

红壤坡地新开发果园土壤有机碳迁移对不同管理措施的响应

常梦琦^{1,2,3}, 胡瑞¹, 徐佳文^{2,3}, 梁宽¹, 陈伏生¹, 肖胜生^{2,3}

(1.江西农业大学国家林业和草原局鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复实验室,南昌 330045;

2.江西省土壤侵蚀与防治重点实验室,南昌 330029;3.江西省水利科学院鄱阳湖流域生态水利技术创新中心,南昌 330029)

摘要:为探究在南方红壤区不同管理措施对于新开发果园土壤有机碳迁移的影响,以典型红壤坡地柑橘园(建园 2 年)为研究对象,监测评估自然降雨背景下清耕(CB)、稻草全覆盖(CS)、萝卜花生轮作(CRP)、三叶草条带覆盖(CCS)、三叶草全覆盖(CC)和苔藓覆盖(CT)6 种管理措施对开发初期果园水土流失和土壤有机碳迁移的影响。结果表明:(1)6 种管理措施 CB、CS、CRP、CCS、CC 和 CT 的径流量分别为 7.88, 4.45, 4.64, 3.24, 3.25, 4.70 m³,与 CB 相比,CS、CRP、CCS、CC 和 CT 措施下截流效益分别为 43.51%, 41.10%, 58.94%, 58.82%, 40.38%, 产沙量分别为 71.35, 21.27, 31.03, 14.24, 14.18, 35.05 kg, 产沙量与 CB 相比分别减少 70.18%, 56.51%, 80.04%, 80.13%, 50.87%;(2)泥沙有机碳流失强度分别为 CB(20.75 g/m²), CS(4.78 g/m²), CRP(8.68 g/m²), CCS(3.52 g/m²), CC(3.38 g/m²), CT(9.94 g/m²), 相比于对照组 CB 分别减少 76.94%, 58.16%, 83.01%, 83.71%, 52.11%;(3)泥沙有机碳和 DOC 流失强度均与径流量呈显著正相关关系(R^2 分别为 0.412 和 0.419)。地面管理措施主要通过调控地表径流的产生来影响红壤坡地新开发果园土壤有机碳的迁移。综合来看,三叶草条带覆盖和全覆盖在抑制土壤侵蚀和土壤有机碳迁移损失方面效果较明显。研究结果可为南方红壤区新开发果园水土流失和土壤有机碳迁移损失的防控提供科学依据。

关键词:自然降雨;土壤有机碳;选择性迁移;新开发果园;南方红壤区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)04-0124-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.017

Response of Soil Organic Carbon Migration to Different Management Measures in Newly Developed Orchards in Red Soil Slope

CHANG Mengqi^{1,2,3}, HU Rui¹, XU Jiawen^{2,3}, LIANG Kuan¹, CHEN Fusheng¹, XIAO Shengsheng^{2,3}

(1.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention and Control, Jiangxi Provincial Academy of Water Resources Sciences, Nanchang 330029; 3.Jiangxi Provincial Eco-hydraulic Technology Innovation Center of Poyang Lake Basin, Nanchang 330029)

Abstract: In order to explore the impacts of different management measures on soil organic carbon migration in newly developed *Citrus reticulata*-based orchards in southern red soil regions, the effects of six management measures on soil erosion and soil organic carbon migration in orchards under the background of natural rainfall were monitored and evaluated, including clear tillage (CB), straw mulch (CS), radish peanut rotation intercropping (CRP), *Trifolium* strip mulch (CCS), *Trifolium* mulch (CC) and Bryophyta mulch (CT) in the young *Citrus reticulata*-based orchards (two years old) located in red soil slope land. Our results showed that: (1) The runoff production of 6 management measures CB, CS, CRP, CCS, CC and CT were 7.88, 4.45, 4.64, 3.24, 3.25 and 4.70 m³, respectively. Compared with CB, the runoff reduction benefits under CS, CRP, CCS, CC and CT measures were 43.51%, 41.10%, 58.94%, 58.82% and 40.38%, respectively; the sediment production was 71.35, 21.27, 31.03, 14.24, 14.18 and 35.05 kg, and the sediment yield was reduced by 70.18%, 56.51%, 80.04%, 80.13% and 50.87%, respectively. (2) The loss intensity of sediment organic carbon was CB (20.75 g/m²), CS (4.78 g/m²), CRP (8.68 g/m²), CCS (3.52 g/m²), CC (3.38 g/m²) and CT (9.94 g/m²), respectively, which decreased by 76.94%, 58.16%, 83.01%, 83.71% and 52.11% compared with CB. (3) The loss intensity of sediment organic carbon and dissolved organic carbon

收稿日期:2023-01-01

资助项目:国家自然科学基金项目(41761063);江西省重点研发计划项目(20202BBGL73097);江西省自然科学基金项目(20212BAB203027)

第一作者:常梦琦(1998—),女,硕士研究生,主要从事森林培育与生态恢复研究。E-mail:changmengqi0327@163.com

通信作者:肖胜生(1981—),男,教授级高级工程师,主要从事水土保持碳汇研究。E-mail:xss19811213@163.com

was positively correlated with runoff production ($R^2=0.412$ and 0.419 , respectively). Surface management measures affected the migration of soil organic carbon in newly developed orchards in red soil slope mainly by regulating surface runoff generation. In conclusion, both the *Trifolium* strip mulch (CCS) and *Trifolium* mulch (CC) had obvious effects on inhibiting soil erosion and soil organic carbon migration loss. This study can provide a scientific basis for controlling soil erosion and soil organic carbon migration loss in newly developed orchards in red soil region of Southern China.

