

不同逆坡耕作强度对干热河谷区坡耕地水蚀的影响

贾立志¹, 张泽洪²

(1.中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2.西华师范大学国土资源学院, 四川 南充 637000)

摘要: 为了研究不同逆坡耕作强度导致的土壤位移对坡面水蚀的影响, 以金沙江干热河谷区坡面径流小区为研究对象, 在径流小区 5°, 10°, 15°坡面上, 进行单宽流量为 0.6 m²/h 的放水试验。在 10°坡面的下坡位置设置 0.05, 0.10, 0.20 m 土层深度, 分别代表连续耕作 80, 69, 46 年导致下坡位置土壤损失土层变薄情况。通过收集径流小区出口的产流量和产沙量, 研究在不同坡度上的不同逆坡耕作强度导致的土壤位移对坡面产流率、产沙率、总流量和总产沙量的影响。结果表明: (1) 在 10°坡面, 耕作年限越长, 产流越快, 不同耕作强度(年限)的产流率、总产流量、产沙率和总产沙量均表现 46 年 < 69 年 < 80 年的变化趋势, 说明长期逆坡耕作导致的土壤位移加速了坡面水蚀的发生; (2) 在耕作 69 年的坡面, 坡度越大, 产流越快。在测定坡度范围, 产流率、总产流量、产沙率和总产沙量均表现出 5° < 10° < 15°的变化趋势, 即坡度的增加明显增大了坡面水蚀; (3) 随耕作侵蚀强度的增大, 坡面产流率与产沙率间的指数增长关系越显著, 而坡度的增大弱化了水沙指数函数关系。研究成果可为揭示干热河谷区逆坡耕作强度和坡度对水蚀的作用机理提供参考。

关键词: 逆坡耕作; 冲刷试验; 水蚀; 干热河谷区

中图分类号: S153.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0014-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.003

Effect of Different Upslope Tillage Intensity on Water Erosion on Sloping Farmland in the Dry-hot Valley of Jinsha River

JIA Lizhi¹, ZHANG Zehong²

(1.College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081;

2.School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637000)

Abstract: To study the effect of soil translocation by different upslope tillage intensities on water erosion, we took the slope runoff plot in the Dry-hot Valley of Jinsha River as the research object. A series of scouring experiments were conducted in three runoff plots (2 m × 10 m) with three slope gradients (5°, 10°, 15°) and a fixed flow discharge of 0.6 m²/h. Three soil depths (0.05 m, 0.10 m, 0.20 m) were set on the downslope positions of the 10° slope representing the soil loss by continuous tillage for 80, 69 and 46 years respectively. Runoff and sediment were collected at the outlet of runoff plot to examine the effect of different tillage intensities and gradients on runoff rate, runoff amount, detachment rate and total sediment yield. The main results showed that: (1) The more intensive tillage was, the more easily runoff in the 10° slope. The runoff rate, runoff amount, detachment rate and sediment yield increased with the increasing tillage intensities: 46 years < 69 years < 80 years, suggesting that soil translocation caused by long-term upslope tillage accelerated water erosion. (2) The runoff started time after the initiation of the scouring decreased with the increasing slope gradients on the 69 years slopes. In the experimented slope range, the runoff rate, runoff amount, detachment rate and sediment yield were as follow: 5° < 10° < 15°, showing that the increase of slopes further promoted water erosion. (3) A positively exponential correlation was found between runoff rates and detachment rates. The increase of tillage intensities enhanced the exponential growth, but the increase of slope gradients weakened the exponential relationship of water and sediment. These results provide references for revealing the affecting mechanism of long-term upslope tillage intensity and slope gradient on water erosion in the dry-hot valley region.

Keywords: upslope tillage; scouring experiment; water erosion; dry-hot valley

土壤侵蚀是人类共同关心的环境问题。我国是土壤侵蚀最严重国家之一,金沙江流域是长江流域泥沙主要来源,而金沙江干热河谷区,坡耕地分布广、坡度陡,是金沙江流域水土流失主要策源地。另外,金沙江干热河谷气候干热,蒸发量大,降水少而集中,干湿季分明,水资源极其缺乏,加上长期人类活动使该区植被破坏严重,水土流失加剧,造成了土壤质量和生态系统严重退化,已成为长江上游生态环境最脆弱的地区之一^[1]。在金沙江干热河谷区,坡耕地耕作历史悠久,长期以来,农民通常会采用顺坡耕作以节省劳力。水蚀和耕作侵蚀是该区坡耕地土壤侵蚀的2种重要的形式,并且两者同时存在,相互作用。大量的研究^[2-6]表明,长期的顺坡耕作会导致坡耕地土壤再分配,具体过程为顺坡耕作会导致坡耕地上坡位置的土壤被搬运到下坡位置,导致上坡位置土层不断变薄,而下坡位置土层逐渐变厚。在希腊雅典地区的耕作试验^[7]表明,侵蚀部位土层变薄,土壤贮水能力变小,增加了水蚀。Zhang等^[6]在2004年通过一系列的模拟耕作试验得出,在正常的耕作情况下,短期耕作(5年)就会使坡顶位置的土层变浅薄,甚至完全裸露。并且长期耕作导致的上坡位置土层的裸露情况会随着坡度的增加而加剧^[8-9]。在疏松和翻转整个耕层的过程中,耕作不仅导致土壤向下坡移动,也改变了土壤耕层理化性质,降低了土壤抗蚀性,间接促进了水蚀的发展^[10-11]。在紫色土区,长期顺坡耕作导致土壤在坡面上坡位置变薄,增大坡面产流,增强坡面产沙,从而加速坡面土壤侵蚀^[12]。

