

耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响

周怡雯¹, 戴翠婷¹, 刘窑军², 王天巍¹, 邓俊¹, 李朝霞¹, 胡宇潇³

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029; 3. 秭归县水土保持试验站, 湖北 秭归 443600)

摘要: 选择典型南方红壤区平均坡度为 10° 的坡耕地小区进行天然降雨观测, 对横坡耕作、顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱、稻草覆盖 4 种耕作措施在侵蚀过程中的径流泥沙和养分流失特征进行研究。结果表明, 监测期间, 径流深和泥沙流失量基本随雨强的增大而增加。随着耕作措施由顺坡耕作向顺坡耕作+植物篱、横坡耕作、稻草覆盖的转换, 减流效益、减氮效益和减磷效益依次增大。稻草覆盖措施减流效益最佳, 为 91.77%; 横坡耕作措施减沙效益最佳, 为 98.91%; 稻草覆盖、横坡耕作和植物篱 3 种措施在防治高强度降雨引发的土壤侵蚀和养分流失具有较高的效益。耕作措施对泥沙粒径分布有影响。与顺坡耕作、横坡耕作相比, 植物篱和稻草覆盖措施能够更有效地拦截径流中的粗颗粒。该研究可为南方红壤丘陵区坡耕地选择合适的耕作措施和防治农业非点源污染提供依据。

关键词: 坡耕地; 耕作措施; 产流产沙; 氮、磷流失; 泥沙粒径分布

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0049-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.008

Effects of Cultivation Measures and Rainfall Intensities on the Slope Erosion in Red Soil Sloping Cropland

ZHOU Yiwen¹, DAI Cuiting¹, LIU Yaojun², WANG Tianwei¹, DENG Jun¹, LI Zhaoxia¹, HU Yuxiao³

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029;

3. The Experiment Station of Soil and Water Conservation of Zigui Country, Zigui, Hubei 443600)

Abstract: The natural rainfall was observed in the runoff plots with 10° slope in red soil region. Five treatments: bare land as control (CK), down slope tillage (DT), hedgerows with down slope tillage (DT+HG), contour ridge tillage (CT) and straw mulch (SM) were designed. The effects of cultivation measures and rainfall intensities on runoff depth, sediment yield and nutrient losses were evaluated. The results showed that the runoff depth and sediment loss were increased with the increasing rainfall intensities during the rainfall events. With the cultivation measures changed from DT to DT+HG, CT and SM, the effectiveness of the cultivation measures on reducing runoff, nitrogen and phosphorus was increased respectively. The average annual runoff reduction (91.77%) of SM was the highest. But the sediment reduction (98.91%) of DT was the highest. The SM, CT and DT+CT measures were effective in preventing soil erosion and nutrient loss caused by the heavy rainfall. Cultivation measures influenced the sediment size distribution. The DT+HG and SM treatments were more effective on trapping coarser particles compared with DT and CT treatments. This study was helpful for selecting the suitable cultivation measures and provided data support for the protection and regulation of soil and water losses and non-point pollution in sloping cropland.

Keywords: sloping cropland; cultivation measures; runoff and sediments; nitrogen and phosphorus losses; sediment size distribution

我国南方红壤地区总面积 $2.03 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1], 红壤坡地是长江中下游地区主要的土地资源之一。但由于不合理的开发利用和区域独特的自然地理环境, 致使该区水土流失面积达 60 余万 km^2 , 其水土流失

范围、严重程度仅次于黄土高原^[1]。丰沛的降雨、起伏的地形及不合理的耕作措施加剧了水土流失, 造成土壤质量退化, 土地生产力下降, 且氮、磷等土壤养分随径流进入各种水体, 加速地表水体富营养化和地下