Keywords: natural rainfall; soil organic carbon; selective migration; orchard in early stage; red soil region

南方红壤区经济果木林的开发利用可以有效提高土地资源利用率,在促进区域经济发展和保障区域生态安全方面发挥重要作用。前期大量实践研究^[1]都已证实,果园建立对于南方红壤区经济效益提高和生态环境保护具有重要意义。然而,南方红壤区雨水充沛且土壤抗蚀性能较差,果园开发极易引起水土流失,特别是在初期阶段^[2]。在水力侵蚀作用下,大量土壤有机碳随地表径流发生迁移损失^[3]。这一方面加速土壤有机质在原地或在搬运与再分布过程中的矿化释放;另一方面,土壤团聚体崩解和破坏严重影响土壤有机碳的稳定性^[4]。考虑到土壤有机碳在维持全球碳素平衡和区域土壤地力方面的重要作用,有必要在南方红壤区新开发果园采取有效的管理措施防止土壤有机碳的侵蚀损失。

针对水土流失问题,前期已有研究^[5-7]证实,施行管理措施对于改善土壤性质的有效性。在温带地区研究^[5]发现,相比于对照处理,植被覆盖措施可以有效抵御雨水对土壤的侵蚀,因而发挥较好的减流、减沙效益;高泽超^[6]在南方红壤区研究发现,进行秸秆覆盖后,降雨造成的地表侵蚀量随着坡度的增大而增加;刘润等^[7]研究了喀斯特石漠化地区苔藓植物的生态效益,证实不同苔藓植物均可有效提高土壤酶活性、迅速改善土壤质量。虽然管理措施对土壤侵蚀的治理已经得到一定的关注,但目前针对同一区域的研究大多基于1种或少数几类管理措施,而跨区域的比较又很难排除气候、土壤以及植被等因子的干扰。这导致无法科学地比较不同管理措施对相同区域内土壤有机碳迁移损失的治理效果。因此,有必要在南方红壤区新开发果园囊括当前红壤坡地主流管理措施,并开展系统性对比研究,这将有助于针对该土壤类型提出较为高效的管理措施。此外,侵蚀背景下果园土壤物质迁移的研究^[8-9]大多是基于短历时室内模拟降雨条件进行的,而自然降雨条件下的野外原位定量监测相对少见^[10]。考虑到野外原位监测具有观测场次较多、涉及到不同雨型以及野外小区面积较大等原因,基于自然降雨背景的研究^[11-12]结果更能说明土壤有机碳侵蚀损失的真实性。

针对南方红壤区新开发果园土壤侵蚀严重,而当

前研究对该土地利用类型下土壤有机碳侵蚀损失的抑制效果缺乏系统性研究的问题,本研究利用江西水土保持生态科技园平台,以新开发柑橘园为例,在自然降雨条件下,对红壤坡地水土流失有较好治理作用的5种管理进行综合对比,明确何种土地管理措施可以最有效抑制新开发果园土壤有机碳迁移损失,旨在阐明南方红壤区果园开发过程中径流、泥沙流失和土壤有机碳迁移对不同管理措施的响应。研究结果为该区域经果林的水土保持生态建设及可持续管理提供科学依据,对未来南方红壤区果园碳汇功能的发挥具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省德安县江西水土保持生态科技园(115°42′38″—115°43′06″E, 29°16′37″—29°17′40″N)。该区域年平均气温16.7℃,年平均降水量1469mm,全年降雨量充足,主要集中在4—7月(期间降雨量占到年降雨总量的50%~60%)。园区内土壤为第四纪红黏土和泥质岩类风化的典型红壤,土壤侵蚀严重,土壤肥力衰退。

1.2 试验设计

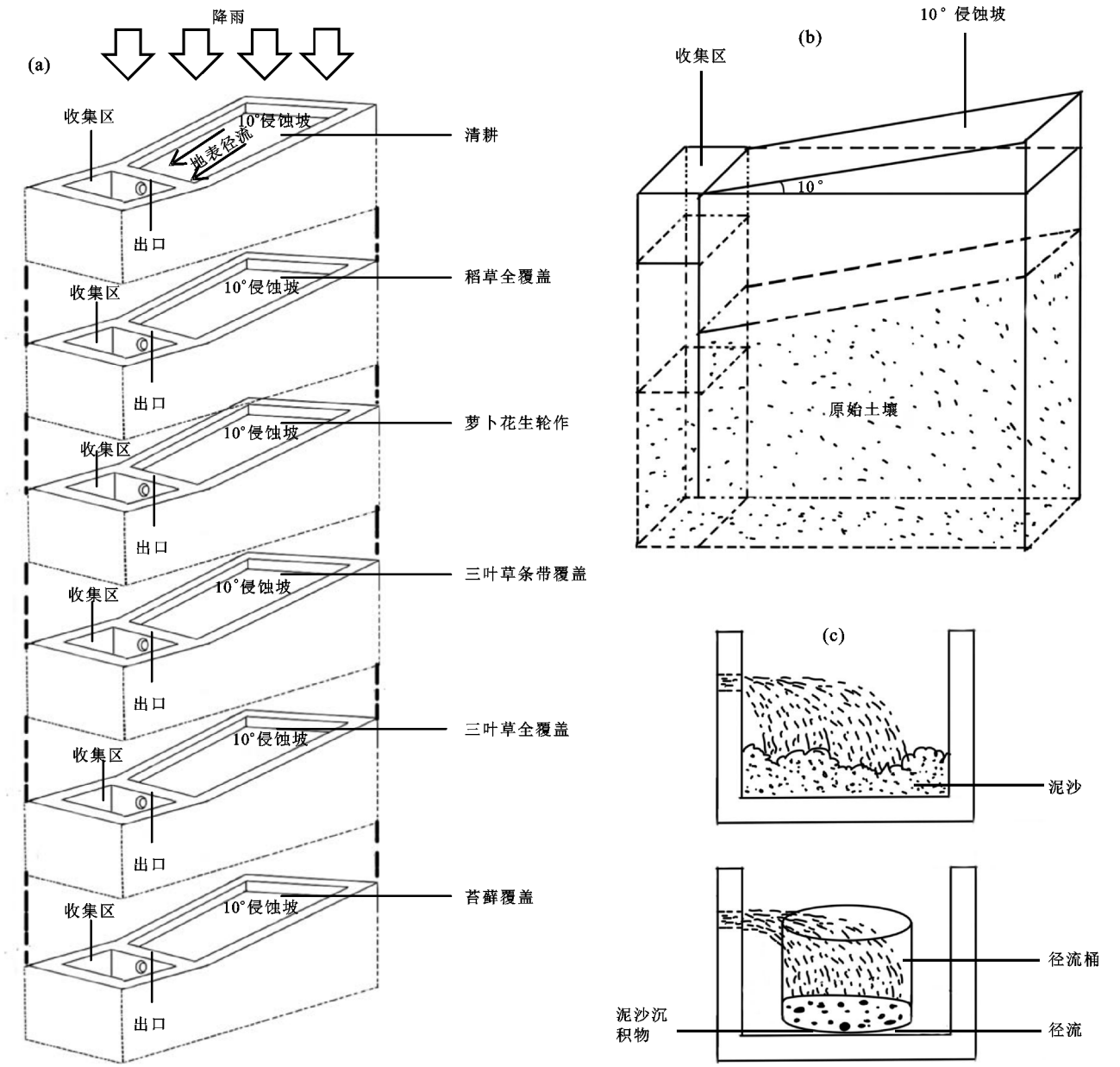
在坡度10°的柑橘果园设置6个投影面积5m×5m的径流小区(柑橘树规格一致,柑橘树龄均为2年,柑橘按照1335株/hm²的密度栽植),分别为清耕(CB)、稻草全覆盖(CS)、萝卜花生轮作(CRP)、三叶草(*Trifolium*)条带覆盖(CCS)、三叶草(*Trifolium*)全覆盖(CC)和苔藓覆盖(CT)。各类型小区设置3个重复。