土壤侵蚀严重的地区,部分农民也意识到长期顺坡耕作会加剧坡面水蚀作用,因此他们会连续采用逆坡耕作以减少上坡位置的土壤向下坡位置移动^[13]。一定坡度范围内逆坡耕作既会导致土壤发生顺坡位移,也会导致土壤逆坡位移。而总体来说,连续逆坡耕作会引起下坡位置土壤向上坡运动,发生逆坡位移^[14]。本研究以金沙江干热河谷区坡耕地为对象,通过野外冲刷试验,探讨不同逆坡耕作强度导致的下坡位置的土壤位移情况和坡度对坡面产流产沙的影响,以期揭示人类活动对干热河谷区坡面土壤侵蚀的影响机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省元谋县黄瓜园镇(25°23′—26°06′ N, 101°35′—102°06′ E),该区域属于深切河谷低山丘陵地貌,海拔1 300 m左右,气候干热,全年无霜,最高温为35.3~42℃,最低温-5.3~3.6℃,年均气温21.9℃;干湿季分明,降雨集中在5—10月,约占总降水量的90%,10月至翌年4月为旱季,多年平均降

水量615 mm,年均蒸发量为3 911 mm,蒸发量约为降水量的6.4倍。该区位于金沙江流域内,坡耕地分布广泛,研究区的坡度大(最大耕作坡度达37°)。

1.2 试验土样采集

试验土样采集于元谋县黄瓜园镇的中科院元谋沟蚀崩塌观测试验站,属于抗蒸发能力弱,有效养分缺失,抗蚀能力差的燥红土。土壤容重为1.50 g/cm³,水分含量为12.85%,有机质含量为13.15 g/kg。土壤中砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)含量分别为28.59%,13.25%,55.76%,按照国际土壤质地分级标准,属于黏土,该土壤结构差,土质黏性重^[15]。

1.3 试验设计

为了测定不同逆坡耕作强度下坡面产流产沙特征,在中科院元谋沟蚀崩塌观测站内选择坡耕地原位修建了5°,10°,15°3个坡度的径流小区,小区尺寸为2 m×10 m(宽×长),各径流小区之间距离在50 m以内,并且各径流小区之间土壤性质无显著差异。试验于2018年1—2月进行,试验前采集径流小区土壤样品,以测定土壤理化性质。采取放水冲刷试验,在径流小区顶部修建了稳流槽,同时在稳流槽上铺设了薄膜,以获得比较稳定的坡面流;在小区上部外侧同时修建了储水池以提供稳定水源,保证流量稳定。为了收集泥沙,在小区下部修建了泥沙收集池。根据试验需要,将小区分为上坡位置(0~5 m)和下坡位置(5~10 m)2个部分(图1)。根据小区建立的气象站,发生频率最大的降雨强度约为60 mm/h,换算成单宽流量为0.6 m²/h。因此,本试验采用的单宽流量为0.6 m²/h。放水冲刷试验之前将坡面整理平整以确保在坡面形成漫流。

1.4 试验处理

本课题组以往的研究^[14]表明,逆坡耕作导致的净顺坡土壤位移与坡度之间的关系可用线性函数表示,方程的表达形式为:

$$D_d = 0.4122S - 0.1888 \quad (1)$$

式中: D_d 为净顺坡土壤位移(m); S 为坡度(m/m)。

由公式(1)可以计算得出,在坡度0~24°范围内,逆坡耕作会导致土壤发生逆坡位移,即土壤从下坡位置位移到上坡位置。而当坡度>24°时,由于重力在顺坡方向的分力大于锄头向上的拉力,会导致土壤沿顺坡方向发生位移。为研究不同逆坡耕作强度对坡面水蚀的影响,本研究选择10°坡面为典型坡面小区,在下坡设置不同土层厚度以模拟不同逆坡耕作强度导致下坡位置土层损失情况。通过结合土壤容重和耕作深度,可计算得出10°坡耕地上土壤沿逆坡方向的耕作传输速率为32.73 mg/hm²^[14],根据下坡