水污染^[2],造成严重的面源污染问题。

草篱、秸秆覆盖等保护型耕作措施通过增加地表覆盖、增加降雨入渗,可有效减流减沙^[3],在保护坡地水土的同时改良土壤养分,可以有效减少红壤坡耕地土壤侵蚀量 85%以上,土壤有机质含量增幅为 9%~13%^[4],在国内外应用广泛。顺坡耕作和横坡耕作是常见的垄作方式,郑粉莉等^[5]研究表明,横坡垄作在小雨强下可能具有较强的防止侵蚀的效应,但在降雨强度较大时,可能会因为断垄出现严重的细沟侵蚀。对水土流失产生影响的自然因素有地形条件、土壤性质和降雨特征等^[2,5-6]。充沛的降雨产生的较大坡面径流是侵蚀发生和发展的主要动力^[7],由其导致的土壤和养分的流失已引起国内外学者的关注。Ma 等^[2]研究表明,降雨强度、次降雨量、降雨历时和降雨动能等降雨特征是与坡面侵蚀特性紧密相关的因子,雨强是造成水土流失的重要因子。

已有研究多集中于对坡耕地径流泥沙和养分的单项研究,利用野外天然降雨观测,系统地进行降雨条件和耕作措施对坡耕地产流产沙、养分流失以及侵蚀泥沙颗粒组成的研究较少。本研究通过对南方红壤区不同耕作措施下的标准径流小区,进行自然降雨条件下的原位监测,研究径流量、泥沙流失量及其携带的氮磷养分之间的相互关系,阐明氮磷养分流失对降雨特征、水土流失和不同耕作措施的响应特征,以期为南方红壤坡耕地选择合适的耕作措施及水土流失治理和开发利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本研究试验点设在江西省德安县燕沟小流域内

表 1 试验小区设计

处理	小区序号	小区处理措施
裸露对照	CK	翻耕不起垄
顺坡耕作	DT	顺坡翻耕起垄,垅宽 70 cm,高 30 cm,下同
顺坡+植物篱	DT+HR	顺坡翻耕起垄,从坡底开始每隔 5 m 沿等高线种 2 行宽 30 cm 的草篱
横坡耕作	CT	沿等高线翻耕起垄
稻草覆盖	SM	播种后,在耕地表层覆盖秸秆

试验前,于 2016 年 5 月 4 日参照当地花生旱坡地氮肥标准施以尿素 300 kg/hm²(约合总氮 140 kg/hm²)、过磷酸钙 600 kg/hm²(以 P₂O₅ 计,约合 84 kg/hm²),施肥后开展逐场次自然降雨条件下的试验观测。试验前和试验中未进行人工灌溉。2016 年整个花生生育期 5—9 月,共有 16 场产流自然降雨,在出现产流的每场降雨后观测各径流小区径流泥沙,并采集养分样品。

1.3 样品采集与测定

本研究对 2016 年全年降雨按照气象部门标准《GB/T 28592—2012 降水量等级》进行划分及筛选。

的水土保持生态科技园(29°16′37″—29°17′40″N, 115°42′08″—115°43′06″E),属亚热带季风区,多年平均降水量 1 537 mm,年蒸发量 1 100~1 200 mm;其中 70%的降雨集中在 5—9 月。地貌为浅丘岗地,海拔 30~100 m,坡度 5°~25°;地带性植被为亚热带常绿阔叶林。多年平均气温 16.7 ℃,年日照时间 1 650~2 100 h,多年平均无霜期为 249 天。成土母质以第四纪红色黏土为主,土壤质地较黏重,肥力中等。燕沟小流域位于我国红壤的中心区域,地形、土壤条件在江西省和南方红壤丘陵区均具有典型性和代表性。

试验区土壤 pH 6.67,土壤有机质含量 8.64 g/kg,全氮含量 0.55 g/kg,全磷含量 0.31 g/kg,全钾含量 15.87 g/kg,≥0.1~2,≥0.05~0.1,≥0.01~0.05,≥0.002~0.01,<0.002 mm 粒径的土壤质量分数分别为 7.79%,10.55%,41.80%,23.80%,16.06%。土壤质地为:沙粒 9.51%,粉粒 61.16%,黏粒 29.32%。

