

文章编号: 1008-2786-(2020)6-851-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000561

不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征

徐露^{1,2}, 张丹^{1*}, 向宇国^{1,2}, 陈凡³, 黄田钊⁴

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 四川省烟草公司凉山州公司, 四川 西昌 615000; 4. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041)

摘 要: 金沙江下游紫色土区坡耕地水土流失严重, 研究不同耕作措施对紫色土坡耕地土壤侵蚀的影响, 对紫色土区水土流失防治具有重要意义。本研究以凉山州会东县紫色土区坡耕地为研究对象, 采用野外径流小区法, 基于 21 次自然降雨事件下的降雨和径流输沙数据, 研究不同耕作措施对紫色土坡耕地产流产沙特征的影响。结果表明: (1) 与顺坡垄作相比, 平作、横坡垄作、顺坡垄作 + 秸秆和横坡垄作 + 秸秆的径流深分别减少 12.24%、18.32%、36.42% 和 49.75%, 土壤流失量分别减少 57.34%、40.79%、69.89% 和 88.30%; (2) 5 种耕作措施下径流深和土壤流失量均随降雨等级增加呈增加趋势, 顺坡垄作径流深为对应横坡垄作 + 秸秆小区的 1.79 ~ 3.41 倍, 且倍数随降雨等级的增大而减小。横坡垄作土壤流失量在中雨和大雨条件下均显著低于顺坡垄作 ($P < 0.05$), 而在暴雨条件下二者无显著差异; (3) 5 种耕作措施下的径流深和土壤流失量与降雨量 (P_m)、最大 30 min 雨强 (I_{30}) 和降雨侵蚀力 (EI_{30}) 均呈显著正相关, 其中径流深与 P_m 相关系数最大, 为 0.89 ~ 0.93, 土壤流失量与 I_{30} 相关系数最大, 为 0.91 ~ 0.95; (4) 5 种耕作措施的径流深与土壤流失量之间均呈幂函数关系, 决定系数均大于 0.82。综上, 横坡垄作结合秸秆覆盖能有效抑制水土流失, 研究结果可为紫色土坡地水土流失防治及水土保持效益评价提供理论依据。

关键词: 自然降雨; 紫色土; 土壤侵蚀; 产流产沙; 耕作措施; 金沙江下游

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

金沙江下游地区是长江上游典型的生态脆弱区, 也是长江上游水土流失最严重的区域, 其多年平均输沙模数是金沙江和长江上游流域的 4 倍, 达 $2060 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [1]。凉山州金沙江下游沿岸诸县的耕地中 $> 10^\circ$ 的坡耕地占耕地面积 70% 以上, 是该区水土流失的主要策源地 [1-2]。严重的水土流失不仅会造成河道内堆积大量泥沙, 影响下游水库等水利设施的安全和库容, 严重威胁村庄和道路的安全 [3], 还会使浅薄的紫色土层继续变薄, 土壤蓄

水保肥能力降低, 农田生产力下降 [4]。同时该区域农业耕作方式较为粗放, 长期不合理的顺坡耕作方式加剧了土壤流失, 紫色土坡耕地的水土流失问题亟待解决 [5]。

近年来, 国内外学者针对坡耕地水土流失现状提出多种保护性耕作措施 [6-9]。横坡垄作作为一种重要的水土保持耕作措施被广泛使用, 研究表明横坡垄作可以有效蓄存土壤水分, 减少地表径流, 从而减轻水土流失 [9-12]。已有研究分别对遂宁组紫色

收稿日期 (Received date): 2020-06-09; 改回日期 (Accepted date): 2020-12-16

基金项目 (Foundation item): 中国烟草总公司四川省公司重点科技项目 (SCYC201802)。[the Key Project of China National Tobacco Corporation Sichuan (SCYC201802)]

作者简介 (Biography): 徐露 (1994-), 女, 四川成都人, 博士研究生, 主要研究方向: 水土保持研究。[XU Lu (1994-), female, born in Chengdu, Sichuan province, Ph.D. candidate, research on soil and water conservation research] E-mail: 1179313196@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 张丹 (1962-), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向: 土壤学。[ZHANG Dan (1962-), female, researcher, Ph.D., professor, specialized in soil science] E-mail: danielzhang@imde.ac.cn

土^[9]、川西丘陵区沙壤土^[13]和辽宁棕壤^[14]不同耕作措施下坡耕地的产流产沙特征进行了研究,提出传统顺坡垄作的产流量分别为横坡垄作的1~3倍、1.33~3.81倍和1.66~5.80倍,而产流量分别为横坡垄作的10~20倍、1.31~2.00倍和5.02~5.52倍。同时秸秆覆盖作为一种简单易行的水土保持耕作措施,也广泛应用于农业生产。研究表明,秸秆覆盖可有效减弱雨滴对土壤的溅蚀作用,也可通过增加土壤水分入渗,减少坡面径流,降低径流对土壤的冲刷作用,从而减少地表产流产沙^[15-17]。相关研究分别对华北沙壤土^[18]、延安黄绵土^[19]和四川紫色土^[20]秸秆覆盖下地表径流和产沙特征进行了研究,提出秸秆覆盖较裸地产流量分别减少17.91%~38.72%、6.26%~61.72%、73.93%~86.20%,产沙量分别减少34.11%~48.04%、60.12%~86.67%、96.43%~98.09%。

目前,尽管保护性耕作下坡面水土流失相关研

究成果丰硕,但大多仅考虑耕作措施单一方面的影响,而针对不同降雨等级下耕作措施影响坡面产流产沙的研究较少。同时,关于紫色土水土流失的研究多集中在川中丘陵区,而对川西南金沙江下游地区紫色土的研究较少,加上金沙江下游大部分地区经济欠发达,水土流失治理工作较难开展,尤其缺乏在自然降雨条件下紫色土坡耕地的产流产沙特征的长期原位监测^[5]。因此本试验以金沙江下游紫色土坡耕地为研究对象,分析不同降雨等级条件下不同耕作措施的产流产沙特征,以期为紫色土坡耕地水土流失防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于金沙江下游凉山彝族自治州会东县姜州镇的径流观测场(26°33′42″N, 102°27′53″E),