位置损失的土层深度可换算成耕作年限(表 1)。小区原始土层深度 0.40 m, 以下为不透水的母岩层。在试验时, 将不做任何处理的坡面作为对照地(CK)。在冲刷试验前, 冲刷流量均矫正为 1 000 cm³/min, 每种处理均进行等高耕作 1 次, 以尽量保证土壤松紧度一致, 同时保证土壤水分含量基本一致。根据试验设计的要求, 在径流小区下坡位置(5~10 m), 分别挖出 0.05, 0.10, 0.20 m 深的土层, 然后铺设不透水的塑料薄膜代表不透水的母岩层, 再将挖出的土壤回填, 踩实, 并保持坡度一致。为研究相同逆坡耕作强度下坡度对坡面水蚀的影响, 本研究在 3 个坡度(5°, 10°, 15°)径流小区的下坡位置分别设置了 0.10 m 土层厚度, 以模拟连续逆坡耕作 69 年下坡度对坡面水蚀的影响。

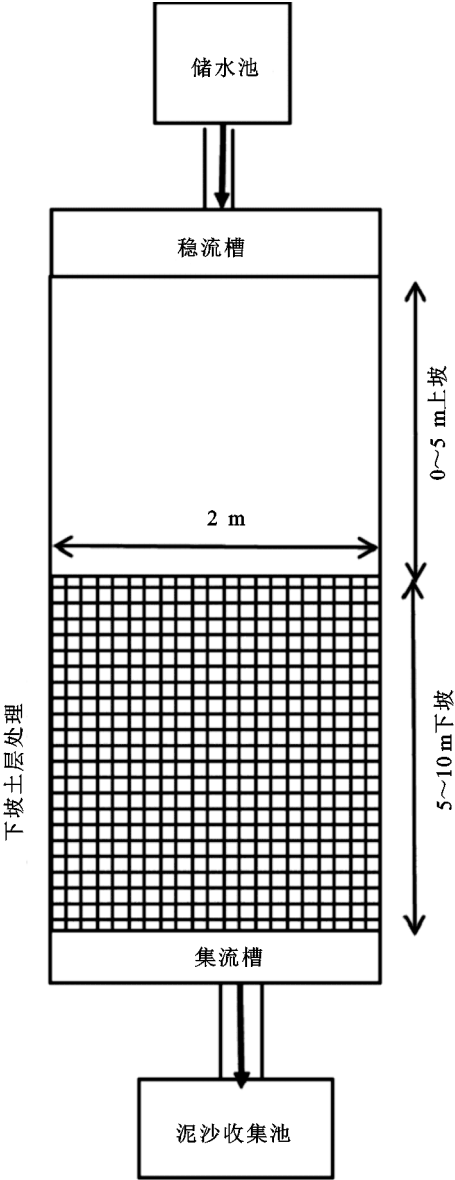


图 1 冲刷试验小区示意

1.5 数据获取及计算

每次冲刷试验均大于 30 min, 记录开始产流时间, 直到坡面产流产沙保持稳定为止。在坡面出水口

初始产流后, 每间隔 2 min 用 500 mL 采样瓶收集水沙样。水沙样沉淀分离后, 泥沙样经 105 °C 恒温烘箱中烘干后称重, 最后用于泥沙重和产流体积可计算产沙率。利用 Origin 8.5 与 SPSS 18.0 软件进行数据处理与分析及绘图处理。

表 1 不同耕作年限对应的下坡土层深度

耕作年限/a	土壤损失量/(Mg·hm ⁻²)	下坡损失土层深度/m	下坡土层保留深度/m
0	0	0	0.40
80	1500	0.35	0.05
69	2250	0.30	0.10
46	2625	0.20	0.20

2 结果与分析

2.1 不同耕作强度下产流产沙特征

由表 2 可知, 在 10°坡面, 不同耕作年限下坡面产流起始时间变化趋势为: 46 年(38.53 min) > 69 年(33.08 min) > 80 年(22.47 min) > 对照(14.83 min), 表明随着耕作年限增加, 产流起始时间越短, 即产流越快。由图 2(a)可知, 产流率先急剧增大, 后逐渐达到稳定产流状态。由表 2 可知, 平均产流率总体表现出随耕作年限的增加而增大, 耕作 80 年的平均产流率显著大于耕作 69 年($P < 0.05$), 而耕作 69 年的平均产流率显著大于耕作 46 年($P < 0.05$)。另外, 累计产流量也表现出随耕作强度增加而增大趋势, 即对照(343.99 L) < 46 年(393.25 L) < 69 年(521.17 L) < 80 年(657.44 L)(图 2c)。