CC、CT措施的植物为均匀撒播,CCS则是在2排柑橘树之间条带栽植三叶草(条带宽度0.20m,间距1.00m);CS措施所用稻草为每年秋收后(10月下旬)晒干的新鲜稻草并且每次用量为5.00kg;CRP措施的花生于每年谷雨前后播种,每年8月上旬收获;萝卜于10月播种,翌年3月收获。每次收获后将作物拔出覆盖于试验地表层,令其自然腐化。于每年4月底和10月底对各径流小区施用复合肥(磷酸二氢钾)1次,施肥量参考当地农业生产情况,每次量为1.25kg。耕作方式为免耕。

柑橘园为2019年由2年生实生苗建园。在每个

径流小区安装 A、B、C 3 个镀锌铁桶作为径流桶收集每次降雨径流和泥沙。最外围设置围埂并修建槽末端连接 PVC 管的导水槽,并用水泥在导水槽和 PVC

管之间进行密封,以保证导入径流桶的径流和泥沙没有损失,具体情况见已有研究^[10]和图 1。各措施小区柑橘树和土壤基本特征见表 1。



注:(a)为 6 种径流小区设置示意;(b)为侵蚀坡和沉积带的剖面示意;(c)为收集径流和泥沙的过程示意。

图 1 试验设计示意

表 1 径流小区柑橘树和土壤基本特征

小区	柑橘树基本特征		植被覆盖度			土壤基本性质		
	平均株高/m	平均胸径/cm	乔木/%	灌木/%	草本/%	pH	泥沙有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)	溶解性有机碳含量/ (g·L ⁻¹)
清耕(CB)	1.73±0.25	6.33±1.59	51.00±6.00	0	0	4.85±0.15	9.78±4.17	6.85±4.71
稻草全覆盖(CS)	1.85±0.08	4.50±0.53	54.00±5.00	0	0	4.98±0.02	6.96±1.81	9.59±5.94
萝卜花生轮作(CRP)	1.90±0.23	5.76±0.75	53.00±7.00	0	46.00±3.00	4.28±0.24	8.59±4.63	12.54±10.26
三叶草条带覆盖(CCS)	1.83±0.15	5.33±0.50	52.00±3.00	0	56.00±5.00	4.41±0.22	6.49±3.61	17.56±12.80
三叶草全覆盖(CC)	1.85±0.15	5.67±0.40	56.00±7.00	0	90.00±6.00	4.49±0.14	6.43±3.55	15.49±13.48
苔藓覆盖(CT)	1.82±0.07	6.03±0.75	53.00±6.00	0	38.00±9.00	4.36±0.05	7.22±1.51	6.48±7.71

注:表中数据为平均值±标准偏差,n=3,测定时间为 2020 年 5 月;小区柑橘树株高、胸径和植被覆盖度等指标测定方法为每种措施随机选择 3 个标准株进行测量,重复 3 次,株高、冠幅采用钢尺测量,精确到 0.01 m;植被覆盖度=单位面积内植被地上部分在地面的垂直投影面积/径流小区面积(5 m×5 m)。

1.3 指标测定

径流小区旁建有固定雨量监测点,采用虹吸式自记雨量计记录 2020 年 7 月至 2021 年 7 月监测期间大气降水过程,并得出降雨量、降雨历时和降雨强度等。

在每次降雨后收集桶内所有浑浊液体冷藏带回实验室通过静置、离心、过滤等步骤获取径流量,每次产流后,将原本附着在导槽内的细微泥沙冲入径流桶内再将泥水充分搅拌,分上、中、下 3 层取样混合,再从中取出 1 000 mL 浑水样,室内烘干求得泥沙含量,将其乘以径流量即可得出此次降雨的土壤侵蚀量。

取径流液 100 mL 存放于 4 ℃ 冰箱中静置,将上

$$\text{截流效益}(\%) = \frac{\text{CB 径流量}(\text{m}^3) - \text{其余管理措施径流量}(\text{m}^3)}{\text{CB 径流量}(\text{m}^3)}$$