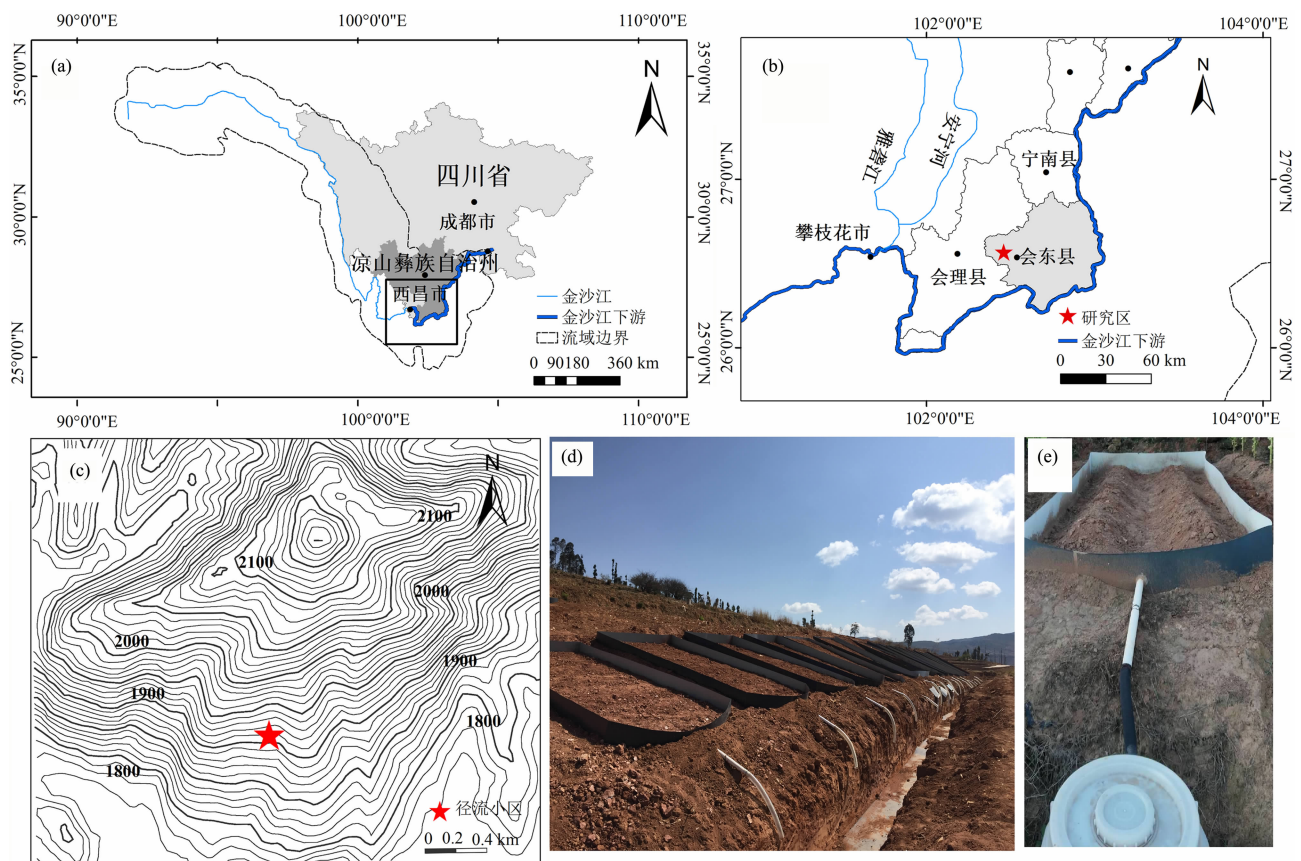


图1 研究区位置和径流小区全貌图:

(a)金沙江流域位置图;(b)金沙江下游位置图;(c)研究区位置图;(d)径流小区全貌图;(e)顺坡垄作径流小区

Fig.1 Location of the study area and representative images of the runoff plots;

(a)The location of the Jinsha watershed in the southwest of China;(b)The location of the lower reaches of the Jinsha River region in Sichuan;

(c)The location of the study area;(d)The fifteen runoff plots;(e)The runoff plot of slope ridge tillage

研究区位置见图1。海拔1910 m, 年均降水量为1111.60 mm, 其中90%以上降雨集中在6月—10月, 且多为暴雨。区内土壤类型为紫色土, 土层厚度为30~40 cm, 土壤质地分类采用中国制, 砂粒(0.05~2 mm)占58.7%, 粉粒(0.002~0.05 mm)占22.6%, 粘粒(<0.002 mm)占18.6%, 属于砂质黏壤土。土壤pH 5.57, 有机质含量 $7.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮、全钾和全磷含量分别为 $0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $15.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 氨态氮含量 $6.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 硝态氮含量 $16.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 $108 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量 $8.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤肥力低下。

1.2 径流小区布设

根据当地耕作习惯, 布设传统顺坡垄作(S)、横坡垄作(H)、平作(P)、顺坡垄作+秸秆覆盖(SJ)和横坡垄作+秸秆覆盖(HJ)5种耕作措施, 每种耕作措施重复3次, 共设置15个径流小区, 每个径流小区垂直投影面积为 8 m^2 ($2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$), 坡度为 15° 。径流小区边界由铁皮围成, 铁皮高出地表20 cm, 埋深45 cm。小区上方及两侧设截水沟及排水沟, 下方设集流池, 用于收集径流和泥沙。起垄高度为15 cm, 垄宽为40 cm, 垄距为50 cm, 秸秆选用玉米秸秆, 用闸刀切为5 cm小段, 以 $5000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施用量均匀铺撒在小区表面, 小区地表裸露, 并定期进行人工除草。

