4.80), (22.57 ± 3.76) mm)。这主要与种植大豆对降雨的截留以及径流的拦蓄作用有关, 大豆冠层将部分降雨截留并储存, 减少了坡面的受雨量, 并且能够降低径流流速, 使得径流在坡面流动时间变长, 增加下渗, 从而使得产流时间变长, 降雨初损量变大。随大豆生长, 作物冠层逐渐茂盛厚实, 对地表的保护作用增强, 并且大豆冠层低矮, 可降低降雨动能, 削弱其对径流的扰动力, 降低了径流的挟沙能力。大豆地的  $RV$  和  $SY$  不断降低, 并且从盛花期开始到始粒期两者均显著低于裸地的对应值, 裸地的  $RV$  和  $SY$  为始粒期大豆的 2.85, 6.35 倍, 幼苗期和始花期大豆的  $RV$  和  $SY$  与裸地相比虽有减少, 但差异不显著。从大豆整个生育期来看, 坡面平均径流量和产沙量较裸地减少 41.49% 和 57.12%, 由此可见, 大豆具有较好的保土减沙作用, 并且种植大豆对泥沙的拦截作用大于对径流的拦蓄作用。



注: BG 为裸地 S1、S2、S3、S4、S5 分别为大豆的 5 个生育期 (幼苗期、始花期、盛花期、结荚期和始粒期)。图中各指标数值均为某生育期不同雨强和坡度下的平均值, 相同类别中具有相同小写字母的均值无显著差异 ( $P > 0.05$ , Duncan 多范围检验)。

图 1 裸地和不同生育期大豆平均产流时间、降雨初损量、径流量和产沙量对比

2.2 不同坡度和降雨强度大豆的产流时间、降雨初损量、径流量和产沙量变化

不同降雨强度大豆 *TR* 和 *ILR* 均随着植被覆盖度的增加而增加,但随着坡度的增大而减小。

从表 1 可以看出,降雨强度从 40 mm/h 增至 80 mm/h, *TR* 变小,但 *ILR* 变大。*RV* 和 *SY* 随着植被覆盖度的增加而减少,但随着坡度和降雨强度的增加而增加。

表 1 大豆不同生育期,坡度和降雨强度的产流时间(*TR*)、降雨初损量(*ILR*)、径流量(*RV*)和产沙量(*SY*)