(1)

$$\text{减沙效益}(\%) = \frac{\text{CB 泥沙流失强度}(\text{g}/\text{m}^2) - \text{其余管理措施泥沙流失强度}(\text{g}/\text{m}^2)}{\text{CB 泥沙流失强度}(\text{g}/\text{m}^2)}$$

(2)

$$\text{DOC 有机碳流失强度}(\text{g}/\text{m}^2) = \frac{\text{径流量}(\text{m}^3) \times \text{DOC 有机碳含量}(\text{g}/\text{m}^2)}{\text{各径流小区的水平投影面积}}$$

(3)

$$\text{泥沙有机碳流失强度}(\text{g}/\text{m}^2) = \frac{\text{产沙量}(\text{kg}) \times \text{泥沙有机碳含量}(\text{g}/\text{kg})}{\text{各径流小区的水平投影面积}}$$

(4)

1.4 降雨类型的判断方法

本研究根据秦伟等^[14]筛选侵蚀性降雨方法。依据中国气象局 2012 年发布的标准^[15](中雨:12 h 降雨量 5~15 mm,24 h 降雨量 10~25 mm;大雨:12 h 降雨量 15~30 mm,24 h 降雨量 25~50 mm;暴雨:24 h 降雨量> 50 mm)进行降水等级划分。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据处理和软件 R 3.6.1 (R Development Core Team, 2019)^[16]进行统计分析,显著性水平为 $p<0.05$ 。采用‘agricolae’包 Turkey HSD 多重比较不同土地管理措施之间径流量、产沙量、DOC 流失强度、泥沙有机碳流失强度的差异。采用“abline”包的线性回归功能分析降雨特征

清液倒出,4 000 r/min 离心 10 min,之后浸提液用玻璃纤维滤膜(0.45 μm)与真空泵抽滤后,使用总有机碳分析仪(Elementar 元素分析系统,德国)直接测定滤液中的可溶性有机碳含量。将径流中分离出的泥沙和采集的土壤样本进行风干,过 100 目筛,采用重铬酸钾外加热法^[13]进行有机碳的测定。同时采集径流小区内表层 0—20 cm 土壤样本然后测定土壤 pH、有机碳^[13]。

采取公式计算各措施径流小区的截流效益、减沙效益、径流携带的有机碳(即溶解性有机碳 DOC)流失强度和泥沙携带的有机碳流失强度:

与径流、泥沙及其所携带有机碳之间的关系。由于降雨量主要通过影响径流量来调控地表泥沙的流失强度^[17],所以本研究选择径流量作为重要影响因素进行与径流量、产沙量、DOC 流失强度和泥沙有机碳流失强度之间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 研究区自然降雨特征

2020 年 7 月 27 日至 2021 年 7 月 28 日,该地区共发生 42 场侵蚀性降雨,可被划分为中雨 19 场,大雨 17 场,暴雨 6 场。降雨量和降雨强度均无明显规律(图 2),既有历时短的强降雨事件,也有历时长

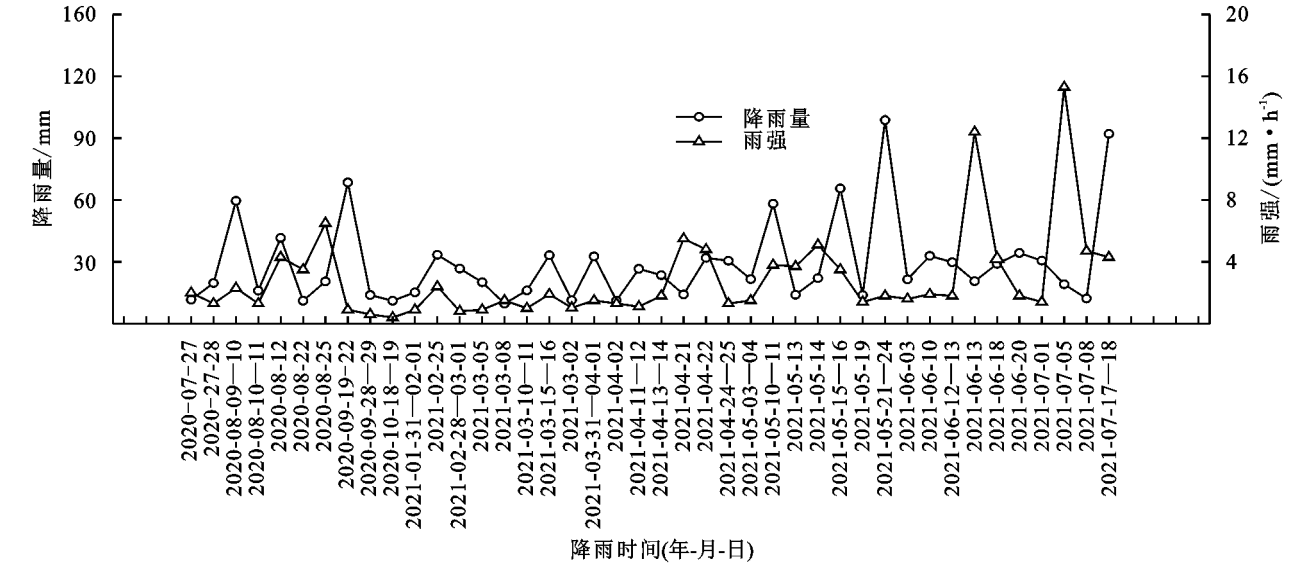
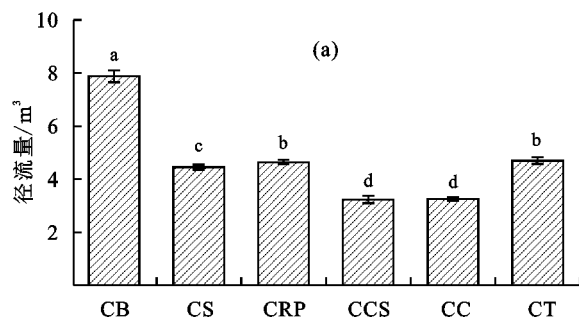