1.3 指标观测与计算

降雨测定: 采用JBD-2型自记翻斗雨量计记录降雨过程。将从雨量计中获取的降雨资料, 以6 h为最小降雨间隔划分降雨事件, 其中能够导致土壤侵蚀产沙的降雨称为侵蚀性降雨^[21]。统计并计算每场侵蚀性降雨事件的降雨量(P_m)、降雨历时、降雨强度、最大30 min雨强(I_{30})以及降雨侵蚀力(EI_{30})等指标用于描述次降雨特征, 其中 EI_{30} 由公式(1)~(3)计算得出^[22]:

$$EI_{30} = E \times I_{30} \quad (1)$$

$$e_i = 0.119 \pm 0.873 \lg I_i \quad (2)$$

$$E = \sum e_i \times P_i \quad (3)$$

式中, EI_{30} 为降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); E 为降雨总动能($\text{MJ} \cdot \text{hm}^{-2}$); I_{30} 为最大30 min雨强($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); e_i 为*i*时段降雨动能($\text{MJ} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); I_i 为*i*时段的平均降雨强度

($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); P_i 为*i*时段的降雨量(mm)。

依据SL419-2007《水土保持试验规程》^[23]对研究区2019年6月至10月侵蚀性降雨事件下各小区径流量和产沙量进行观测。一次降雨过程结束后, 立即记录径流池水深并计算出次降雨下各径流小区产流量。采用次降雨径流深(mm)指标来描述降雨产流规律^[22], 公式表达为:

$$H = V \times 10^3 / A \quad (4)$$

式中, H 为坡面径流深(mm); V 为径流量(m^3); A 为径流小区投影面积(m^2)。

径流量测定完毕后, 将集流池中的水充分搅拌, 灌满3个1 L的取样瓶, 采用烘干法测定水样的含沙量($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。采用土壤流失量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)指标来描述降雨产沙规律^[22], 公式表达为:

$$M = (V \times C \times 10^{-3}) / (A \times 10^{-4}) \quad (5)$$

式中, M 为土壤流失量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); C 为含沙量($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。

1.4 数据处理与分析

本试验共收集到315组有效观测数据(21次×15个径流小区)。所有数据在Microsoft Excel 2013和SPSS 20.0软件中进行统计分析。径流深和土壤流失量与降雨特征的相关性分析采用Pearson相关分析, 不同耕作措施间差异显著性采用方差分析, 多重比较采用LSD法, 显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 自然降雨特征

降雨是坡面水蚀的主要外营力之一, 与坡面产流产沙密切相关。研究区2019年6月1日至2019年9月30日共观测到57场降雨事件, 总降雨量906.74 mm。观测期内侵蚀性降雨事件21场, 占总降雨事件的36.37%, 侵蚀性降雨事件累计降雨量493.20 mm, 占总降雨量的54.39%。观测期内21场侵蚀性降雨特征见表1, 降雨量为3.60~79.00 mm, 依据国家标准《降水量等级》(GB/T 28592—2012), 将24 h累计降雨量在10 mm以下的次降雨划分为小雨, 10~24.9 mm为中雨, 25~49.9 mm为大雨, 超过50 mm为暴雨^[24]。21场侵蚀性降雨事件中, 小雨、中雨、大雨和暴雨分别发生2、7、9和3次, 对应的累计降雨量为9.60 mm、86.40 mm、206.80 mm和190.40 mm, 分别占侵蚀

性降雨事件降雨量的 1.95%、17.52%、41.93% 和 38.60%。

2.2 不同耕作措施下紫色土坡耕地产流产沙特征

表 2 中数据为平均值和标准差,不同耕作措施下的径流深存在显著差异($P<0.05$)。顺坡垄作径流深最大(0.58~29.13 mm),其次为平作(0.41~27.05 mm)和横坡垄作(0.32~24.89 mm),二者径流系数较为接近,顺坡垄作+秸秆(0.19~19.68 mm)次之,横坡垄作+秸秆径流深最小(0.17~16.19 mm)。随着降雨等级的增大,不同耕作措施下的径流深均有不同程度增大,但在同一降雨等级下,横坡垄作+秸秆径流深均最小,且显著低于顺坡垄作、横坡垄作和平作;顺坡垄作径流深均最大,且显著高于横坡垄作、顺坡垄作+秸秆和横坡垄作+秸秆。顺坡垄作径流深在小雨、中雨、大雨、

暴雨下分别为横坡垄作+秸秆的 3.41 倍、2.38 倍、2.04 倍和 1.79 倍。

不同耕作措施下的土壤流失量之间也存在显著差异($P<0.05$)。土壤流失量由大到小依次为顺坡垄作($0.01\sim3.19\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)>横坡垄作($0.01\sim2.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)>平作($0.01\sim1.50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)>顺坡垄作+秸秆($0.01\sim1.03\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)>横坡垄作+秸秆($0.01\sim0.43\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。随着降雨等级的增大,不同耕作措施下的土壤流失量均有不同程度增大。在小雨条件下,5 种耕作措施土壤流失量之间无显著性差异,这是因为小雨侵蚀力较弱,各小区土壤流失量都较小。在中雨和大雨条件下,与顺坡垄作相比,横坡垄作、平作、顺坡垄作+秸秆和横坡垄作+秸秆分别显著降低了 39.21%~40.90%、59.09%~59.80%、70.13%~71.57% 和