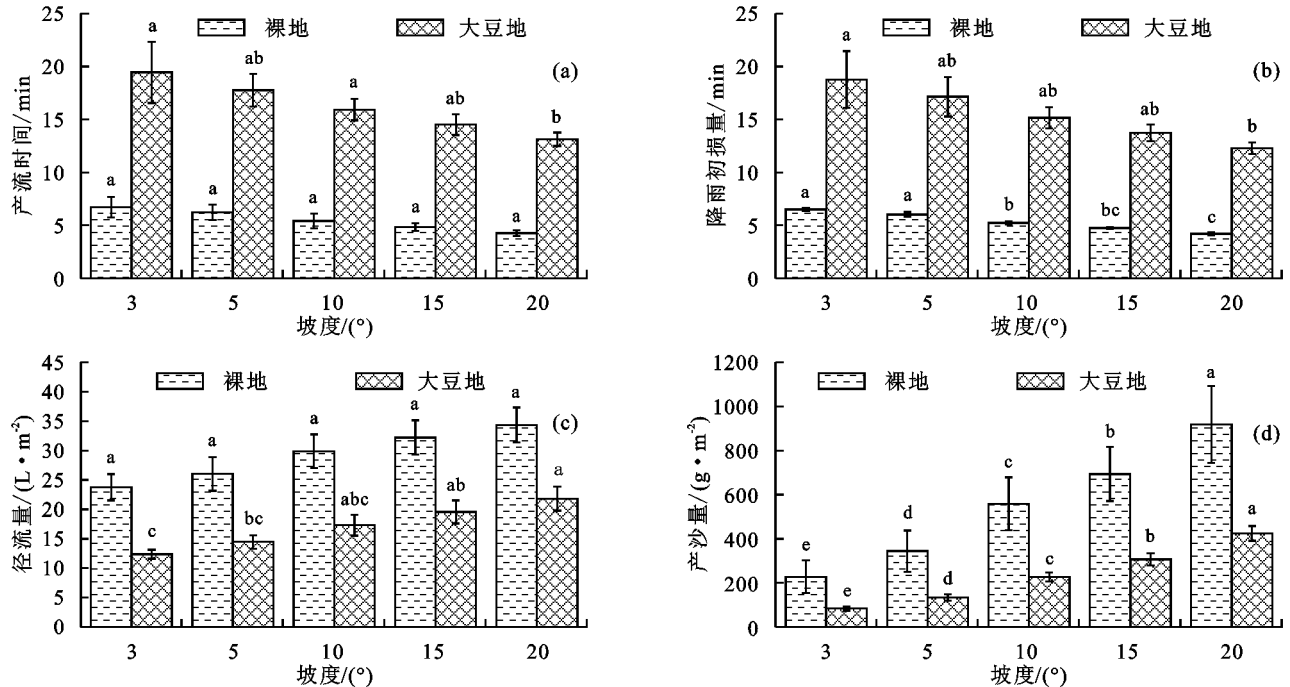
生育期	植被覆盖度/%	坡度/°	40 mm/h				80 mm/h			
			<i>TR</i> /min	<i>ILR</i> /mm	<i>RV</i> /(L·m <sup>-2</sup> )	<i>SY</i> /(g·m <sup>-2</sup> )	<i>TR</i> /min	<i>ILR</i> /mm	<i>RV</i> /(L·m <sup>-2</sup> )	<i>SY</i> /(g·m <sup>-2</sup> )
裸地	0	3	7.35	4.90	15.66	118.36	6.08	8.11	31.82	336.60
		5	6.82	4.54	16.89	186.52	5.62	7.49	35.17	501.57
		10	5.97	3.98	19.69	319.18	4.87	6.49	40.06	798.48
		15	5.12	3.41	20.27	381.76	4.55	6.07	44.15	1005.42
		20	4.43	2.95	21.99	587.84	4.08	5.44	46.68	1247.80
幼苗期	20.3	3	11.80	7.87	13.04	91.09	8.57	11.42	28.20	282.17
		5	10.53	7.02	14.16	145.70	7.58	10.11	31.76	414.68
		10	9.47	6.31	16.66	252.23	6.72	8.96	36.33	689.72
		15	8.40	5.60	17.52	309.00	5.93	7.91	40.69	874.77
		20	7.43	4.96	19.31	488.54	5.10	6.80	43.27	1092.44
始花期	45.4	3	15.95	10.64	9.72	54.11	14.00	18.67	20.68	167.49
		5	14.40	9.60	10.80	89.60	12.67	16.89	23.71	255.46
		10	13.30	8.87	12.80	155.87	11.42	15.22	28.13	413.97
		15	12.68	8.46	13.46	203.55	10.18	13.58	31.63	551.91
		20	11.60	7.73	15.11	316.06	8.92	11.89	34.87	716.18
盛花期	70.2	3	20.70	13.80	7.34	32.11	18.90	25.20	15.32	97.45
		5	18.47	12.31	8.30	54.20	16.73	22.31	18.90	165.34
		10	16.80	11.20	9.81	97.76	14.27	19.02	22.80	272.81
		15	16.05	10.70	10.49	130.86	12.90	17.20	26.11	386.83
		20	14.98	9.99	12.20	211.83	10.87	14.49	29.65	532.72
结荚期	86.9	3	26.47	17.64	4.98	16.04	21.45	28.60	11.91	56.83
		5	24.75	16.50	5.80	29.85	19.65	26.20	15.18	107.11
		10	22.80	15.20	7.14	53.97	16.73	22.31	18.61	189.88
		15	20.50	13.67	7.94	80.78	14.92	19.89	23.21	285.40
		20	19.50	13.00	9.50	136.70	13.10	17.47	25.86	390.37
始粒期	97.8	3	32.23	21.49	3.08	6.28	24.30	32.40	9.50	33.79
		5	30.03	20.02	3.92	12.16	22.80	30.40	12.19	67.42
		10	28.63	19.09	4.91	24.90	19.05	25.40	15.91	121.46
		15	26.30	17.53	5.97	43.70	17.13	22.84	18.53	193.52
		20	24.63	16.42	6.93	81.75	15.08	20.11	21.57	279.15