1.2 试验设计

试验设计裸地(CK)、顺坡耕作(DT)、顺坡耕作+植物篱(DT+HR)、横坡耕作(CT)、稻草覆盖(SM) 5 种处理,3 次重复,随机排列。3 次重复得到的数据取平均值。在土层厚度均匀、土壤理化特性较一致、坡度较均一的同一坡面上,布设 15 个坡度为 10°的标准径流小区,每个小区水平宽度为 5 m,水平投影长为 20 m,小区四周均设有厚 12 cm 的围埂,围埂高出地表 20 cm,埋深 30 cm,用黏土红砖块砌成,小区下方设有矩形集水槽及圆形集流桶,以承接小区径流泥沙。试验处理见表 1。

(中雨:24 h 降雨量 10~24.9 mm;大雨:24 h 降雨量 25~49.9 mm;暴雨:24 h 降雨量 50~99.9 mm。)从中筛选出有产流的有效降雨 16 场,其中中雨 8 场,大雨 2 场,暴雨 6 场。在 3 种不同雨型的降雨中各选出 1 场典型降雨,进行养分分析。3 场降雨的基本情况见表 2。

表 2 降雨基本情况

降雨时间	降雨等级	降雨量/mm	I ₃₀ /mm
5 月 25—26 日	中雨	14.8	15.7
8 月 3 日	大雨	41.9	25.4
6 月 15 日	暴雨	77.5	60.2

径流量根据集流桶标尺刻度记录计算,土壤侵蚀

量采用烘干法测定含沙水样计算。用塑料瓶在集流桶中采集 1 瓶 500 mL 左右水样,添加 0.4 mL 浓硫酸放在 4 ℃ 样品柜冷藏保存,用于径流中养分的测定。采集流桶底泥沙 200 g 左右用于泥沙中养分的测定。

参照《土壤农业化学分析方法》^[8]测定径流、泥沙中氮、磷养分含量。为测定径流中不同形态氮和磷含量,首先将水样过 0.45 μm 醋酸纤维微孔滤膜,去除泥沙等颗粒物后,采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定可溶性氮即径流中总氮(mg/L),采用钼酸铵分光光度法测定可溶性磷即径流中的总磷(mg/L)。采集的泥沙风干后用于测定泥沙中的氮和磷含量;采用硫酸—高氯酸消化—水杨酸钠比色法测定全氮即泥沙中总氮(g/kg),采用硫酸—高氯酸消化—钼锑抗比色法测定总磷(g/kg)。采用湿筛法测定>0.25 mm 团粒含量,采用吸管法测定直径<0.05 mm 的组分含量。

1.4 数据处理

本试验所有数据均用 SPSS 21.0 软件进行方差分析,采用 Origin Pro 2016 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 产流产沙特征

不同耕作措施小区在不同雨型条件下的产流产沙变化见表 3。由表 3 可知,不同雨型条件下,4 种耕作措施坡面径流量均小于对照裸地小区,减流效益明显。不同耕作措施年均径流深从顺坡耕作到顺坡耕作+植物篱、横坡耕作、稻草覆盖依次减小。不同耕作措施小区在不同雨型下,径流深变化趋势均为随雨量的增大而增大。与对照裸地相比,顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱、横坡耕作、稻草覆盖的减流效益分别为 38.90%,76.91%,90.97%和 91.77%。其中,稻草覆盖小区的减流效益最好。

与产流规律相似,坡耕地不同耕作措施流失的泥沙量从大到小依次为对照裸地、顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱、稻草覆盖和横坡耕作。不同耕作措施在不同雨型下的流失泥沙量变化趋势明显,均随雨量的增大而增大。与对照裸地相比,顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱、横坡耕作、稻草覆盖的减沙效益分别为 33.49%,85.23%,98.91%,96.74%。

表 3 不同耕作措施小区不同雨型下产流产沙量

不同耕作措施	中雨		大雨		暴雨		年平均值	
	径流深/	流失	径流深/	流失	径流深/	流失	径流深/	流失
	mm	泥沙量/kg	mm	泥沙量/kg	mm	泥沙量/kg	mm	泥沙量/kg
CK	0.25	0.75	6.37	94.87	9.32	1131.85	5.31	409.16
DT	0.16	0.67	0.83	17.04	8.75	798.64	3.25	272.12
DT+HR	0.16	0.53	0.16	4.16	3.36	176.58	1.23	60.42
CT	0.20	0.30	0.50	2.34	0.74	10.77	0.48	4.47
SM	0.13	0.17	0.34	0.87	0.84	38.96	0.44	13.33