表 1 观测期内侵蚀性降雨事件

Tab. 1 Erosive rainfall events during observation period

降雨日期	降雨量/ mm	降雨历时/ h	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	I_{30} / (mm·h ⁻¹)	EI_{30} / (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	降雨等级
2019-06-16	13.60	3.17	4.29	15.60	59.45	中雨
2019-06-23	22.20	5.20	4.27	16.00	78.77	大雨
2019-07-02	9.20	1.08	8.49	12.80	27.14	中雨
2019-07-03	10.00	0.32	31.58	20.00	53.30	中雨
2019-07-04	14.00	2.23	6.27	14.80	47.87	中雨
2019-07-07	21.20	3.10	6.84	24.80	125.64	大雨
2019-07-10	6.00	15.90	0.38	2.00	25.80	小雨
2019-07-11	16.50	14.15	1.17	8.80	11.26	大雨
2019-07-15	50.40	6.85	7.35	50.80	203.44	暴雨
2019-07-19	19.00	11.47	1.66	8.40	86.12	大雨
2019-07-20	29.60	3.00	9.87	25.20	104.19	大雨
2019-07-21	12.20	6.33	1.93	16.40	122.65	中雨
2019-07-22	20.20	3.15	6.41	37.60	103.77	大雨
2019-07-23	26.80	12.28	2.18	14.00	77.47	大雨
2019-07-26	13.20	2.25	5.87	16.40	98.11	中雨
2019-07-27	29.30	16.53	1.77	36.40	113.69	大雨
2019-07-31	14.20	13.60	1.04	11.60	95.38	中雨
2019-08-01	3.60	1.38	2.60	6.00	20.06	小雨
2019-08-05	22.00	3.75	5.87	10.00	6.82	大雨
2019-08-07	71.00	6.95	10.22	77.20	392.96	暴雨
2019-09-03	79.00	10.01	7.90	37.20	678.71	暴雨

表 2 不同耕作措施下的径流深和土壤流失量

Tab.2 Characteristics of runoff depth and sediment yield under different tillage measures

耕作 方式	径流深/mm				土壤流失量/(t·hm ⁻²)			
	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨
S	0.58	5.54	9.74	29.13	0.01	1.02	1.54	3.19
	0.12 a	0.90 a	1.24 a	1.75 a	0.01 a	0.30 a	0.44 a	0.50 a
H	0.32	4.28	7.81	24.89	0.01	0.62	0.91	2.75
	0.03 bc	0.44 ab	0.70 b	1.84 b	0.01 a	0.14 b	0.28 b	1.09 a
P	0.41	4.54	8.32	27.05	0.01	0.41	0.63	1.5
	0.09 ab	0.73 ab	1.45 ab	1.51 ab	0.01 a	0.38 b	0.31 b	0.29 b
SJ	0.19	3.32	6	19.68	0.01	0.29	0.46	1.03
	0.06 c	0.64 bc	0.28 c	0.58 c	0.01 a	0.23 b	0.25 b	0.31 bc
HJ	0.17	2.32	4.77	16.19	0.01	0.08	0.17	0.43
	0.08 c	0.60 c	0.61 c	1.556 c	0.01 a	0.05 b	0.11 b	0.01 c

注: 同列不同字母表示同一降雨类型下不同耕作处理之间差异显著($P < 0.05$)。

88.96% ~ 92.15%。横坡垄作作为一种保护性耕作措施,在未断垄前一般不发生土壤侵蚀,在暴雨条件下,横坡垄作土壤流失量较平作、顺坡垄作 + 秸秆和横坡垄作 + 秸秆分别显著增加了 83.33%、166.99% 和 539.53%,这是因为土壤同时受暴雨冲刷和积水浸泡,结构受到破坏致使垄台坍塌。同时在暴雨条件下,横坡垄作 + 秸秆土壤流失量最低且显著低于其他处理,为 $0.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,横坡垄作 + 秸秆的土壤流失量分别为顺坡垄作、横坡垄作、平作和顺坡垄作 + 秸秆的 13.47%、15.63%、28.66% 和 41.74%。

2.3 不同耕作措施下产流产沙量与降雨因子的相关分析

将 21 场侵蚀性降雨事件的降雨量(P_m)、降雨历时、平均雨强、最大 30min 雨强(I_{30})和降雨侵蚀

力(EI_{30})与径流深和土壤流失量进行相关性分析(表 3)。5 种耕作措施下的径流深与 P_m 、 I_{30} 和 EI_{30} 均呈极显著正相关($P < 0.01$),其中 S、H、P 和 SJ 的径流深与 P_m 的相关系数最大,分别为 0.93、0.91、0.94 和 0.89,而 HJ 的径流深与 I_{30} 的相关系数最大,为 0.91。5 种耕作措施下土壤流失量与 P_m 、 I_{30} 均呈极显著正相关($P < 0.01$),同时 S、H 和 P 土壤流失量与 EI_{30} 呈极显著正相关,SJ 和 HJ 土壤流失量与 EI_{30} 呈显著相关($P < 0.05$)。5 种耕作措施下土壤流失量与 I_{30} 的相关性系数最大,为 0.91 ~ 0.95, P_m 次之,为 0.61 ~ 0.76, EI_{30} 最小,为 0.46 ~ 0.66。

基于上述相关分析,分别将土壤流失量与 EI_{30} 和 I_{30} 进行了线性拟合(图 2)。5 种耕作措施下土壤流失量均表现为随着 EI_{30} 的增加而增加,且土壤流

表 3 不同耕作措施下土壤侵蚀与降雨因子的相关分析

Tab.3 Correlation analysis between soil erosion and rainfall characteristics under different tillage measures

降雨因子	径流深/mm					土壤流失量/(t·hm ⁻²)				
	S	H	P	SJ	HJ	S	H	P	SJ	HJ
降雨量/mm	0.93 **	0.91 **	0.94 **	0.89 **	0.90 **	0.72 **	0.65 **	0.76 **	0.61 **	0.63 **
降雨历时/h	0.09	0.08	0.10	0.10	0.11	-0.11	-0.17	-0.08	-0.01	-0.01
平均雨强/(mm·h ⁻¹)	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.25	0.11	0.21	0.15	0.38
I_{30} /(mm·h ⁻¹)	0.84 **	0.86 **	0.87 **	0.89 **	0.91 **	0.91 **	0.92 **	0.92 **	0.92 **	0.95 **
EI_{30} /(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	0.87 **	0.87 **	0.87 **	0.82 **	0.83 **	0.59 **	0.53 **	0.66 **	0.49 *	0.46 *

