

迟宇博, 吴磊, 李蕊, 等. 不同措施黄绵土坡地暴雨侵蚀及磷素流失特点[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2833–2843.

CHI Yu-bo, WU Lei, LI Rui, et al. Characteristics of soil erosion and phosphorus loss from loessial sloping land under different measures during heavy rainstorms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2833–2843.



开放科学 OSID

不同措施黄绵土坡地暴雨侵蚀及磷素流失特点

迟宇博^{1,2}, 吴磊^{1,2,3*}, 李蕊^{1,2}, 高爽^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探讨不同管理措施对10°、15°和20°黄绵土坡面侵蚀及磷素流失的影响, 本文以60 mm·h⁻¹为试验雨强, 采用室内人工模拟降雨试验方法, 以CK(裸坡, 0%生物炭, 平作)为对照, 分析C1(裸坡, 0%生物炭, 横垄)、C2(裸坡, 3%生物炭, 平作)、C3(裸坡, 3%生物炭, 横垄)、C4(裸坡, 6%生物炭, 平作)、C5(裸坡, 6%生物炭, 横垄)、C6(植被, 0%生物炭, 平作)、C7(植被, 0%生物炭, 横垄)、C8(植被, 3%生物炭, 平作)、C9(植被, 3%生物炭, 横垄)、C10(植被, 6%生物炭, 平作)和C11(植被, 6%生物炭, 横垄)多措施下黄绵土坡地泥沙及磷素流失特征。结果表明: 不同坡度下C1、C6、C7、C8、C9措施能有效降低黄绵土坡面侵蚀及磷素流失; 施加生物炭(C2~C5、C8~C11)加剧了坡地尤其是陡坡的土壤侵蚀和磷素流失; 在不同坡面上布设植被措施(C6~C11)均具有拦沙固磷作用, 在15°坡面效果最优; 横垄措施(C1、C3和C5)减沙固磷效应随坡度增大而减弱, 在20°下易失效, 故小于10°坡面上宜推广应用横垄措施; 植被与横垄措施相结合(C7、C9和C11)在不同坡度下的消减率均在50%以上, 故在实际农业生产中建议使用横垄搭配植被措施。黄绵土坡面磷素流失以颗粒态(PP)为主, PP/TP流失比例多在80%以上, 并随坡度增大而增大; 3种坡度下施加生物炭(C2、C4)均使PP占比增至90%以上, 而横垄和植被措施能有效降低坡面PP/TP比例。综上, 缓坡上设置横垄, 陡坡上设置植被或者在植被覆盖基础上合理搭配横垄和3%生物炭措施, 均有利于阻控黄绵土坡面土壤侵蚀和磷素流失。

关键词: 横垄; 植被; 生物炭; 坡度; 土壤侵蚀; 磷素流失

中图分类号 S157.1 文献标志码 A 文章编号 :1672-2043(2020)12-2833-11 doi:10.11654/jaes.2020-0357

Characteristics of soil erosion and phosphorus loss from loessial sloping land under different measures during heavy rainstorms

CHI Yu-bo^{1,2}, WU Lei^{1,2,3*}, LI Rui^{1,2}, GAO Shuang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: A simulated rainfall experiment of 60 mm·h⁻¹ was conducted to investigate the effects of different management measures on slope erosion, and sediment and phosphorus loss on loessial sloping land of 10°, 15°, and 20° for CK(bare slope, 0% biochar, flat tillage), C1(bare slope, 0% biochar, horizontal ridge), C2(bare slope, 3% biochar, flat tillage), C3(bare slope, 3% biochar, horizontal ridge), C4(bare slope, 6% biochar, flat tillage), C5(bare slope, 6% biochar, horizontal ridge), C6(vegetation coverage, 0% biochar, flat tillage), C7(vegetation coverage, 0% biochar, horizontal ridge), C8(vegetation coverage, 3% biochar, flat tillage), C9(vegetation coverage, 3%

收稿日期: 2020-03-30 录用日期: 2020-06-18

作者简介: 迟宇博(1993—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: 1059034737@qq.com