不同坡度裸地和大豆地的平均产流时间、降雨初损量、径流量和产沙量呈现一定的规律(图 2)。随着坡度的增加,裸地和大豆地的 *TR* 和 *ILR* 均呈现下降趋势,而 *RV* 和 *SY* 则呈现上升趋势。裸地的 *TR* 均值随着坡度增加整体呈现下降趋势,但差异并不显著,3°坡度的大豆地的 *TR* 均值显著高于 20°坡度地。同样的,3°坡度的大豆地的 *ILR* 均值也显著高于 20°坡度,而 3°,5°坡度的裸地的 *ILR* 均值显著高于其他 3 个坡度。不同坡度下的 *RV* 与 *SY* 与裸地相比均偏低,表明在不同坡度下大豆均能有效减少水土流失,但又由于坡度的不同而对产

流产沙产生显著的影响。裸地的 *RV* 均值随着坡度增加整体呈现下降趋势,但差异并不显著,3°,5°坡度的大豆地的 *RV* 均值显著小于 20°坡度。裸地和大豆地的 *SY* 均值显示出同样的规律,即随着坡度的增加 *SY* 也显著上升。3°坡度下大豆地径流量相比裸地减少 47.86%,20°坡度下减少 36.43%。3°坡度下大豆地产沙量与裸地相比减少 63.19%,而 20°坡度下大豆地产沙量与裸地相比减少 53.74%。由此可见,大豆调节径流与泥沙的作用受坡度的影响较大,随着坡度的增大,大豆减小产流产沙的作用不断降低。

雨强增大,初始产流时间提前,裸地和大豆地的  $TR$  均随着降雨强度的增加而下降,但不同降雨强度下差异不显著。ILR 均随着降雨强度的增加而增加,但不同降雨强度下差异不显著。降雨强度增大使得雨量增大,促进产流的降雨量则越多,径流侵蚀力也就越大,产沙量也越大。裸地的  $RV$  和  $SY$  随着降雨强度的增加而显著增加,雨强为 80 mm/h 时裸地的  $RV$  和  $SY$  显著高于 40 mm/h。大豆地的  $RV$  和  $SY$  随降雨强度的增加而

增加,但不同降雨强度下  $RV$  差异不显著, $SY$  差异显著,雨强为 80 mm/h 时大豆地的  $SY$  显著高于 40 mm/h (表 2)。40 mm/h 雨强下大豆地的径流量相比裸地减小 46.88%,80 mm/h 雨强下大豆地的径流量相比裸地减小 38.91%;40 mm/h 雨强下大豆地的产沙量相比裸地减小 60.86%,80 mm/h 雨强下大豆地的产沙量相比裸地减小 55.58%。由此可见,雨强的增加会削弱大豆的对径流和泥沙的抑制作用。



注:图中各指标数值均为某坡度下不同雨强和生育期的平均值,相同地面类别中具有相同小写字母均值无显著差异 ( $P > 0.05$ , Duncan 多范围检验)。

图 2 不同坡度裸地和大豆地的平均产流时间(a),降雨初损量(b),径流量(c)和产沙量(d)对比

表 2 不同降雨强度下裸地和大豆地的产流时间、降雨初损量、径流量和产沙量对比

地类	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	产流时间 TR/min	降雨初损量 ILR/mm	径流量 RV/(L·m <sup>-2</sup> )	产沙量 SY/(g·m <sup>-2</sup> )
裸地	40	5.94±0.99	3.96±0.79	18.9±2.65	318.73±45.53
	80	5.04±0.84	6.72±1.06	39.58±3.71	777.97±74.09
	P 值	0.560	0.172	0.045	0.034
大豆地	40	18.34±2.41	12.22±1.81	10.04±1.46	124.75±17.82
	80	13.96±2.15	18.61±2.84	24.18±3.63	345.55±43.19
	P 值	0.308	0.198	0.069	0.042