综合分析不同耕作措施间的径流深与泥沙流失量可以看出,在中雨条件下,顺坡耕作小区和顺坡耕作+植物篱小区的径流深和流失泥沙量基本一致,但随着雨量的增加,在大雨和暴雨条件下,顺坡耕作小区的径流深和流失泥沙量大于顺坡耕作+植物篱小区。植物篱可以拦截降雨,减小雨滴动能,减弱雨滴侵蚀强度,同时增加入渗,减少坡面径流,降低水流流速,从而能够减弱径流的挟沙能力,达到减沙的效果。在中雨条件下,横坡耕作小区和稻草覆盖小区的径流深和流失泥沙量较为接近,但随着雨量的增大,稻草覆盖小区径流深和流失泥沙量比横坡耕作小区削减明显。稻草覆盖能够阻截部分降雨能量,阻止雨滴直接打击土壤表面,同时稻草覆盖还可以有效增加地表糙度,促进地表径流的入渗,从而达到减流减沙的效果^[9]。

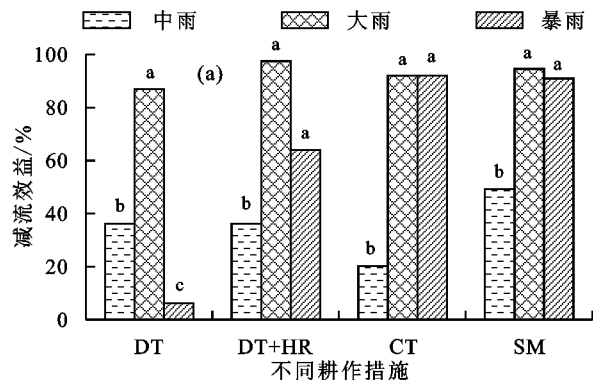
由图 1a 可以看出,3 场降雨事件中,以顺坡耕作+植物篱措施在大雨条件下的减流效益最好,高达 97.49%。不同耕作措施小区均以大雨条件时减流效益最大。与对照裸地相比,在暴雨条件下,顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱、稻草覆盖、横坡耕作小区的减流

效益逐渐增大。而在中雨条件下,稻草覆盖小区减流效益最好,为 49.28%,顺坡耕作小区的减流效益最差,仅为 20%。

由图 1b 可以看出,3 场降雨事件中,以顺坡耕作+植物篱措施在大雨条件下的减流效益最好,高达 97.49%。在中雨和大雨条件下,顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱、横坡耕作、稻草覆盖小区的减沙效益逐渐增大。特别是在大雨条件下时,顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱、横坡耕作、稻草覆盖小区的减沙效益均在 80%以上。而在暴雨条件下,以横坡耕作小区的减沙效益为最佳,可达 98.91%。

2.2 养分流失特征

由图 2a 可以看出,3 场降雨不同耕作措施总氮流失量均值依次为稻草覆盖<横坡耕作<顺坡耕作+植物篱<顺坡耕作<裸露对照。从流失的养分的类别上看,泥沙携带的全氮流失量明显大于径流携带的全氮流失量。与裸露对照相比,稻草覆盖、横坡耕作、顺坡耕作+植物篱和顺坡耕作对总氮的削减效益分别为 99.28%,97.95%,83.54%和 36.14%。