*通信作者: 吴磊 E-mail: lwu@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679206); 陕西省青年科技新星项目(2017KJXX-91); “仲英青年学者”项目(Z111021720)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51679206); Youth Science and Technology Nova Project in Shaanxi Province(2017KJXX-91); Tang Scholar(Z111021720)

biochar, horizontal ridge), C10(vegetation coverage, 6% biochar, flat tillage), and C11(vegetation coverage, 6% biochar, horizontal ridge). The results showed that C1, C6, C7, C8, and C9 effectively reduced the soil erosion and phosphorus loss of different loessial slopes. Soil erosion and phosphorus loss were aggravated by the application of biochar (C2~C5, C8~C11), especially on steep slopes. Vegetation coverage (C6~C11) effectively slowed sediment and phosphorus loss on different slopes, and the controlling effect was optimal on the 15° slope. The mitigation effect of the horizontal ridge on the bare slope (C1, C3, and C5) decreased as the slope increased and was liable to fail at 20°; thus the horizontal ridge was recommended for slopes $\leq 10^\circ$. The combination of vegetation coverage and horizontal ridge (C7, C9, and C11) effectively reduced sediment and phosphorus loss for different slopes with a reduction rate of $\geq 50\%$ and was advisable for agricultural production. Particulate phosphorus (PP) was the primary form of phosphorus loss on loessial sloping land, accounting for more than 80% in most scenarios and increasing with increased slope. Applying biochar increased the proportion of PP loss, the proportion of C2 and C4 accounted for more than 90%, and the installation of the horizontal ridge and vegetation coverage reduced the PP/TP proportion. Therefore, the horizontal ridge on a gentle slope, a reasonable combination of vegetation coverage, and a 3% biochar application on a steep slope were beneficial for controlling the soil erosion and phosphorus loss of loessial slopes.

Keywords: horizontal ridge; vegetation coverage; biochar; slope; soil erosion; phosphorus loss

我国黄土高原地区沟壑纵横,土质疏松,降雨季节分配不均衡^[1],加上人类长期的陡坡开垦、滥伐滥牧等一系列不合理的生产活动^[2],使得黄土高原大部分区域土壤侵蚀严重,土壤侵蚀面积达39万 km^2 ,占黄土高原地区总面积的60.9%以上,是世界上水土流失最为严重的区域之一^[3]。严重的水土流失一方面导致了土壤表层营养物质大量流失,使得耕地土壤质量严重退化,阻碍了当地农业生产发展;另一方面大量泥沙和氮、磷养分随径流进入接纳水体,造成水体富营养化及水质恶化,加剧了农业面源污染^[4],极大程度上制约着黄土高原区域生态环境质量的提升。

为减少坡地水土养分流失,缓解农业生产与环境质量之间的矛盾,近年来国内外学者已经提出大量控制措施来消减农业面源污染,其中生物炭作为一种新型且高效的土壤改良剂,因具有多孔性、比表面积大、富含官能团^[5]等特性,能够有效吸附氮磷元素,而被广泛应用于农业面源污染控制^[6],但考虑到生物炭的成本效益和施加的不可逆性,探讨坡面上生物炭施加量对土壤和生态环境的影响显得尤为重要。在应对坡地泥沙养分流失方面,横垄与植被覆盖措施在坡面上的应用最为广泛,横垄作为一种最为常见的传统耕作管理措施,通过改变坡面微地形,达到固土蓄水、防治土壤侵蚀和减缓养分流失^[7]的作用,但当拦截水量超过垄沟蓄水能力时,会导致垄侧渗流,反而加剧土壤流失^[8]。根据黄土高原地区多年来的水保经验,植被覆盖措施在治理土壤侵蚀过程中起到了不可替代的作用,主要是通过增大植被覆盖度达到降低雨滴动能、拦蓄径流及泥沙以及吸附污染负荷^[9]等目的,其中草本植被因具有易于管理、发育迅速、植被茂密等优点,常被视为一项低廉且高效的生物林草措施。

现阶段,针对坡面不同水土保持措施下的水沙与养分流失规律已开展了大量降雨试验研究,但大多数研究主要集中于单体措施对单一坡面径流、泥沙的截留效应上,针对不同措施组合下坡面泥沙及磷素输出特征的研究还相对较少。因此本研究以黄绵土坡地为对象,采用室内人工模拟降雨试验,研究单体措施及其组合对坡面侵蚀及磷素流失的影响效应,以期为黄土丘陵区多尺度养分流失模拟和水土资源调控提供科学依据。