图 2(b)为不同耕作年限下坡面土壤产沙率随时间变化趋势。不同耕作年限下, 其产沙率均表现先增大后减小趋势, 当达到最大值后减小。表 3 表明, 平均产沙率随耕作年限增加而呈增大趋势, 即对照(38.73 g/(min·m²)) < 46 年(72.96 g/(min·m²)) < 69 年(204.93 g/(min·m²)) < 80 年(248.81 g/(min·m²)), 耕作 80 年的平均产流率明显大于耕作 46 年($P < 0.05$), 而耕作 69 年的平均产流率明显大于耕作 46 年($P < 0.05$)。另外, 累计产沙量也随耕作年限的增大而增大, 即对照(1 239.29 g) < 46 年(2 334.65 g) < 69 年(6 557.85 g) < 80 年(7 961.85 g)(图 2d)。总体来说, 逆坡耕作下随着耕作年限的增加, 其产流率和产流量明显增大, 产沙率和产沙量也相应明显增大, 表明逆坡耕作下随着耕作强度增大, 坡面土壤侵蚀强度也随之增大。

2.2 不同坡度坡面产流产沙特征

在 5°, 10°, 15°径流小区内, 模拟坡耕地耕作 69 年(0.10 m 土层), 采用冲刷试验, 观测不同坡度下产流和产沙变化特征。由表 3 结果可知, 不同坡度坡面产流起始时间变化趋势为: 5°(40.60 min) > 10°(33.08 min) >

15°(21.73 min),表明耕作 69 年后,坡度越大开始产流时间越短,即产流越快。由图 3a 可知,3 种坡度产流均出现先急剧增大,随后逐步趋于稳定状态,而坡面单宽产流量趋于稳定为 1 000 cm³/min,即接近于冲刷流量,说明入渗趋于饱和,属于超渗产流。而不同坡度的平均产

流率总体表现出随坡度增大而增加的趋势,5°产流率明显小于 15°($P<0.05$),而 5°与 10°没有明显差异($P>0.05$);累计产流量也表现出随坡度增大而增大趋势,即 5°(475.28 L)<10°(521.17 L)<15°(563.21 L)(表 3)。表明随着坡度增大,产流率和产流量相应增大。

表 2 不同耕作强度下坡面产流率和产沙率变化

耕作 年限/a	开始产流 时间/min	平均产沙率/ (g·min ⁻¹ ·m ⁻²)	平均产流率/ (L·min ⁻¹)	累计 产沙量/g	累计 产流量/L
80	22.47	248.81±70.16a	20.55±5.13a	7961.85	657.44
69	33.08	204.93±83.20a	16.29±4.43b	6557.85	521.17
46	38.53	72.96±26.18b	12.29±4.16c	2334.65	393.25
对照	14.83	38.73±19.26b	10.66±3.08c	1239.29	340.99

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示不同耕作年限的产沙率存在显著差异($P<0.05$);相同小写字母表示不同耕作年限的平均产流率无显著差异($P>0.05$)。下同。