注:图中不同字母表示各处理在 5%水平上差异显著。下同。

图 1 不同耕作措施减流减沙效益

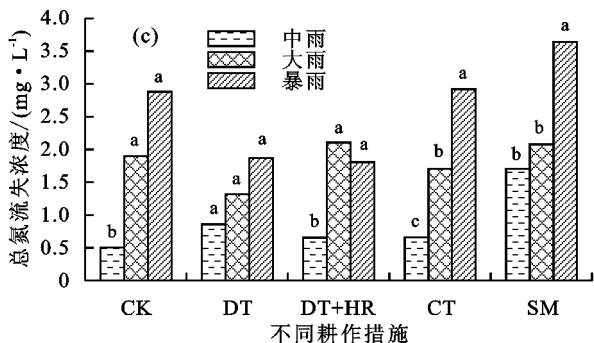
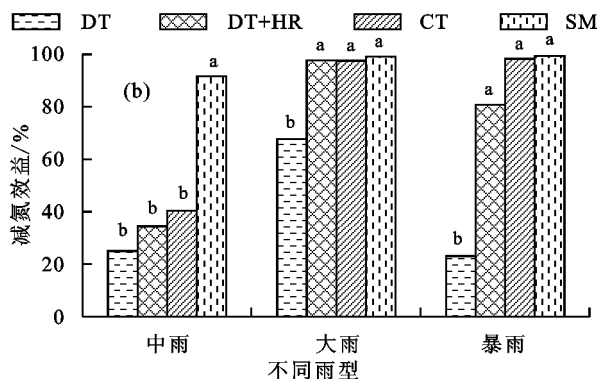
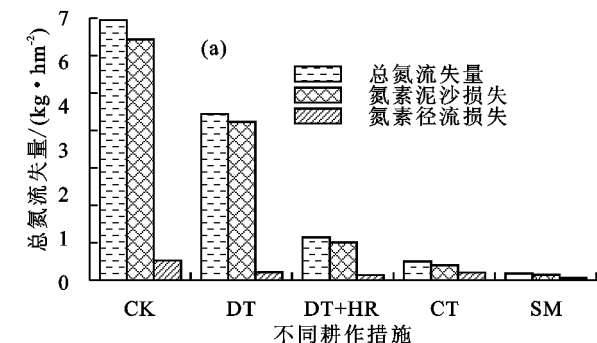
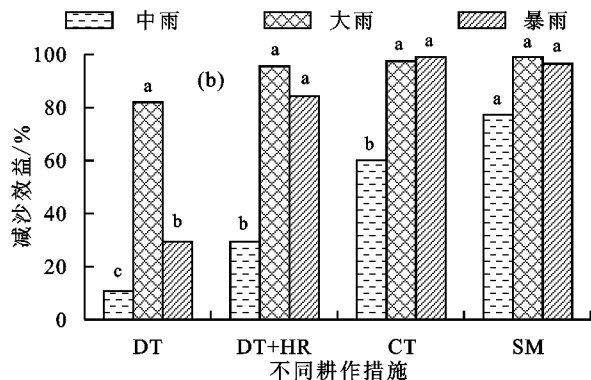


图 2 不同耕作措施总氮流失特征

由图 2b 可知,与裸露对照小区相比,各种耕作措施均有明显的减氮效益。3 场降雨不同耕作措施的减氮效益依次为中雨<暴雨<大雨。在中雨条件下,稻草覆盖小区的减氮效益最好,减氮效益高达 91.59%,横坡耕作、顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱的减氮效益为 24.99%~34.44%。在大雨条件下,各耕作措施的减氮效益显著,其中稻草覆盖小区的减氮效益最好,高达 99.10%。在暴雨条件下,顺坡耕作+植物篱、横坡耕作、

稻草覆盖 3 种措施减氮效益较好,顺坡耕作的减氮效益最差,仅为 23.01%。3 种雨型下,顺坡耕作+植物篱小区的减氮效益均比顺坡耕作小区明显。

不同耕作措施小区总氮流失浓度规律较为明显。除顺坡耕作+植物篱小区外,其他耕作措施小区的全氮流失浓度均随着降雨量的增大而增大(图 2c)。所有小区中稻草覆盖小区流失的总氮浓度最高,在暴雨条件下可达 3.64 mg/L。

从图 3a 可以看出,与总氮流失量相似,3 场降雨不同耕作措施总磷流失量均值依次为稻草覆盖<横坡耕作<顺坡耕作+植物篱<顺坡耕作<裸露对照。与裸露对照相比,稻草覆盖、横坡耕作、顺坡耕作+植物篱和顺坡耕作对总磷的削减效益分别为 99.95%、98.70%、79.57%和 28.10%。泥沙结合态磷的流失占总磷流失量的 96.67%~99.36%,表明坡耕地磷的流失主要以泥沙结合态的形式流失。对照表 3 可以看出,顺坡耕作小区流失泥沙量较大,因此顺坡耕作小区总磷流失量较高。