注:表中数据为平均值标准差;此为两两比较下的独立样本  $T$  检验结果; $P < 0.05$  表示不同雨强下有显著性差异。下同。

### 2.3 不同生育期大豆减流效益和减沙效益变化

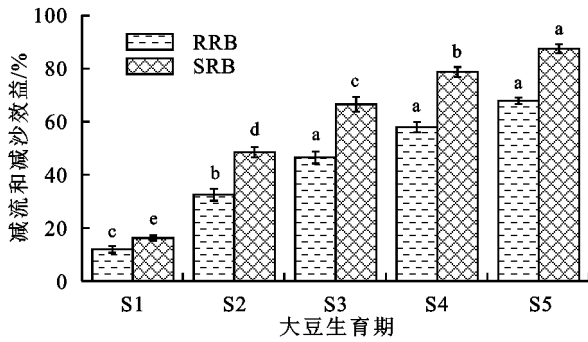
随着大豆的生长和植被的增加,大豆的  $RRB$  和  $SRB$  均显著增加。其  $RRB$  和  $SRB$  也分别从幼苗期的 11.96% 和 16.2% 显著增加到始粒期的 67.87% 和 87.49%。同时,在大豆每个生育期,其  $SRB$  均高于  $RRB$  (图 3),这表明大豆对坡面泥沙的拦截作用强于对径流的拦蓄作用。

### 2.4 不同坡度和降雨强度大豆减流效益和减沙效益变化

大豆的减流效益  $RRB$  和减沙效益  $SRB$  均随着

植被覆盖度的增加而增加(表 3)。值得注意的是,在大豆的不同生育期, $RRB$  和  $SRB$  随坡度和降雨强度的增加而降低,不同坡度和降雨强度下的  $SRB$  总是大于  $RRB$ ,其削减径流效益总是小于拦蓄泥沙效益。

不同坡度大豆地的减流效益  $RRB$  和减沙效益  $SRB$  均呈现一定的规律(图 4)。不同坡度的  $SRB$  均大于  $RRB$ 。随着坡度的增加, $RRB$  随着坡度的增加而减少,但不同坡度之间差异不显著。3°坡度的  $SRB$  显著高于 15°和 20°坡度,但与 5°和 10°坡度的  $SRB$  差异不显著。

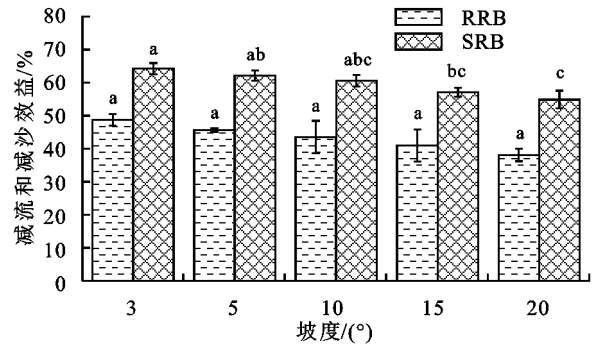


注: S1、S2、S3、S4、S5 分别表示大豆的 5 个生育期(幼苗期、始花期、盛花期、结荚期和始粒期)。图中 RRB 和 SRB 为某个生育期大豆在不同雨强和坡度下的平均值, 相同效益类别中具有相同小写字母的均值没有显著差异 ( $P > 0.05$ , Duncan 多范围检验)。下同。

图 3 不同生育期大豆减流效益(RRB)和减沙效益(SRB)对比  
表 3 不同生育期、坡度和降雨强度大豆的减流效益(RRB)和减沙效益(SRB)

生育期	植被覆盖度/%	坡度/(°)	40 mm/h		80 mm/h	
			RRB/%	SRB/%	RRB/%	SRB/%
幼苗期	20.3	3	16.7	23.0	11.4	16.2
		5	16.2	21.9	9.7	17.3
		10	15.4	21.0	9.3	13.6
		15	13.6	19.1	7.8	13.0
		20	12.2	16.9	7.3	12.5
始花期	45.4	3	37.9	54.3	35.0	50.2
		5	36.1	52.0	32.6	49.1
		10	35.0	51.2	29.8	48.2
		15	33.6	46.7	28.4	45.1
		20	31.3	46.2	25.3	42.6
盛花期	70.2	3	53.1	72.9	51.9	71.0
		5	50.9	70.9	46.3	67.0
		10	50.2	69.4	43.1	65.8
		15	48.2	65.7	40.9	61.5
		20	44.5	64.0	36.5	57.3
结荚期	86.9	3	68.2	86.4	62.6	83.1
		5	65.7	84.0	56.8	78.6
		10	63.7	83.1	53.5	76.2
		15	60.8	78.8	47.4	71.6
		20	56.8	76.7	44.6	68.7
始粒期	97.8	3	80.3	94.7	70.1	90.0
		5	76.8	93.5	65.3	86.6
		10	75.1	92.2	60.3	84.8
		15	70.5	88.6	58.0	80.8
		20	68.5	86.1	53.8	77.6