图 2 2020—2021 年自然降雨特征

2.2 自然降雨不同土地管理措施下径流和泥沙流失特征

由图 3 可知,CS、CRP、CCS、CC 和 CT 措施下的径流量和产沙量相比于对照组 CB 均显著降低($p < 0.01$)。CB、CS、CRP、CCS、CC、CT 的径流量分别为 7.88, 4.45, 4.64, 3.24, 3.25, 4.70 m^3 , 产沙量分别为



注:图柱上方不同的小写字母表示不同管理措施间差异显著($p < 0.05$)。下同。

71.35, 21.27, 31.03, 14.24, 14.18, 35.05 kg。其中 CC 和 CCS 的效果最佳,截流效益分别达到 58.82% 和 58.94%,减沙效益分别达到 80.13% 和 80.04%。而 CRP 和 CT 措施的截流减沙效益偏低,但也减少近 50.00% 的径流和泥沙流失。结果表明,5 种管理措施均可有效减少径流量和产沙量。

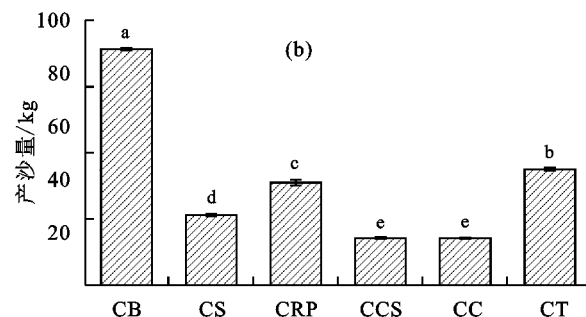


图 3 不同管理措施下径流和产沙流失特征

2.3 有机碳随地表径流和泥沙流失强度差异

在侵蚀性降雨事件下,CS (4.78 g/m^2)、CRP (8.68 g/m^2)、CCS (3.52 g/m^2)、CC (3.38 g/m^2) 和 CT (9.94 g/m^2) 措施下泥沙有机碳流失强度相比对照组 CB (20.75 g/m^2) 显著降低 76.94%, 58.16%, 83.01%, 83.71%, 52.11% ($p < 0.01$)。这表明在裸地施行管理措施后,可以有效抑制土壤有机碳随泥沙的迁移流失。

相比于对照措施,CT 措施的 DOC 流失强度显

著降低 31.24%,但其余 4 种措施(CS、CRP、CCS 和 CC)的 DOC 流失强度增高($p < 0.05$)。说明这 5 种管理措施在土壤有机碳随径流的迁移流失中的抑制作用并没有体现(图 4)。由图 5 可知,径流量与 DOC 流失强度存在显著正向关系($p < 0.01$),即截流效益是驱动不同管理措施间 DOC 流失强度差异的主导因素。径流量、产沙量也均与泥沙有机碳流失强度存在显著正向关系($p < 0.01$)(图 5 和图 6)。这表示如果增强截流和减沙效益,那么有机碳流失强度则降低。

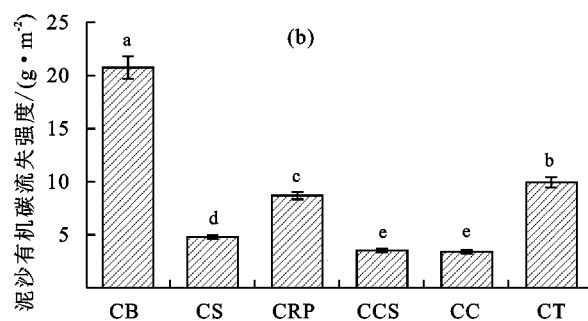
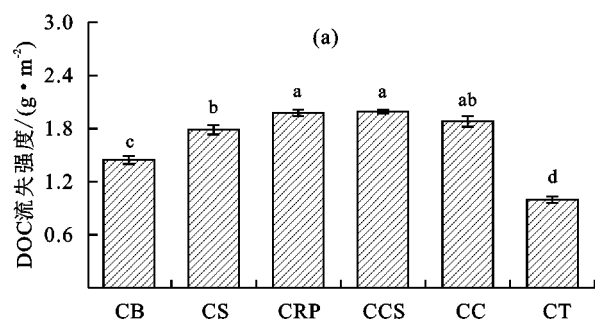


图 4 不同管理措施下 DOC 和泥沙有机碳流失强度流失特征

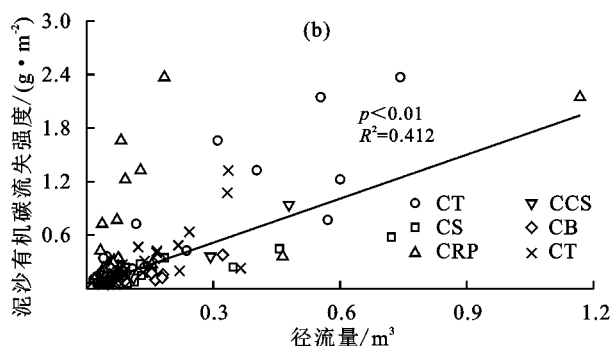
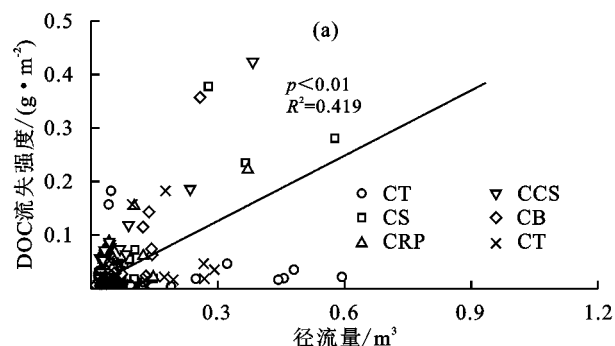