从图 3b 可以看出,3 场降雨不同耕作措施的减磷效益从小到大依次为中雨<大雨<暴雨。其原因是磷素主要随泥沙迁移,侵蚀泥沙的量越大,导致总磷流失越大。水土保持耕作措施具有一定的承载限度,在相应的承载范围内,其拦截磷素流失的效益随着雨强的增大而提高。本研究表明,横坡耕作、稻草覆盖小区在暴雨条件下减磷效益最好,而顺坡耕作、顺坡耕作+植物篱小区在大雨条件下减磷效益最好。

从图 3c 可以看出,不同耕作措施小区流失的总磷浓度不明显。横坡耕作、稻草覆盖小区的总磷流失浓度较低,尤其是横坡耕作小区,3 场降雨的总磷流失浓度最小为 0.03 mg/L,最大仅为 0.22 mg/L。总磷流失比较明显的小区主要是顺坡耕作小区,在暴雨条件下总磷流失浓度最大。

综上,坡耕地氮、磷养分随地表径流和侵蚀泥沙流失,氮、磷流失量与侵蚀泥沙量和径流量成正相关性。通过比较径流、泥沙和养分的流失量可以得到,56%的全氮和 95%的全磷以侵蚀泥沙的形式流失,

这表明侵蚀泥沙是养分流失的主要载体^[10-11]。

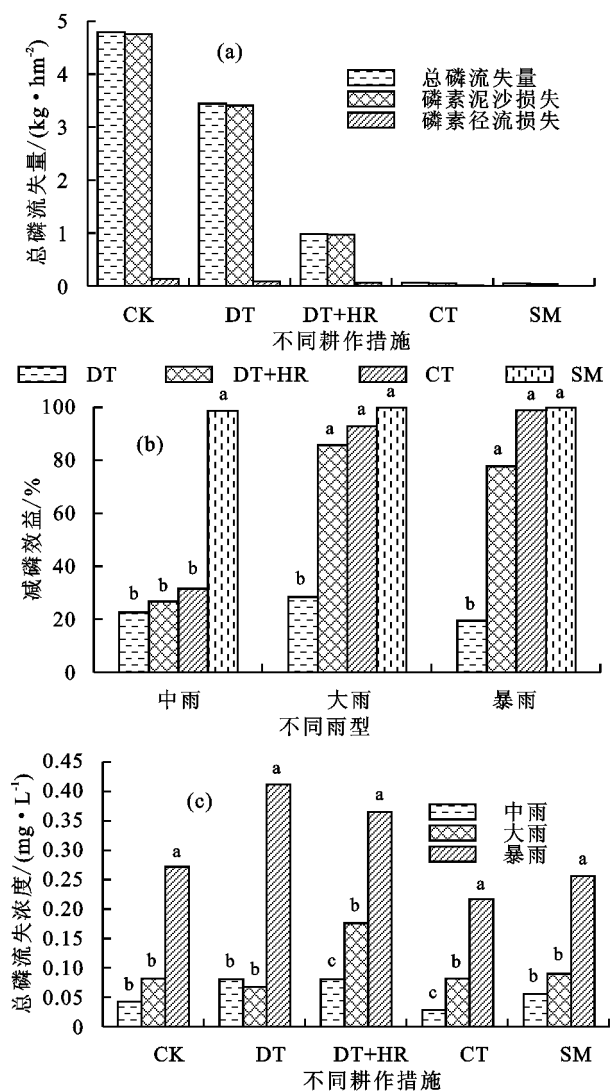


图3 不同耕作措施总磷流失特征

2.3 侵蚀泥沙颗粒分布特征

由上述结果可知,泥沙是养分流失的主要载体。进一步研究不同耕作措施在减少泥沙和养分流失方面的效益,对侵蚀泥沙的颗粒组成进行分析。3场降雨的侵蚀泥沙颗粒组成较为相似,选择6月15日的降雨事件进行分析。将泥沙颗粒分为5个粒径:黏粒($<0.002 \text{ mm}$)、细粉粒($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$)、粗粉粒($0.02 \sim 0.05 \text{ mm}$)、细砂