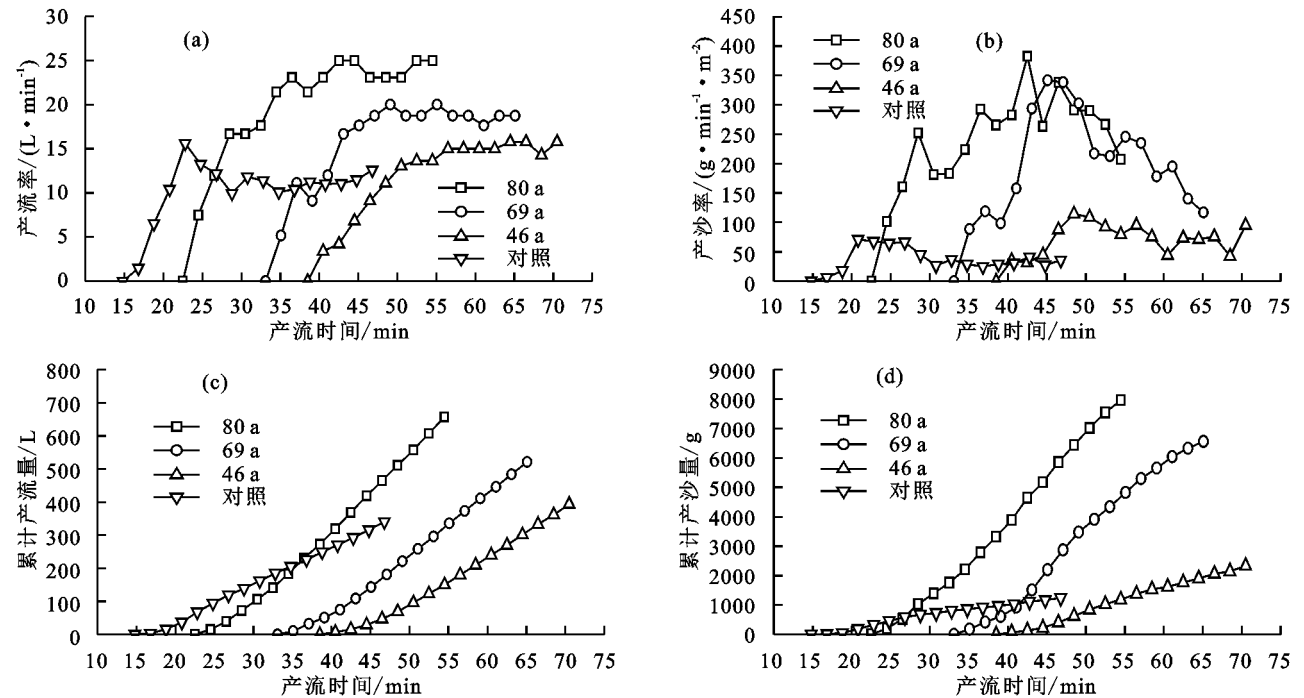


图 2 不同耕作年限坡面产流和产沙变化

图 3b 为不同坡度下坡面土壤产沙率随时间变化趋势。由图 3(b)可知,不同坡度下,其产沙率均表现先增大后减小趋势,10°和 15°产沙率最大值分别为 341.58, 351.70 g/(min·m²),均比 5°产沙率最大值 139.34 g/(min·m²)大。表 3 显示平均产沙率随坡度增大而增大,即 5°(84.80 g/(min·m²))<10°(204.93 g/(min·m²))<15°(244.61 g/(min·m²)),5°的平均产沙率明显小于 10°和 15°($P<0.05$),而 10°与 15°没有明显差异($P>0.05$)。在试验坡度范围,累计产沙量也表现出随坡度增加而增大趋势,即 5°(2 713.69 g)<10°(6 557.89 g)<15°(7 827.49 g)(图 3d,表 3)。总之,逆坡耕作 69 年后,在测定坡度范围,坡度增加明显增大了坡面径流量,同时也增大了坡面产沙率和产沙量,说明相同逆坡耕作强度下坡度的增加会加剧坡面水蚀。

2.3 坡面产沙率与产流率关系

已有研究^[16]表明,坡面产沙率和产流率之间存在一定相关关系,并且这种相关关系可以判定坡面土壤可蚀性。由表 4 可知,在 10°坡面上,耕作 80,69,46 年的产流率和产沙率之间均存明显指数函数关系($P<0.05$),并且 R^2 随耕作强度增强而增加,即拟合度随之增加。说明耕作强度越大,产沙率随产流率指数增长越剧烈,即耕作侵蚀越强,产流对土壤产沙作用越明显。

5°小区坡面产沙率随产流率增加而增大,呈显著的指数相关关系($P<0.01$): $Y=7.58e^{0.15X}$;10°小区的坡面产沙率也随产流率增大而增大,呈现显著的指数函数相关关系($P<0.05$): $Y=60.39e^{0.07X}$ 。但是,15°小区坡面产沙率随产流率无明显的函数变化关系。表明对于逆坡耕作 69 年土层坡面来说,缓坡坡面的产沙率随产流率的增大而增大,并呈现一定函数关系,陡

坡坡面产沙率没有表现出随产流率的增大趋势,即坡度的增大弱化了产沙率与产流率的相关性。

表 3 不同坡度坡面产流率和产沙率变化

耕作 年限/a	坡度/ (°)	开始产流 时间/min	平均产沙率/ (g · min ⁻¹ · m ⁻²)	平均产流率/ (L · min ⁻¹)	累计 产沙量/g	累计 产流量/L
69	5	40.60	84.80±39.00a	16.85±4.00a	2713.69	475.28
	10	33.08	204.93±83.24b	16.29±4.43b	6557.89	521.17
	15	21.73	244.61±65.92b	17.60±4.37c	7827.49	563.21