图 5 不同管理措施下 DOC 和泥沙有机碳流失强度与径流量的关系

3 讨论

3.1 不同管理措施对土壤产流产沙的影响

前期研究发现,稻草覆盖^[18]、萝卜花生轮作^[19-20]、三

叶草覆盖^[21]、苔藓覆盖^[22]等地表管理措施均能在一定程度上减缓水土流失并具有一定的截流减沙作用。本研究通过整合目前多种常见地表管理措施也发现

类似的观点,即不同的管理措施均能提升南方红壤区开发初期果园土壤的截流减沙效益。然而,不同管理措施的截流减沙效果存在一定差异,需要进一步探索。相比其他处理模式,CT(苔藓覆盖)在减少地表径流和产沙量方面的效果较差(图3),分别为 4.70 m^3 和 35.05 kg 。这一方面可能是由于苔藓植物冠层郁闭度较低^[23],难以阻截径流和减少降雨对地表土壤的滴溅侵蚀;另一方面,苔藓植物根系为假性的根^[24],而无法有效固持土壤,故截流减沙效果较差。因此,在南方红壤坡地的管理中,应慎重考虑苔藓植物。此外,在本研究中CC(三叶草全覆盖)和CCS(三叶草条带覆盖措施)的截流和减沙效益相似,分别为 59.00% 和 80.00% ,而CS(稻草覆盖)的径流量(4.45 m^3)和产沙量(21.27 kg)较大。相对于三叶草覆盖,稻草覆盖因为没有根系支撑,所以无法利用根系固结土壤以及提高土壤孔隙度。同时,稻草与三叶草地上部分的覆盖层高度也不相同,生长较好的三叶草株高可以达到 $30\sim 60\text{ cm}$ ^[25],所以叶片在截留部分雨水的同时,还可以有效减少降雨对地表的冲击。相比之下,稻草覆盖层通常较低且随着稻草降解程度的加深逐渐降低,这将无法阻截降雨的直接冲刷,使得地表雨滴迸溅,因此难以达到较好的截流减沙效果。此外,三叶草覆盖措施下每年都会产生丰富的凋落物层,这一方面可以减少降雨与土壤的直接接触,抑制土壤颗粒的流失;另一方面相对蓬松的凋落物层可以有效吸收雨水^[26],增加雨水下渗,进而减少地表径流。

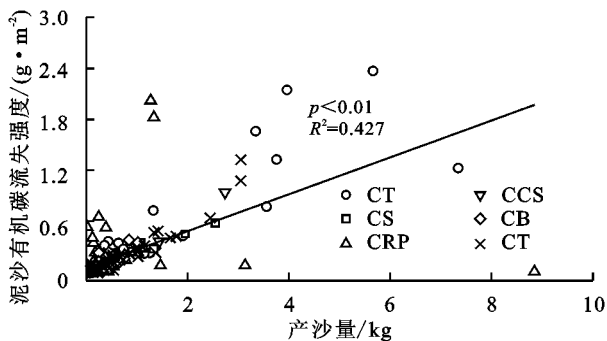


图6 不同管理措施下泥沙有机碳流失强度与产沙量的关系

在本研究中,CRP(萝卜花生轮作)的截流减沙效果相对于其他覆盖措施较弱,径流量和产沙量分别为 4.64 m^3 和 31.03 kg 。以往的研究^[27]表明,轮作方式的水土保持效果具有较大的不确定性,这是轮作作物的生长旺季和降雨侵蚀发生季节不一致引起的。本研究中,萝卜主要于10月播种,翌年3月收获。这说明,本研究区的雨季均在植物完成营养生长之前到来。所以,CRP措施下的截流减沙效益并不理想。此外,长期轮作会加剧土壤结构的改变^[28],使得土壤原有的紧密结构遭到不同程度的破坏而进一步减弱

其截流减沙效益。因此,在南方红壤区开发初期的果园可以选择一些生长旺季与降雨量集中的4—7月相匹配的种植作物以优化轮作措施的效果,如油菜、豌豆、玉米^[29]等。综合来看,不同管理措施均能在一定程度上发挥截流减沙作用,但截流减沙效益较佳的是三叶草全覆盖和三叶草条带覆盖2种模式。

3.2 不同管理措施下DOC有机碳的迁移损失

一般来说,DOC流失强度是由径流量决定的(图5),由于各措施径流量存在差异,导致DOC流失强度不同。相比裸地措施,CT(苔藓覆盖)措施显著减少 31.24% 的DOC流失。有研究^[30]也发现,苔藓具有较好的贮存DOC的作用。一方面可能是由于苔藓植物生长形成较高的冠层郁闭度,阻止降雨和径流直接与地表土壤的接触,减少地表径流的流失^[31];另一方面,苔藓类植物具有较高的持水能力^[32],一定程度上阻截淋溶作用将DOC淋出。然而其他管理措施均在不同程度上导致DOC流失强度的增高。其中CS(稻草覆盖)措施因为缺乏根系支撑,所以无法利用根系固持土壤以及提高土壤孔隙度。并且稻草覆盖层通常较低且随着稻草降解程度的加深逐渐降低,这将无法阻截降雨的直接冲刷,使得地表雨滴迸溅,因此难以阻截径流。此外,有研究^[33]显示,植物的凋落物中携带大量的DOC有机碳,CRP(萝卜花生轮作)、CCS(三叶草条带覆盖)、CC(三叶草全覆盖)3种生物措施在生长期产生大量的凋落物,形成丰富的凋落物层吸收大量水分^[34],使大量的可溶性物质被淋溶后进入土壤,导致土壤中的DOC有机碳含量增高。因此,不同管理措施间对DOC有机碳迁移损失的抑制作用还有待进一步研究。