($0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$)和粗砂($>0.25 \text{ mm}$),以此来表示坡面径流侵蚀和泥沙输移过程中不同泥沙颗粒的变化情况。

各种耕作措施下,侵蚀泥沙分散前,黏粒($<0.002 \text{ mm}$)的平均含量为6%,而原土中黏粒($<0.002 \text{ mm}$)平均含量为16%。即未分散的侵蚀泥沙中黏粒($<0.002 \text{ mm}$)的颗粒含量比原地表土壤含量低,表明大多数侵蚀泥沙黏粒是以团聚体形式存在的,这与 Shi 等^[12-13]的研究结论相似。

由图4可以看出,不同耕作措施对土壤侵蚀泥沙的颗粒粒径分布状况有影响。裸露对照小区中,56%以上的侵蚀泥沙颗粒直径 $>0.05 \text{ mm}$,这与前人^[14]的研究一致,即当径流的输送能力小于泥沙负荷时,较大的团聚体和较小的颗粒更容易发生沉积。本次降雨为暴雨,雨强越大,动能越大,裸露对照小区产生的径流流速足以搬运较大的泥沙颗粒,从而导致侵蚀泥沙中砂粒(包括细砂粒和粗砂粒)的含量较大。与裸地相比,其他耕作措施小区产生的泥沙中,粒径 $>0.05 \text{ mm}$ 的颗粒较少。在顺坡耕作+植物篱小区、横坡耕作小区和稻草覆盖小区,分别有27%,49%和30%的侵蚀泥沙是以直径 $>0.05 \text{ mm}$ 的颗粒迁移的。粗糙的土壤表面和较高的作物覆盖度降低了径流的输送能力,导致许多粗颗粒沉积在小区内,而细颗粒随着径流搬运流失。Alberts 等^[15]的研究也表明,随着地表覆盖量的增加,侵蚀泥沙中粗颗粒的百分比减少。在横坡耕作小区,坡面上的垄沟可以减缓地表径流,甚至小雨的情况下可以全部拦蓄在垄沟内,因此粗颗粒在垄沟内发生沉积^[16-17]。当侵蚀程度超过垄沟的最大承载限度,其上部较大的泥沙颗粒会被径流搬运。顺坡耕作+植物篱小区和稻草覆盖小区产生侵蚀泥沙的粒径主要分布在 $0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$,其百分比含量分别为61%和68%,其中,以细粉粒($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$)居多。这与 Dai 等^[17]、Liu 等^[18]、于兴修等^[19]和张杰等^[20]的研究结论一致,即颗粒与团聚体中最易被侵蚀的粒径尺寸为 $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$ 。与横坡耕作小区和顺坡耕作小区相比,顺坡+植物篱小区和稻草覆盖小区可以更高效的拦截粗颗粒。