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关。

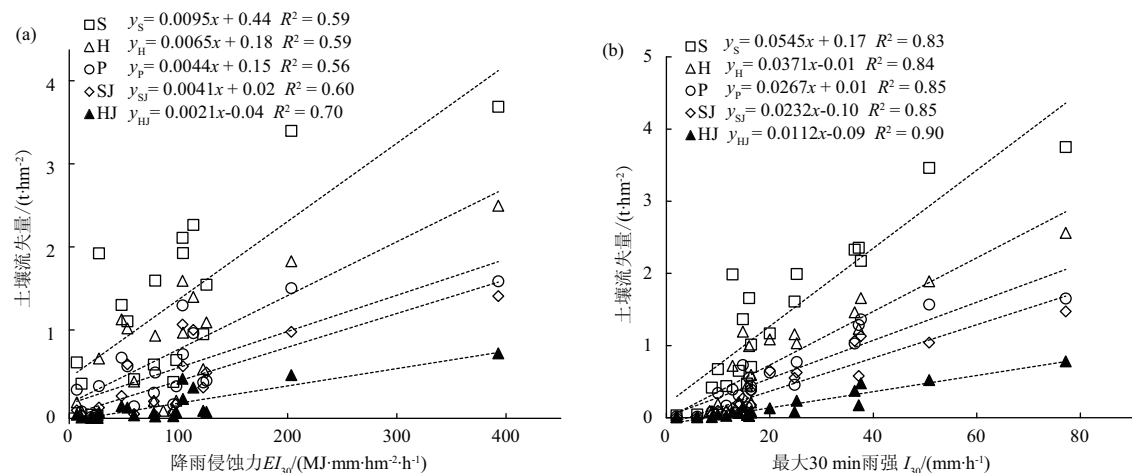


图 2 不同耕作措施下降雨特征与土壤流失量的散点图

Fig. 2 Scatter plots of rainfall characteristics and sediment yield under different tillage measures

流失量与 EI_{30} 的线性拟合方程均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 决定系数 R^2 为 0.56 ~ 0.70。图 2(b) 显示, 5 种耕作措施下土壤流失量与 I_{30} 的线性拟合方程也达到极显著水平 ($P < 0.01$), 且决定系数 R^2 均大于 0.83。从拟合直线的斜率可以看出, 随着 I_{30} 的增大, 5 种耕作措施下土壤流失量增加的速率不同, I_{30} 由 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $77.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, S、H、P、SJ 和 HJ 下产沙量的增幅分别为 $3.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $1.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $1.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表明 S 土壤流失量随 I_{30} 增加的速度最快, HJ 增加速度最慢。

2.4 不同耕作措施下水沙的定量关系

降雨是坡面产流的源动力之一, 地表径流和降雨沿着坡面剥蚀和搬运表土, 因此土壤侵蚀的产生与降雨和地表径流有紧密的关系^[25]。对径流深与土壤流失量进行回归分析, 结果表明, 5 种耕作措施的径流深与土壤流失量之间均呈幂函数关系为 $S = m \cdot R^n$ (图 3, 表 4)。5 种耕作措施下的 R^2 均在

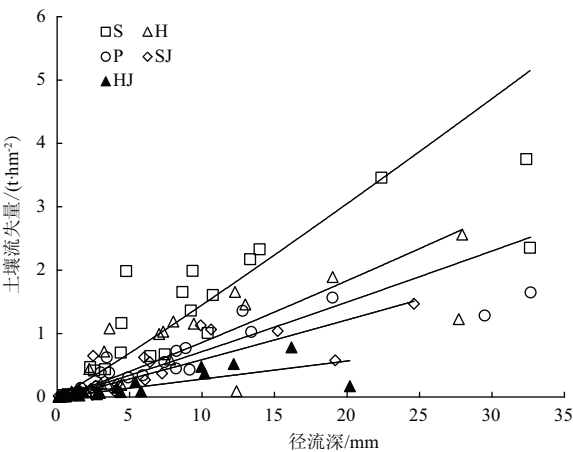


图 3 不同耕作措施下径流深与土壤流失量的散点图

Fig. 3 Scatter plot of runoff depth and sediment yield under different tillage measures

0.82 以上, 表明土壤流失量 82% 以上是由径流深所决定。分析幂函数 ($S = m \cdot R^n$) 的特性, 5 种耕作措施下均显示 $m > 0, n > 1$, 表明土壤流失量随径流深的增大而增大, 且曲线凹向上、变化较快。同时 m 值的大小可表征土壤流失量随径流深增加的快慢, 由大到小依次为 $S > H > P > SJ > HJ$ 。

3 讨论

3.1 不同耕作措施下紫色土坡耕地产流产沙特征

紫色土坡耕地是金沙江下游地区主要的土地资源, 也是水土流失的主要来源。因此采用适当的耕作方式才能减少土壤侵蚀, 提高土地生产力^[20]。本

表 4 不同耕作措施下土壤流失量与径流深的模型方程

Tab. 4 Model equations of sediment yield and runoff depth under different tillage measures

耕作方式	方程	决定系数	P
S	$y = 0.12x^{1.07}$	0.87	<0.01
H	$y = 0.07x^{1.17}$	0.86	<0.01
P	$y = 0.06x^{1.06}$	0.90	<0.01
SJ	$y = 0.05x^{1.04}$	0.82	<0.01
HJ	$y = 0.03x^{1.01}$	0.85	<0.01

文基于自然降雨研究了5种常见的旱地耕作措施下紫色土坡耕地产流产沙特征。结果表明,相同降雨条件下径流深和土壤流失量均表现为:顺坡垄作>横坡垄作>平作>顺坡垄作+秸秆>横坡垄作+秸秆,其中横坡垄作+秸秆水土保持效果最好,此结论与大多数学者的研究成果一致^[26-28]。这是因为秸秆覆盖减小了击溅侵蚀,减少了结皮的生成,土壤入渗性能较好^[29],横垄具有拦蓄雨水作用,拦蓄的雨水在秸秆覆盖的作用下很快就地入渗,全部转化为土壤水,在蓄水高度未达到垄高前几乎不产流,因此在横坡垄作和秸秆覆盖的配合下减流效果明显好于单一耕作措施。同时秸秆在径流的冲刷下,在低处堆积形成微型坝^[15, 29],横垄的存在改变了下垫面,径流方向由沿坡面向下的流动改为沿横垄方向流动,减小了径流对表土的冲刷作用,从而减少了土壤流失量。