随着降雨强度的增加,大豆的 SRB 和 RRB 均略有增加。并且在 40, 80 mm/h 雨强下减流效益和减沙效益均没有显著差异(表 4)。



注: 图中 RRB 和 SRB 为某个坡度下不同雨强和生育期的平均值; 相同地面类别中具有相同小写字母的均值无显著差异 ( $P > 0.05$ , Duncan 多范围检验)。

图 4 不同坡度大豆的减流效益(RRB)和减沙效益(SRB)对比  
表 4 不同降雨强度下大豆地的减流效益和减沙效益对比

地类	降雨强度/(mm · h <sup>-1</sup> )	减流效益		减沙效益	
		RRB/%	SRB/%	RRB/%	SRB/%
大豆地	40	21.15 ± 1.17	23.64 ± 1.48		
	80	21.99 ± 0.58	24.58 ± 0.84		
	P 值	0.584	0.634		

### 3 讨论

#### 3.1 不同生育期大豆对坡面产流产沙的影响

大豆的冠层低矮,枝叶茂盛,地表保护作用较强,并且较矮的冠层能够大大降低降雨动能,在减少坡面径流量的同时,也减弱了降雨动能对径流的扰动,有利于降低径流的挟沙能力<sup>[19]</sup>。大豆地的 TR 和 ILR 普遍比裸地(BG)更长或更高。随着大豆的生长,从幼苗期到始粒期大豆地的 TR 和 ILR 从 BG((5.49 ± 0.56), (5.34 ± 0.32) mm)的 1.5 倍((8.15 ± 1.16), (7.83 ± 0.72) mm)迅速增加到 4.2 倍((23.02 ± 4.80), (22.57 ± 3.76) mm)。大豆地的 RV 和 SY 随大豆的生长而降低,并且从盛花期开始到始粒期两者均显著低于裸地的对应值(图 1)。与裸地相比,坡面径流量减少 10.75%~64.94%,产沙量减少 15.38%~84.24%。表明种植大豆可有效延迟产流,减缓坡面径流的形成,增加降雨初损量,降低坡面的产流量以及产沙量。

大豆具有显著的减流减沙效益。随着大豆的生长和植被的增加,大豆的 RRB 和 SRB 均显著增加。其 RRB 和 SRB 也分别从幼苗期的 11.96%和 16.2%显著增加到始粒期的 67.87%和 87.49%。同时,在大豆每个生育期,其 SRB 均高于 RRB(图 3)。由此可见,大豆对泥沙的拦截作用强于对径流的拦蓄作用。

#### 3.2 不同坡度和降雨强度下大豆对坡面产流产沙的影响

坡度增加,裸地和大豆地的 TR 和 ILR 均呈现下降趋势,而产流量 RV 和产沙量 SY 均上升(图 2),且大豆的 RRB 和 SRB 均呈现减少趋势(图 4)。不同

坡度下大豆地的  $RV$  与  $SY$  与裸地相比均偏低,表明在不同坡度下大豆均能有效减少水土流失,但又由于坡度的不同而对产流产沙产生显著的影响。 $3^\circ$ 坡度下大豆地径流量相比裸地减少 47.86%, $20^\circ$ 坡度下时减少 36.43%。 $3^\circ$ 坡度下大豆地产沙量与裸地相比减少 63.19%,而  $20^\circ$ 坡度下大豆地产沙量与裸地相比减少 53.74%。由此可见,大豆调节径流与泥沙的作用受坡度的影响较大,随着坡度的增大,大豆减小产流产沙的作用不断降低。