3.3 不同管理措施下泥沙有机碳的迁移损失

土壤侵蚀过程中泥沙流失是土壤有机碳流失的主要途径^[9]。不同管理措施间泥沙有机碳的变化趋势与地表径流、产沙基本一致,即相比于径流有机碳,不同措施减少泥沙有机碳流失的能力更应被关注。本研究中,降雨量主要通过影响径流量来调控地表泥沙的流失强度。然而,泥沙有机碳迁移损失的变化程度随着措施类型的不同而变化。其中CB(清耕)的泥沙有机碳流失强度远高于其他措施,超过 20.00 g/m^2 (图4),造成这种结果的原因是裸地缺乏覆盖物,导致降雨初期大量有机碳随土壤流失^[35]。然而在裸地上实行管理措施后,植物可以通过冠层覆盖、凋落物层阻截和根系固土等综合作用发挥其减沙作用^[36],即植物的施加大幅度减少有机碳随泥沙流失的比重。

由图4可知,CC和CCS措施下泥沙有机碳流失分

别减少 83.71%, 83.01%。一方面是因为三叶草茂密的冠层可以有效地减缓雨水滴溅对土壤结构的破坏而减少轻质土壤颗粒的流失, 减少径流产生和雨水对土表的直接冲刷; 另一方面, 三叶草根系发达, 可以明显改造土壤的理化性质, 例如, 增加土壤孔隙度^[37]和土壤表面的粗糙度^[38], 显著提高土壤对小粒径黏粒的拦截能力, 减少泥沙有机碳迁移损失。其次, CS 措施的泥沙有机碳流失强度较清耕减少 76.94% (图 4)。主要是地表覆盖有效降低雨水对土壤的冲刷作用, 减少泥沙有机碳的流失。同时 CRP 措施的泥沙有机碳流失强度降低 58.16% (图 4), 是因为轮作作为耕作措施对土壤的扰动较大, 导致土壤团聚体的稳定结构被破坏, 有机碳极易随被分散的土壤流失^[29]。CT 措施也在一定程度上降低沙有机碳流失强度, 但由于苔藓缺乏根系组织^[39], 无法固结土壤, 有机碳流失相较其余措施偏高。本研究表明, 管理措施的选择应主要根据其泥沙有机碳的迁移量。因此, 比较 5 种管理措施减少泥沙有机碳迁移的能力, 三叶草全覆盖和条带覆盖措施优于其他措施, 可作为治理南方红壤区果园水土流失的优选方案。

3.4 不同气候区土壤有机碳迁移特征

不同气候区土壤在水蚀过程中的有机碳迁移特征存在一定的差别。例如, 在南亚热带季风性湿润气候区茶园流失的土壤中, 泥沙态有机碳流失量为 8.13 g/kg, 占总有机碳损失量的 99.51%, 而 DOC 流失量为 0.04 g/kg, 占有机碳总损失量的 0.49%^[40]; 在温带大陆性气候坡耕地的研究^[41]发现, 土壤中泥沙有机碳和 DOC 的流失量分别为 20.36, 0.14 g/kg, 占有机碳损失量的比例依次为 99.31% 和 0.70%。在本研究中, 中亚热带南方红壤区新开发脐橙园在水蚀过程中的泥沙有机碳含量为 9.78 g/kg (99.89%), DOC 含量 0.01 g/kg (0.11%)。因此, 相比其他气候区, 中亚热带红壤区果园的泥沙有机碳占比更大, 而溶解态有机碳显示相反的趋势。首先, 中亚热带红壤区的降雨量较大且集中, 这导致大量的泥沙随地表径流的产生而发生迁移^[42]; 其次, 本研究区红壤的结构紧实, 极易在降雨过程中形成结皮, 土壤下渗率较低, 这导致雨水很难接触到下层土壤, 从而减少土壤中 DOC 的淋出^[42]。此外, 相比于其他研究区, 南方红壤区属于典型的低山丘陵区, 坡度较大、起伏显著。在降雨过程中, 大量泥沙被搬移土体, 而雨水很难长时间接触土壤^[42]。因此, 南方红壤区果园在土壤有机碳的水蚀过程中, 泥沙有机碳占绝对主导地位。考虑到当前红壤坡地是全国水土流失严重地区, 而果园属于南

方红壤区主要的土地利用类型和土壤侵蚀重灾区^[43], 相比于解决其他地区果园的水土流失问题, 红壤区果园的水土流失问题更加严峻, 也需要得到更多的关注。

4 结论

(1) 与清耕相比, 三叶草条带覆盖和三叶草全覆盖 2 种管理措施对红壤坡地新开发柑橘园具备最好的截流减沙效益, 截流效益分别为 58.94% 和 58.82%, 减沙效益分别为 80.04% 和 80.13%。

(2) 与清耕措施相比, 三叶草全覆盖和三叶草条带覆盖措施对泥沙有机碳流失的抑制效果最为明显, 分别降低 83.71% 和 83.01%。导致不同管理措施间有机碳流失差异的主要影响因素为 DOC 和泥沙有机碳流失强度, 其中 DOC 流失强度和径流量间呈显著正相关关系, 泥沙有机碳流失强度和产沙量呈显著正相关关系。

(3) 在红壤坡地果园开发初期水土流失和有机碳防控过程中, 建议优先考虑三叶草全覆盖和条带覆盖措施。

参考文献:

- [1] 林金石, 黄炎和, 范胜龙, 等. 经不同措施治理的侵蚀红壤肥力质量综合评价[J]. 福建农林大学学报, 2011, 40(2): 192-197.
- [2] 涂安国, 谢颂华, 李英, 等. 红壤坡地柑橘园长期试验下水沙动态变化特征分析[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 160-165.
- [3] 刘鹤龄, 饶良懿, 图尔荪, 等. 北方土石山区水蚀及水土保持措施对土壤有机碳的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(4): 646-655.
- [4] 林杰, 张相, 姜姜, 等. 水力侵蚀过程中土壤有机碳循环研究进展[J]. 南京林业大学学报 2022, 46(6): 187-194.
- [5] 秦东远, 肖培青, 郝仕龙, 等. 黄丘区野外坡面产流产沙过程对不同植被覆盖结构的响应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 73-78.
- [6] 高泽超. 秸秆覆盖对桂西北坡地幼龄橘园产流产沙的影响[D]. 广西 桂林: 桂林理工大学, 2021.
- [7] 刘润, 申家琛, 张朝晖. 4 种苔藓植物在喀斯特石漠化地区的生态修复意义[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 141-148.
- [8] 郭太龙, 谢金波, 孔朝晖, 等. 华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1266-1273.
- [9] Hua K K, Zhu B, Wang X G, et al. Forms and fluxes of soil organic carbon transport via overland flow, interflow and soil erosion in a hillslope cropland of Regosol China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(4): 1011-1019.