5种耕作措施下径流深和土壤流失量均随小雨、中雨、大雨、暴雨依次递增,这与已有研究关于不同耕作措施下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征的结果一致^[9]。本研究发现,顺坡垄作径流深在自然降雨条件下为横坡垄作+秸秆的1.79~3.41倍,且倍数随降雨等级的增大而逐渐减少。说明横坡垄作+秸秆对小雨的拦截作用最为明显,对暴雨的拦截作用不明显,与已有关于川西丘陵区的研究结果相似^[13],主要是因为降雨等级较小时,由于横垄和秸秆对地表径流的阻滞和蓄存作用,增加了地表雨水的下渗时间,和传统顺垄耕作相比显著降低了雨水转化为地表径流的比率,因此在小雨条件下,顺坡垄作和横坡垄作+秸秆间径流深的差距最大;但随着降雨强度和历时的增加,各小区土壤水分均逐渐达到饱和,降雨转化为地表径流的比例趋于一致,因此顺坡垄作和横坡垄作+秸秆间径流深的差距减小。本研究发现,横坡垄作土壤流失量在中雨和大雨条件下均显著低于顺坡垄作,然而在暴雨条件下二者无显著差异,这可能是因为暴雨条件下,耕作垄台容易坍塌,横坡垄作的水土保持作用下降。这与已有研究天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程的结果一致^[14]。其结果表明当降雨量为24.60和28.00 mm时,顺垄产沙总量分别是横垄的5.52倍和5.02倍,当降雨量为49.20 mm时,横垄产沙量显著增大,顺垄产沙总量仅为横垄的2.32倍。

3.2 不同耕作措施下产流产沙与降雨因子的相关性分析

本文研究产流产沙与降雨因子的相关性结果表明,5种耕作措施下径流深和土壤流失量与 P_m 、 I_{30} 和 EI_{30} 均呈显著正相关,这与南方红壤侵蚀区产流产沙特征的研究结果相似^[30-31]。本研究发现,顺坡垄作、横坡垄作、平作和顺坡垄作+秸秆的径流深与 P_m 的相关系数最大,分别为0.93、0.91、0.94和0.89,而横坡垄作+秸秆的径流深与 I_{30} 的相关系数最大,为0.91。分析其原因,可能是不同耕作措施下地表微地形和沟垄几何结构不同所导致的^[32]。多数学者^[24-26]研究表明,降雨强度与产沙量具有很强的相关性,本研究发现,5种耕作措施下土壤流失量与平均雨强之间均无显著相关性,而与 I_{30} 呈极显著正相关,这与晋西黄土区坡耕地的研究结果一致,其认为平均雨强仅仅反映的是某次降雨的总体特征,并不能反映出降雨集中程度的差异^[33]。分析本研究原因,可能是因为本试验是在自然降雨的条件下进行,其降雨强度大多是间断不规则的,降雨过程随机性较强,因此 I_{30} 比平均雨强更能反映土壤流失的情况。

在水力侵蚀区,地表径流是导致土壤发生侵蚀的源动力,因此土壤侵蚀的产生与地表径流有着密切的联系。通常认为产流产沙二者的关系在净分离条件下是线性的,在沉积条件下是二次回归式^[34]。本研究发现,5种耕作措施的径流深与土壤流失量之间均呈幂函数关系,且 R^2 均在0.82以上,这与已有研究结果相似,提出幂函数能较准确地反映径流深与土壤流失量之间的关系^[35]。也有研究表明径流深与土壤流失量之间符合线性方程,这主要是因为不同研究中研究尺度、降雨特征和下垫面条件等均存在一定差异^[25, 36]。

4 结论

(1)自然降雨条件下,传统顺坡垄作的水土流失最严重,平作、横坡垄作、顺坡垄作+秸秆覆盖和横坡垄作+秸秆均有不同程度的减水减沙的作用,其中径流深较顺坡垄作径流深分别减少12.24%、18.32%、36.42%和49.75%,土壤流失量分别减少57.34%、40.79%、69.89%和88.30%。

(2)降雨量(P_m)、最大30 min雨强(I_{30})和降雨

侵蚀力(EI_{30})与径流深和土壤流失量均呈显著相关,其中径流深与 P_m 相关系数最大,为0.89~0.93,土壤流失量与 I_{30} 相关系数最大,为0.91~0.95。土壤流失量与 EI_{30} 和 I_{30} 拟合关系均为线性函数,决定系数分别为0.56~0.70和0.82~0.90。

(3)5种耕作措施的径流深与土壤流失量之间均呈幂函数关系,土壤流失量随径流深增加的速度由大到小依次为:传统顺坡垄作>横坡垄作>平作>传统顺坡垄作+秸秆>横坡垄作+秸秆。在产生相同径流量时,横坡垄作+秸秆土壤流失量最小,其保水保土效果最好。

参考文献 (References)