降雨强度增加,裸地和大豆地的  $TR$  减少,但不同降雨强度下差异不显著, $ILR$  随着降雨强度的增加而增加。裸地和大豆地的  $RV$  和  $SY$  均随降雨强度的增加而增加,较 40 mm/h 雨强,80 mm/h 雨强下裸地的  $RV$  和  $SY$  增加 1.09,1.44 倍,大豆地的  $RV$  和  $SY$  增加 1.41,1.77 倍。

与  $RRB$  相比,大豆的  $SRB$  在整个生长期均更高(图 3)。这意味着大豆在减少泥沙方面显然比径流更有效。Zhao 等<sup>[20]</sup>研究表明,春小麦、苜蓿和黑麦草的  $SRB > RRB$ 。

#### 4 结论

本试验研究表明,种植大豆与裸地相比可以有效延迟径流的产生,增加降雨的初始损失量,有一定减少水土流失的作用。而变化坡度和降雨强度则可以不同程度影响它们。与裸地相比,大豆从幼苗期到始粒期,坡面径流量减少 10.75%~64.94%,产沙量减少 15.38%~84.24%。 $RRB$  和  $SRB$  从大豆幼苗期到始粒期分别从 11.96%和 16.2%增加到 67.87%和 87.49%。变化坡度和降雨强度可对大豆调节径流和泥沙作用产生影响,增加坡度及降雨强度均会削弱大豆调节径流和泥沙的作用,使之产生更多的径流以及泥沙量。坡度从  $3^\circ$ 增加到  $20^\circ$ ,大豆整个生育期平均径流量增加 76.35%,产沙量增加 407.04%;80 mm/h 雨强下的径流量和产沙量是 40 mm/h 雨强下的 1.41,1.77 倍。因此,黄土高原坡耕地上种植大豆对防治坡耕地土壤侵蚀具有积极的作用,能够有效减少坡面产流产沙,且大豆对泥沙的拦截作用大于对径流的拦蓄作用,后面还需要进一步研究来分析田间管理技术和作物类型对坡耕地土壤侵蚀的综合影响。

参考文献:

[1] 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.  
[2] 吴佳.黄土高原旱坡地秋作入渗蓄水与防蚀作用特征研究[D].西安:西安理工大学,2016.  
[3] 杨晓芬,吴发启,马波,等.黄土坡耕地玉米作物的防蚀

作用研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(10):97-102.

- [4] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010:70-81.  
[5] 李小辉,贾本有,范子武,等.典型作物对水土流失影响的小区试验研究[J].水利水电技术,2019,50(2):95-100.  
[6] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2016,137:1-11.  
[7] Lin Q T, Xu Q, Wu F Q, et al. Effects of wheat in regulating runoff and sediment on different slope gradients and under different rainfall intensities[J]. Catena, 2019, 183:e104196.  
[8] 朱司航,王红,周大迈,等.石灰岩地不同作物坡面土壤侵蚀和养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):12-18.  
[9] 罗兴录,樊吴静,杨鑫.不同作物种植垦作对水土流失影响研究[J].中国农学通报,2014,30(36):232-236.  
[10] 马波,吴发启,马瑶.种植大豆地表土壤溅蚀效应及其空间分布特征[J].土壤学报,2013,50(1):50-58.  
[11] 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.  
[12] 宋孝玉,康绍忠,史文娟,等.长武黄土沟壑区不同下垫面条件农田产流产沙规律及其影响因素[J].水土保持学报,2000,14(2):28-49.  
[13] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010,15(6):48-53.  
[14] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):7-12.  
[15] 温永福,高鹏,穆兴民,等.野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究[J].水土保持研究,2018,25(1):23-29.  
[16] 朱燕琴,赵志斌,齐广平.黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):9-16.  
[17] 马波,吴发启,李占斌,等.作物与坡度交互作用对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):33-38.  
[18] 马波,由政,吴发启,等.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[J].中国水土保持科学,2015,13(3):16-23.  
[19] 王计磊.种植大豆对黄土区土壤抗侵蚀能力的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.  
[20] Zhao X M, Huang J, Wu P T, et al. The dynamic effects of pastures and crop on runoff and sediments reduction at loess slopes under simulated rainfall conditions[J].Catena,2014,119:1-7.