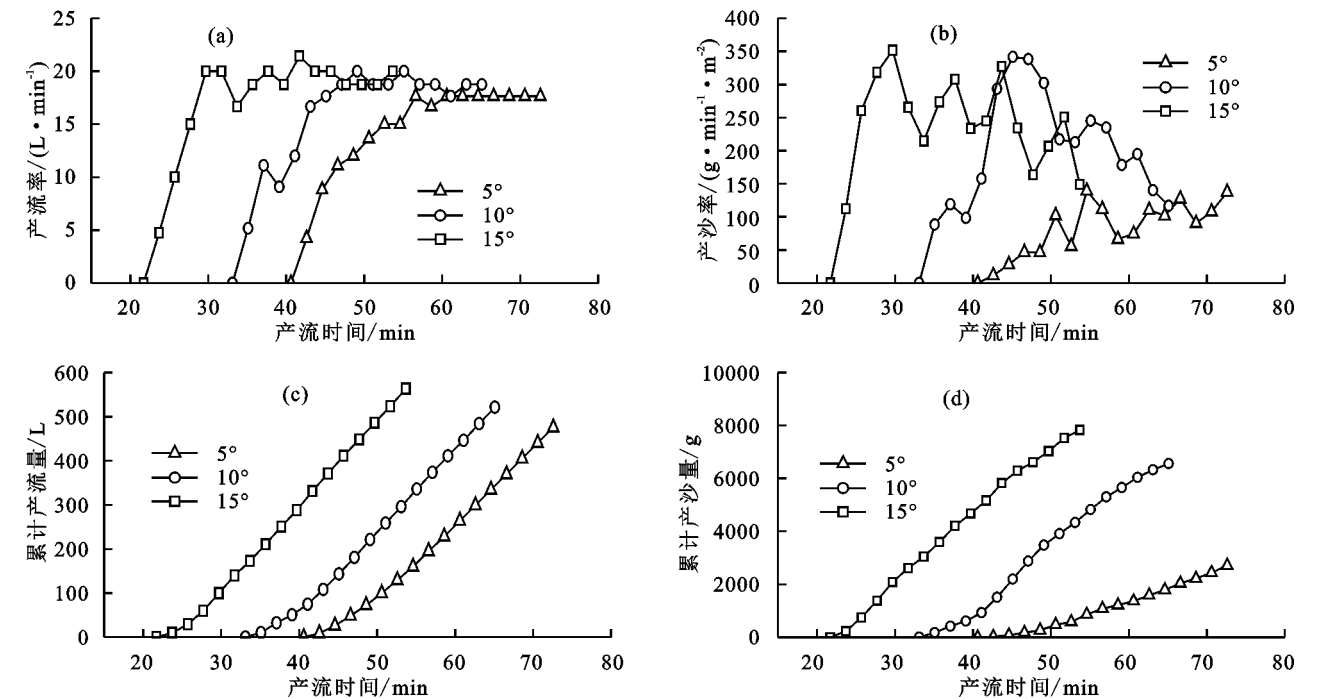


图 3 不同坡度坡面产流和产沙变化

表 4 坡面产流率和产沙率相关关系

坡度/ (°)	耕作 年限/a	函数 表达式	R ²	P
10	80	Y=77.95e ^{0.05 X}	0.73	<0.01
10	69	Y=60.39e ^{0.07 X}	0.51	<0.01
10	46	Y=33.79e ^{0.06 X}	0.33	<0.05
5	69	Y=7.58e ^{0.15 X}	0.82	<0.01
10	69	Y=60.39e ^{0.07 X}	0.51	<0.05
15	69	—	—	>0.05

注:X 为产流率(L/min);Y 为产沙率(g/(min · m²));n=14。

3 讨论

本研究表明,长期逆坡耕作导致下坡土层变薄,土层越薄,坡面产流越早,主要是由于下坡土层变薄减小了坡面水分入渗,加快了坡面径流的产生,耕作强度越强,产流越快。分析也发现,坡面产流产沙率和累计产沙量随耕作年限的增大而增大,强烈逆坡耕作导致的下坡土层变薄明显增大了坡面产流产沙,即长期逆坡耕作加速了坡面水蚀的作用。这主要是由 2 个方面原因造成的:一方面,长期的耕作扰动作用破坏了土壤的团聚体结构,降低了土壤有机质含量,从而增加了土壤的可蚀性^[17];另一方面,长期逆坡耕作导致下坡位置土层变薄,土壤蓄水能力降低。当降

雨发生时,更容易产生坡面径流,从而进一步加剧土壤侵蚀。已有研究^[12]表明,逆坡耕作不仅导致顺坡位移,也导致逆坡位移,在坡度 0~25°范围内,随坡度增大其土壤逆坡位移越小。在本试验中,10°坡面长期耕作导致土壤发生逆坡位移,下坡土层变薄。试验结果显示,当坡面流发生时,下坡土层变薄,会大大减小径流的入渗,在上坡来水量一定的情况下,会增大坡面径流。已有研究^[18-20]表明,坡面径流增大相应增大径流侵蚀力,最终增大坡面产沙率。因此,长期逆坡耕作通过减小下坡土层深度而增大坡面产流和径流侵蚀力,促进坡面产沙,加剧了坡面水蚀,这个结论与王勇等^[10]在紫色土坡耕地的研究结果一致,即顺坡耕作导致上坡土层变薄,促进坡面土壤侵蚀。说明坡耕地上无论顺坡耕作还是逆坡耕作,导致坡面土壤发生位移形成的坡面土层变薄,均会加剧坡面水蚀。