- [10] 肖胜生,汤崇军,王凌云,等.自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移[J].土壤学报,2017,54(4):874-884.
- [11] Mahmoodabadi M, Zamani S, Yazdanpanah N. Enrichment of soil organic carbon in the eroded sediments due to the simultaneous occurrence of rain and wind[J]. Geoderma, 2021, 386(1): e114926.
- [12] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.QYJY-503C人工模拟降雨装置降雨特性试验[J].中国水土保持科学,2015,13(2):31-36.
- [13] 乔胜英.土壤理化性质实验指导书[M].武汉:中国地质大学出版社,2012:10-28.
- [14] 秦伟,左长清,郑海金,等.赣北红壤坡地土壤流失方程关键因子的确定[J].农业工程学报,2013,29(21):115-125.
- [15] 中国气象局.GB/T 28592—2012 中国气象局关于降水量等级的气象国家标准[S].北京:气象出版社,2012:40-42.
- [16] Team R D C. R: A language and environment for statistical computing [J]. R Foundation for Statistical Computing, 2019, 1(1): 2-12.
- [17] 艾宁,魏天兴,朱清科,等.基于通径分析的陕北黄土坡面径流产沙影响因素[J].北京林业大学学报,2015,37(6):77-84.
- [18] 周怡雯,戴翠婷,刘窑军,等.耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):49-54.
- [19] 杨洁,郭晓敏,宋月君,等.江西红壤坡地柑橘园生态水文特征及水土保持效益[J].应用生态学报,2012,23(2):468-474.
- [20] 武松伟,梁珊珊,胡承孝,等.我国柑橘园“因土补肥”与化肥减施增效生态分区[J].华中农业大学学报,2022,41(2):9-19.
- [21] 邓从,陈为峰,王文中,等.表土堆置体不同覆盖措施坡面流失特征[J].水土保持学报,2018,32(2):92-96.
- [22] 卫伟,温智,陈利顶,等.半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应[J].环境科学,2012,33(11):3901-3904.
- [23] 赵海燕,郭荣慧,段宇涛,等.苔藓植物护坡及固土作用试验研究[J].兰州大学学报,2018,54(3):364-368.
- [24] 刘润,申家琛,张朝晖.4种苔藓植物在喀斯特石漠化地区的生态修复意义[J].水土保持学报,2018,32(6):141-148.
- [25] 杨冬艳,郭文忠,曲继松,等.套种三叶草对日光温室樱桃番茄生长及根际土壤环境的影响[J].西北农业学报,2012,21(6):108-111.
- [26] 张运林,孙萍,满子源.室内模拟降雨对蒙古栎和红松凋落物床层饱和含水率的影响[J].中南林业科技大学学报,2020,40(9):1-10.
- [27] 陈文庆,李鹏,黄土区农业种植措施的选择及优化[J].水土保持研究,2003,10(1):115-117.
- [28] 白怡婧,刘彦伶,李渝,等.长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J].土壤,2021,53(1):161-167.
- [29] 苟小梅,王昌全,李冰,等.玉米种植制度对红壤磷素形态及其有效性的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):883-889.
- [30] 蔡慕天.云南2种类型森林地面苔藓去除对土壤有机碳的影响[D].昆明:云南大学,2019.
- [31] 王雅婷,郑景明,彭霞薇.极端环境中苔藓植物的生态功能研究进展[J].植物生理学报,2022,58(1):101-108.
- [32] 涂娜,严友进,戴全厚,等.喀斯特石漠化区典型生境下石生苔藓的固土持水作用[J].生态学报,2021,41(15):6203-6214.
- [33] 李素丽.亚热带森林植物凋落叶源溶解有机碳特征和生物可降解性[D].南昌:江西农业大学,2022.
- [34] Wang Z, Govers G, Oost K V, et al. Soil organic carbon mobilization by interrill erosion: Insights from size fractions[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118: 348-360.
- [35] 张兴昌,刘国彬,付会芳.不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J].环境科学,2000,21(6):16-19.
- [36] Massey H F, Jackson M L. Selective erosion of soil fertility constituents[J]. Soil Science Society of America Journal, 1952, 16: 353-356.
- [37] 聂小东,李忠武,王晓燕,等.雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J].土壤学报,2013,50(5):900-908.
- [38] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses[J]. Catena, 2009, 78(1): 81-86.
- [39] 王传飞,王小萍,龚平,等.植被富集持久性有机污染物研究进展[J].地理科学进展,2013,32(10):1555-1566.
- [40] 王义祥,叶菁,王成己,等.不同经营年限对柑橘果园土壤有机碳及其组分的影响[J].生态环境学报,2014,23(10):1574-1580.
- [41] 李娜,张哲,白伟,等.耕作方式下坡面土壤侵蚀对有机碳流失的影响[J].东北农业大学学报,2022,53(2):82-90.
- [42] 林盛.南方红壤区水土流失治理模式探索及效益评价[D].福州:福建农林大学,2016.
- [43] 龙鹏.基于不同用地类型土壤允许流失量的小流域生产力退化风险研究[D].武汉:华中农业大学,2022.