- [1] 黄凤琴,第宝锋,黄成敏,等. 基于日降雨量的年均降雨侵蚀力估算模型及其应用——以四川省凉山州为例[J]. 山地学报, 2013, **31**(1):55-64. [HUANG Fengqin, DI Baofeng, HUANG Chengmin, et al. Spatial distribution of soil erosion in Liangshan, Sichuan based on a new equation to estimate the rainfall erosivity [J]. Mountain Research, 2013, **31**(1):55-64]
- [2] 何周窈,苏正安,熊东红,等. 金沙江干热河谷区坡面剑麻的水土保持效应[J]. 山地学报, 2018, **36**(5):731-739. [HE Zhouyao, SU Zheng'an, XIONG Donghong, et al. Effects of agave americana on soil and water conservation of slope in dry valley of Jinsha River[J]. Mountain Research, 2018, **36**(5):731-739]
- [3] 秦伟,左长清,晏清洪,等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(2):124-132. [QIN Wei, ZUO Changqing, YAN Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(2):124-132]
- [4] 马星,郑江坤,王文武,等. 不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(2):17-21. [MA Xing, ZHENG Jiangkun, WANG Wenwu, et al. Characteristics of the runoff and sediment yield of sloping farmland in the purple soil area under different rainfall patterns [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(2):17-21]
- [5] 鲍玉海,丛佩娟,冯伟,等. 西南紫色土区水土流失综合治理技术体系[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(3):143-150. [BAO Yuhai, CONG Peijuan, FENG Wei, et al. Comprehensive management system of soil and water loss in purple soil area of southwestern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(3):143-150]
- [6] 吴昊,刘冬黎. 水土保持耕作措施与预防控制地下水污染的综合研究初探[J]. 中国水土保持, 2018(2):48-50. [WU Hao, LIU Dongli. Preliminary study on comprehensive research of soil and water conservation tillage measures and prevention of groundwater pollution[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(2):48-50]
- [7] KUROTHE R S, KUMAR G, SINGH R, et al. Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India [J]. Soil & Tillage Research, 2014, **140**:126-134.
- [8] LAL R. Soil degradative effects of slope length and tillage methods on Alfisols in Western Nigeria. I. Runoff, erosion and crop response [J]. Land Degradation and Development, 1997, **8**(3):201-219.
- [9] 任雨之,郑江坤,付滢,等. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(2):32-40. [REN Yuzhi, ZHENG Jiangkun, FU Yan, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in purple soil sloping farmland under different tillage patterns in Suining formation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(2):32-40]
- [10] 郑子成,林代杰,李廷轩,等. 不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2012(2):26-30. [ZHENG Zicheng, LIN Daijie, LI Tingxuan, et al. Effect of maize in maturity storage on runoff and sediment yield under different tillage practices[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012(2):26-30]
- [11] 张怡,何丙辉,王仁新,等. 横坡和顺坡耕作对紫色土土壤团聚体稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(2):192-198. [ZHANG Yi, HE Binghui, WANG Renxin, et al. Effects of across- and along-slope ploughs on soil aggregate stability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(2):192-198]
- [12] 谢颂华,曾建玲,杨洁,等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(9):81-86. [XIE Songhua, ZENG Jianling, YANG Jie, et al. Effects of different tillage measures on soil and water conservation in slope farmland of red soil in Southern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(9):81-86]
- [13] 郑江坤,杨帆,王文武,等. 不同降雨等级下耕作措施对坡地产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, **16**(1):38-45. [ZHENG Jiangkun, YANG Fan, WANG Wenwu, et al. Effects of tillage measures on runoff and sediment yield of farmland under different rainfall levels [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, **16**(1):38-45]
- [14] 张晶玲,周丽丽,马仁明,等. 天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(5):114-119. [ZHANG Jingling, ZHOU Lili, MA Renming, et al. Runoff and sediment yield process on longitudinal and cross ridge-slope under natural rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(5):114-119]
- [15] ANTONIO J, ZAVALA L M, GIL J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J]. CATENA, 2010, **81**(1):77-85.
- [16] PROSDOCIMI M, JORDAN A, TAROLLI P, et al. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards[J]. Science