不同坡度产流产沙结果分析表明,坡度增大,相应减小了坡面开始产流时间,增大了坡面产流率和产流量,而产沙率和累计产沙量均明显表现出随坡度增大而增大的趋势。大量研究表明,坡度增大会增强坡面侵蚀力,降低土壤稳定性,从而增大土壤侵蚀量。在本试验坡度范围,坡度的增大显著增大了坡面产沙

率和累计产沙量,与已有的坡面研究^[21-23]结果一致,即在一定坡度范围内,土壤侵蚀产沙随坡度的增大而增大。已有研究^[24-25]表明,坡面侵蚀产沙与产流间呈现一定的线性相关关系。在10°坡面,随着耕作年限的降低,产流率和产沙率之间拟合关系的拟合度逐渐降低。长期逆坡耕作导致下坡土层较薄,入渗减少,产流增大,加大了携沙能力。下坡土层薄,导致汇入下坡的径流在下坡较少入渗,很快产生径流并形成侵蚀力而产沙,因此,逆坡耕作强度越强,在产流开始阶段径流的携沙能力越强。由不同坡度的产沙率和产流率关系发现,缓坡(5°和10°)的水沙均表现出指数增长关系,而陡坡(15°)则无相关关系,主要是由于坡度增大,加大了径流量和径流剪切力,初始产沙增大,随着细沟的发育,细沟两侧的土壤塌陷,改变了水沙关系。由于本试验是野外试验,受风力、水源等较多条件因素限制,还存在着一定的局限性,希望在以后的研究和试验中能得到改进。

4 结论

(1)由于逆坡耕作导致下坡土层变薄,减小下坡水分入渗,增大径流量。随着逆坡耕作强度的增加,坡面产流越快,产流率和产沙率也越大,累计产流量和产沙量也随之增大。

(2)在相同的逆坡耕作强度下,随坡度增加,坡面产流时间提前;产流率、产沙率、累计产流量和产沙量均随坡度增加而增大,即在试验坡度范围内,坡度的增大增强了逆坡耕作对坡面水蚀的加剧作用。

(3)随着逆坡耕作强度的增强,坡面水沙关系指数增长关系越明显;在5°和10°坡面,坡面水沙关系呈现良好的指数关系,在15°坡面则无明显的函数关系。表明逆坡耕作强度的增加强化了坡面产沙率随产流变化的相关关系,而坡度的增大弱化了产沙率与产流率的相关性。

参考文献:

- [1] 陈奇伯,王克勤,李艳梅,等.金沙江干热河谷不同类型植被改良土壤效应研究[J].水土保持学报,2003,17(2): 67-70.
- [2] Bouhlassa S, Bouhsane N. Assessment of areal water and tillage erosion using magnetic susceptibility: The approach and its application in Moroccan watershed [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26 (25): 25452-25466.
- [3] Zhang J H, Jia L Z, Zhang Z H, et al. Effect of the soil-implement contact area on soil translocation under hoeing tillage [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 42-50.
- [4] Zhao P Z, Li S, Wang E H, et al. Tillage erosion and its effect on spatial variations of soil organic carbon in

the black soil region of China [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 72-81.

- [5] Rejman J, Iglík I, Paluszek J, et al. Soil redistribution and crop productivity in loess areas (Lublin Upland, Poland) [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 143: 77-84.
- [6] Zhang J H, Lobb D A, Li Y, et al. Assessment of tillage translocation and tillage erosion by hoeing on the steep land in hilly areas of Sichuan, China [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75(2): 99-107.
- [7] Kosmas C, Gerontidis S, Marathanou M, et al. The effects of tillage displaced soil on soil properties and wheat biomass [J]. Soil and Tillage Research, 2001, 58 (1/2): 31-44.
- [8] Dupin B, De Rouw A, Phantavong K B, et al. Assessment of tillage erosion rates on steep slopes in northern Laos [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(1): 119-126.
- [9] Ziegler A D, Giambelluca T W, Sutherland R A, et al. Soil translocation by weeding on steep-slope swidden fields in northern Vietnam [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2): 219-233.
- [10] 王勇,张建辉,李富程.耕作侵蚀对坡耕地土壤水稳定性团聚体和水分特征的影响[J].水土保持学报,2015, 29(1): 180-185.
- [11] Zhang S L, Zhang X Y, Huffman T, et al. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 89(3): 427-438.
- [12] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H, et al. Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape [J]. Science of the Total Environment, 2016, 551: 522-532.
- [13] Zhang J H, Li F C. Soil redistribution and organic carbon accumulation under long-term (29 years) upslope tillage systems [J]. Soil Use and Management, 2013, 29(3): 365-373.
- [14] 贾立志.横断山区耕作侵蚀强度分级及主要影响因子临界值确定[D].北京:中国科学院,2017.
- [15] Shekunov B Y, Chattopadhyay P, Tong H H Y, et al. Particle size analysis in pharmaceuticals: Principles, methods and applications [J]. Pharmaceutical Research, 2007, 24(2): 203-227.
- [16] Huang C, Wells L K, Norton L D. Sediment transport capacity and erosion processes: Model concepts and reality [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(6): 503-516.
- [17] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H. Influences of intensive tillage on water-stable aggregate distribution on a steep hillslope [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 151: 82-92.
- [18] 陈浩.降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[J].水土保持学报,1992,6(2): 17-23.