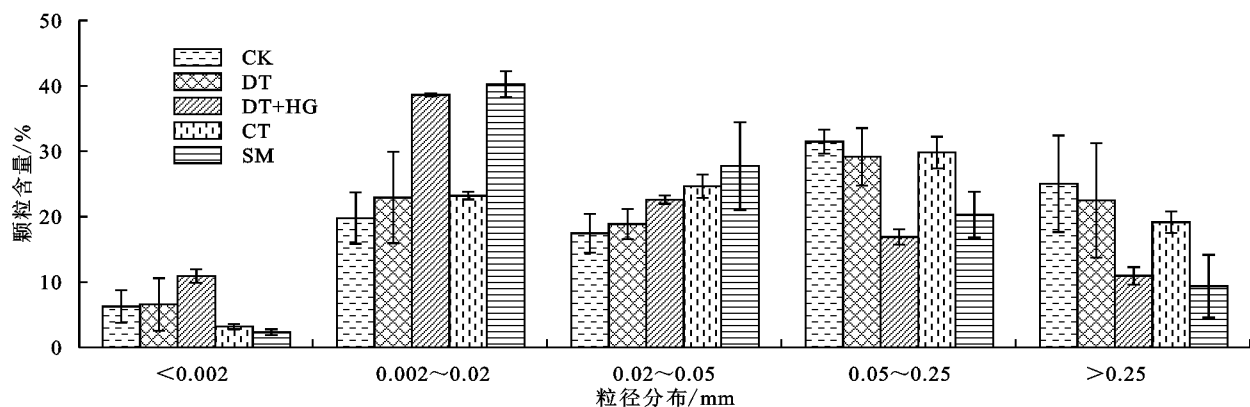


图4 不同耕作措施侵蚀泥沙粒径分布

3 结论

(1)各项耕作措施的年均减流效益依次为:裸露对照<顺坡耕作<顺坡耕作+植物篱<横坡耕作<稻草覆盖;减沙效益依次为:裸露对照<顺坡耕作<顺坡耕作+植物篱<横坡耕作<稻草覆盖。稻草覆盖小区减流效益最佳,为 91.77%。横坡耕作的减沙效益最好,为 98.91%。随着雨强的增大,不同耕作措施小区径流和泥沙的流失量也越来越大。

(2)3 场降雨各项耕作措施的减氮效益和减磷效益相似,均为:大雨<暴雨<中雨。各项耕作措施的减氮效益依次为:裸露对照<顺坡耕作<顺坡耕作+植物篱<横坡耕作<稻草覆盖。各项耕作措施的减磷效益依次为:裸露对照<顺坡耕作<顺坡耕作+植物篱<横坡耕作<稻草覆盖。稻草覆盖的减氮效益和减磷效益均为最佳,分别为 99.28%和 99.95%。

(3)耕作措施对侵蚀泥沙粒径分布起着重要作用。与顺坡耕作、横坡耕作相比,植物篱和稻草覆盖能够更加有效地拦截径流中直径较大的颗粒。稻草覆盖、横坡耕作和植物篱这 3 种措施在大雨强降雨引发的土壤侵蚀和养分流失有较高的效益。顺坡耕作在暴雨条件下容易发生土壤侵蚀和养分流失,在实际农业生产中建议配合植物篱措施进行布设。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2007.
- [2] Ma W, Li Z, Ding K, et al. Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation[J]. *Geomorphology*, 2014, 226: 217-225.
- [3] 蒲玉琳. 植物篱—农作模式控制坡耕地氮磷流失效应及综合生态效益评价[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [4] 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.
- [5] 郑粉莉, 边锋, 卢嘉, 等. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 90-97.
- [6] 边锋. 降雨和耕作措施对黑土区坡面土壤侵蚀过程的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [7] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与

泥沙径流流失量的定量关系[J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 465-473.

- [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] 彭旭东. 模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 624-634.
- [10] 黄丽, 张光远, 丁树文, 等. 侵蚀紫色土土壤颗粒流失的研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(1): 36-40.
- [11] 许峰, 蔡强国, 吴淑安. 坡地农林复合系统土壤养分过程研究进展[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(1): 82-87.
- [12] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455(3): 123-130.
- [13] Shi Z H, Yue B, Wang L, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(1): 257-267.
- [14] Mitchell J K, Mostaghimi S, Pond M C. Primary particle and aggregate size distribution of eroded soil from sequenced rainfall events [J]. *Transactions of the ASAE*, 1983, 26: 1773-1777.
- [15] Alberts E, Moldenhauer W. Nitrogen and phosphorus transported by eroded soil aggregates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(2): 391-396.
- [16] Liu H, Huang Q. Adoption and continued use of contour cultivation in the highlands of southwest China [J]. *Ecological Economics*, 2013, 91(2): 28-37.
- [17] Dai C T, Liu Y J, Wang T W, et al. Exploring optimal measures to reduce soil erosion and nutrient losses in southern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 210: 41-48.
- [18] Liu Y J, Yang J, Hu J M, et al. Characteristics of the surface-subsurface flow generation and sediment yield to the rainfall regime and land-cover by long-term in-situ observation in the red soil region, Southern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 457-467.
- [19] 于兴修, 马骞, 刘前进, 等. 不同覆被土壤结构稳定性对侵蚀泥沙氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 12-16.
- [20] 张杰, 陈晓安, 汤崇军, 等. 典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 165-173.