- of the Total Environment, 2016, **547**:323–330.
- [17] 吕凯,段颖丹,吴伯志. 秸秆覆盖对种植烤烟坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 南方农业学报,2019,**50**(11):2450–2458. [LYU Kai, DUAN Yingdan, WU Bozhi. Effects of straw mulching on soil erosion in tobacco sloping farmland [J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, **50**(11):2450–2458]
- [18] 张翼夫,李洪文,何进,等. 玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报,2015,**31**(7):118–124. [ZHANG Yifu, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effect of maize straw mulching on runoff and sediment process of slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(7):118–124]
- [19] 王安,郝明德,王英文. 人工降雨条件下秸秆覆盖及留茬的水土保持效应[J]. 水土保持通报,2012(2):30–32+38. [WANG An, HAO Mingde, WANG Jiawen, et al. Effects of straw mulch and stubble on soil and water conservation under stimulated rainfalls [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012(2):30–32+38]
- [20] 林超文,罗春燕,庞良玉,等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报,2010,**30**(22):6091–6101. [LIN Chaowen, LUO Chunyan, PANG Liangyu, et al. Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(22):6091–6101]
- [21] 杨帅. 山地黄壤玉米季坡耕地土壤抗侵蚀能力及侵蚀产沙特征研究[D]. 雅安:四川农业大学,2017:1–90. [YANG Shuai. Study on the characteristics of soil erosion resistance and their effects on sediment yield of sloping cropland of the yellow soil area in mountain regions around Sichuan basin during corn growth season [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2017:1–90]
- [22] 顾礼彬,张兴奇,杨光敏,等. 黔西高原坡面次降雨产流产沙特征[J]. 中国水土保持科学,2015,**13**(1):23–28. [GU Libin, ZHANG Xingqi, YANG Guangxi, et al. Characteristics of slope runoff and sediment production under rainfall events in the plateau area of western Guizhou [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, **13**(1):23–28]
- [23] SL 419–2007 水土保持试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 419–2007 Water and Soil Conservation Test Regulations [S]. Beijing: China Water Power Press, 2008]
- [24] GB/T 28592–2012 降雨量等级[S]. 北京:中国标准出版社,2012. [National Meteorological Center. GB/T 28592–2012 rainfall rating [S]. Beijing: China Standard Press, 2012]
- [25] 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):11–18. [ZHU Yanqin, ZHAO Zhibin, QI Guangping, et al. Effects of vegetation types and rainfall regimes on slope erosion and sediment yield in loess hilly and gully region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(2):11–18]
- [26] 陈龙飞,刘普灵,王栓全,等. 玉米生长对不同耕作方式下的径流及产沙的影响[J]. 水土保持学报,2013,**27**(1):12–16. [CHEN Longfei, LIU Puling, WANG Shuanquan, et al. Effect of maize on runoff and sediment yield under different tillage practices [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(1):12–16]
- [27] 林超文,罗春燕,庞良玉,等. 不同覆盖和耕作方式对紫色土坡耕地降雨土壤蓄积量的影响[J]. 水土保持学报,2010,**24**(3):213–216. [LIN Chaowen, LUO Chunyan, PANG Liangyu, et al. Influence of mulching and tillage methods on the rainfall storage by soil in purple soil area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(3):213–216]
- [28] 邱野,王瑄,李德利,等. 不同耕作模式下坡耕地次降雨径流量及径流泥沙颗粒机械组成规律[J]. 水土保持学报,2012,**26**(2):62–65. [QIU Ye, WANG Xuan, LI Deli, et al. Slope cultivated land rainfall runoff and sediment mechanical composition in different tillage patterns [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(2):62–65]
- [29] 刘柳松,任红艳,史学正,等. 秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响[J]. 农业工程学报,2010,**26**(1):108–112. [LIU Liusong, REN Hongyan, SHI Xuezheng, et al. Effect of straw mulching on sediment yielding process of soil with different initial water contents [J]. Transactions of the CSAE, 2010, **26**(1):108–112]
- [30] 寇馨月,姜学兵,黄俊,等. 红壤区小流域次降雨产流产沙因素分析及模型构建[J]. 水土保持通报,2017,**37**(6):34–42. [KOU Xinyue, JIANG Xuebing, HUANG Jun, et al. Analysis factors affecting runoff and sediment yield and its modelling construction in individual rainfall in small watershed of red soil region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, **37**(6):34–42]
- [31] 李宗勋,李启艳,侯晓龙,等. 不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J]. 水土保持学报,2020,**34**(1):27–33+40. [LI Zongxun, LI Qiyang, HOU Xiaolong, et al. Characteristics of soil and water loss under different natural rainfall grades of *pinus massoniana* forest with different canopy density [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(1):27–33+40]
- [32] 杨帅,尹忠,郑子成,等. 四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J]. 水土保持学报,2016,**30**(4):7–12. [YANG Shuai, YIN Zhong, ZHONG Zicheng, et al. Characteristics of natural rainfall and sediment yield of sloping cropland of the yellow soil area in Sichuan during core growth season [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(4):7–12]
- [33] 周晗,严俊霞,李洪建,等. 晋西黄土区坡耕地不同下垫面水土流失对侵蚀性降雨的响应[J]. 水土保持研究,2019, **26**(4):7–12. [ZHOU Han, YAN Junxia, LI Hongjian, et al.

- Response of soil and water loss on different underlying surfaces of sloping farmland to erosive rainfall in the loess area of western Shanxi province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, **26**(4): 7–12]
- [34] BENIK S R, WILSON B N, BIESBOER D D, et al. Performance of erosion control products on a highway embankment [J]. Transactions of the ASAE, 2003, **46**(4): 1113–1119.
- [35] SMETS T, POESEN J, BOCHET E, et al. Impact of plot length on the effectiveness of different soil – surface covers in reducing runoff and soil loss by water[J]. Progress in Physical Geography, 2008, **32**(6): 654–677.
- [36] 王磊, 师宏强, 刘刚, 等. 黑土区宽垄和窄垄耕作的顺坡坡面土壤侵蚀对比[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(19): 176–182. [WANG Lei, SHI Hongqiang, LIU Gang, et al. Comparison of soil erosion between wide and narrow longitudinal ridge tillage in black soil region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(19): 176–182]

Runoff and Sediment Yield of Sloping Farmland in Purple Soil Area of the Lower Jinsha River under Different Tillage Measures

XU Lu^{1,2}, ZHANG Dan^{1*}, XIANG Yuguo^{1,2}, CHEN Fan³, HUANG Tianfang³

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Tobacco Company of Liangshan, Xichang, Sichuan, 615000, China;

4. Chengdu institute of biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China.)

Abstract: Soil erosion is one of the major problems in the purple soil area of the lower Jinsha River, and soil conservation tillage measures have high efficiency in preventing soil erosion. To quantitatively classify the effects of tillage measures on runoff and sediment yield, a study was conducted by runoff plots position observation method in Huidong County, Liangshan Yi Autonomous Prefecture, China. Compared with slope ridge tillage, the runoff depths of plat tillage, contour ridge tillage, slope ridge tillage + mulching and contour ridge tillage + mulching decreased by 12.24%, 18.32%, 36.42%, and 49.75%, and the sediment yield decreased by 57.34%, 40.79%, 69.89%, and 88.30%, respectively. The runoff depth and sediment yield gradually increased along with rainfall levels. Under drizzle, moderate rain, heavy rain and rainstorm, the runoff depth of slope ridge tillage was 3.41, 2.38, 2.04 and 1.79 times higher than that of the contour ridge tillage, respectively. The sediment yield of contour ridge tillage was significantly lower than that of slope ridge tillage under moderate rain and heavy rain, whereas there was no significant difference between contour ridge tillage and slope ridge tillage under rainstorm. Pearson correlation analysis showed significant positive correlation in rainfall amount (P_m), maximum rainfall intensity in 30 min (I_{30}) and rainfall erosivity (EI_{30}) with runoff depth and sediment yield under five tillage measures. The correlation coefficients between runoff depth and P_m , sediment yield and I_{30} varied from 0.89 to 0.93 and 0.91 to 0.95, respectively. Sediment yield was positively related to runoff depth by a power function, and the coefficients of determination were greater than 0.82. In conclusion, contour ridge tillage combined with straw mulching effectively controlled soil erosion induced by water. These results could provide a theoretical basis for the prevention and control of soil erosion and the evaluation of soil and water conservation benefits in the purple soil region.

Key words: natural rainfall; purple soil; soil erosion; runoff and sediment; tillage measures; lower Jinsha River