[7] 陈秋会,席运官,王磊,等.太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1550-1558.

[8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.

[9] Maryam R, Sina F, Zahra L, et al. The effect of organic manure and chemical fertilizer on essential oil, chemical compositions and antioxidant activity of dill (*Anethumgraveolens*) in sole and intercropped with soybean (*Glycine max*) [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,199:18-26.

[10] 哈丽哈什·依巴提,张丽,陆强,等.猪粪堆肥与化肥不同配施方式对水稻产量和养分累积的影响[J].南京农业大学学报,2013,36(5):77-82.

[11] 浙江省统计局.《浙江省 2018 年统计年鉴》[Z].北京:中国统计出版社,2018.

[12] 陈红金.浙江省冬小麦籽粒和秸秆中氮磷钾养分含量变化[J].浙江农业科学,2015,56(9):1370-1372.

[13] 全国农业技术推广服务中心.中国有机肥料养分志[M].北京:中国农业出版社,1999.

[14] 杜加银,茹美,倪吾钟.减氮控磷钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J].植物营养与肥科学报,2013,19(3):523-533.

[15] 石丽红,纪雄辉,李洪顺,等.湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J].中国农业气象,2010,31(4):551-557.

[16] 刘琛,张莉,林义成,等.不同施肥模式下苕溪流域水稻田和蔬菜地氮磷流失规律[J].浙江农业学报,2019,31(2):297-306.

[17] 王桂苓,马友华,孙兴旺,等.巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J].水土保持学报,2010,24(2):6-10,29.

[18] 斯圆丽,朱少威,王季丰,等.施用包膜尿素对水稻生长和氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):48-53.

[19] 马晓焉,刘明,李忠佩.不同猪粪施用量下红壤水稻土表层水氮磷动态[J].土壤,2015,47(2):289-296.

[20] 郑小龙,吴家森,陈裴裴,等.不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):39-43,48.

[21] 吴俊,樊剑波,何园球,等.不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J].生态环境学报,2012,21(9):1561-1566.

[22] 王静,郭熙盛,王允青,等.保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1164-1171.

(上接第 13 页)

[16] 张素,熊东红,郑学用,等.干热河谷不同活跃程度冲沟沟床土体抗冲性差异[J].水土保持学报,2015,29(3):13-17.

[17] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.

[18] Patheniades E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. Journal of the Hydraulics Division,1965,9(1):48-53.

[19] Elliot W J, Laflen J M. A Process-based RILL erosion model[J].Transactions of the ASAE,1988,136(1):65-72.

[20] 肖海兵.黄土高原侵蚀与植被恢复驱动下土壤有机碳矿化与固定特征及其微生物作用机制[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2019.

[21] 王义霞.黄土丘陵区水力侵蚀和植被恢复对土壤有机碳输移及分布的影响[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2018.

[22] 刘雷,安韶山,黄华伟.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2013,33(20):6670-6680.

[23] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999,14(4):345-350.

[24] 王彬.东北典型薄层黑土区土壤可蚀性关键因子分析与土壤可蚀性计算[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.

[25] 柴军瑞,崔中兴.渗流对土体抗剪强度的影响[J].岩土工程技术,2001,12(1):12-13.

(上接第 19 页)

[19] 郑粉莉,高学田.坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程[J].土壤学报,2004,41(1):134-139.

[20] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes [J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(1):4-11.

[21] Fu X T, Zhang L P, Wang Y. Effect of slope length and rainfall intensity on runoff and erosion conversion from laboratory to field [J]. Water Resources,2019,46(4):530-541.

[22] Perreault L M, Yager E M, Aalto R. Effects of gradient, distance, curvature and aspect on steep burned and unburned hillslope soil erosion and deposition [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2017,42(7):1033-1048.

[23] Fang H Y, Sun L Y, Tang Z H. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: An experimental study using two loess soils [J]. Hydrological Processes,2015,29(11):2649-2658.

[24] 丁文峰,李勉,姚文艺,等.坡沟侵蚀产沙关系的模拟试验研究[J].土壤学报,2008,45(1):32-39.

[25] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄土丘陵沟壑区多尺度地貌单元输沙能力及水沙关系[J].农业工程学报,2015,31(24):120-126.