1 材料与方法

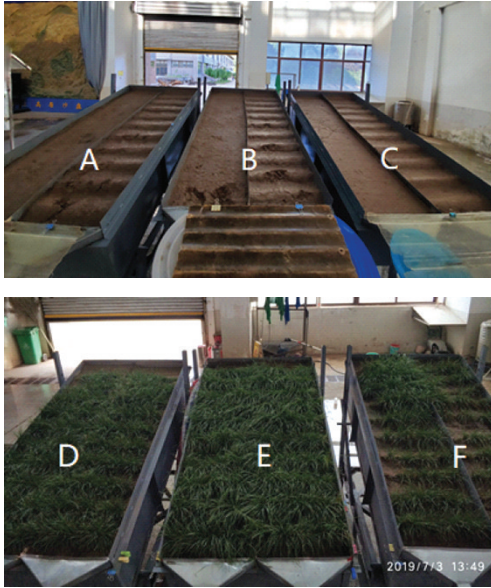
1.1 试验材料

本次人工模拟降雨试验在西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅的侧喷区内进行。试验所用径流槽为6个相同尺寸的移动变坡式钢槽,如图1所示,钢槽规格均为2 m(长) \times 1 m(宽) \times 0.45 m(高),每个土槽中间用钢板等分成两部分作为试验对照,另在土槽的其他三边设置10 cm安全加高,防止槽内土壤在雨滴打击作用下溅出槽外,并在土槽底板处均匀打孔,便于土壤水分自由向下渗漏。

试验用土为采自延安市安塞县的黄绵土,理化性质如表1所示。试验所用生物炭(BC)由陕西省亿鑫生物能源科技开发有限公司提供,是以苹果枝条为原料经过600 $^\circ\text{C}$ 热解法制得的锯末黑炭,粒径为80~400目。

1.2 试验方法

土壤取回后自然风干,过10 mm筛去除杂物。采用酒精燃烧法测得土壤前期含水量,并根据安塞地区氮磷水平计算得到所需尿素和过磷酸钙用量,用所需



A: 裸坡+3%BC, B: 裸坡+6%BC, C: 裸坡+0%BC, D: 植被+0%BC, E: 植被+3%BC, F: 植被+6%BC, 各槽左右侧分别为平作和横垄措施
A: bare slope+3% biochar, B: bare slope+6% biochar, C: bare slope+0% biochar, D: vegetation coverage+0% biochar, E: vegetation coverage+3% biochar, F: vegetation coverage+6% biochar, the left and right sides of each runoff trough are flat tillage and horizontal ridge respectively

图1 径流槽示意图

Figure 1 Schematic diagram of runoff trough

补水量溶解定量的化学肥料,使用喷雾器均匀喷洒在土料上,为使坡地养分流失最低,保持土壤初始含水量在10%左右^[10]。用电子天平称取土质量的3%、6%作为生物炭施加量(3%BC、6%BC),用搅拌机将生物炭与土壤充分搅拌,混和均匀后密封静置24 h形成试验肥土备用。土槽填装时,首先在底部铺设厚5 cm天然细沙后用透水纱布覆盖,保证水分均匀下渗。根

据土壤设计容重 $1.20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,采用分层填装法进行填土并均匀压实。对于设置横垄措施的土槽,坡面按垄高5 cm、垄顶间距10 cm、垄宽5 cm的标准仿成横坡垄作地,另一侧土槽坡面设计为平地作为不同耕作措施试验对照。对于设置植被覆盖措施的土槽,根据安塞地区当地植被的生长分布情况,采用条播方式播种多年生黑麦草,播种密度为 $20\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,种植行距保持为10 cm,于草苗长出后14 d左右对槽内草被进行间苗和移栽,使得土槽内牧草盖度基本相同,保持在80%左右。土槽内具体措施布设情况及编号见表2。

1.3 样品收集与测定

设定此次试验降雨强度为 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,固定降雨时长为90 min,坡度选取黄土丘陵区常见坡度水平:10°、15°、20°。降雨试验为2019年7月上旬至8月中旬,共降雨6次,每次降雨前需用时域反射仪(Time domain reflectometry, TDR)测量土壤含水量,测得含水量在10%左右后准备降雨试验。正式降雨试验前需对降雨强度进行多场次率定,直到雨强和均匀度(80%以上)均满足要求时,快速揭开遮雨布开始降雨试验,并记录开始降雨时间。以土槽水流呈柱状流出时记为初始产流时间并采取水样,采样方法为前20 min每间隔1 min取1次水样,共取10次,此后每间隔10 min取1次水样至降雨结束,采样时长均为1 min,共取17组径流样。试验结束后称量各小桶内水样体积和质量,用聚乙烯瓶取各桶内50 mL径流样,带回实验室对各组水样分别进行化学分析,剩余水样放入烘箱烘干至恒质量测得泥沙含量。浑水样总磷(TP)和经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后的溶解态磷(DP)测定均采

表1 试验土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of experimental soil

土壤类型 Soil type	前期含水量 Antecedent soil moisture/%	pH值 pH value	各级颗粒组成 Soil particle composition/%			全氮 TN/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 TP/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
			<0.001 mm	0.001~0.05 mm	>0.05 mm		
黄绵土	6.8	7.6	12.36	66.15	21.49	0.43	0.49

表2 试验不同措施布设情况

Table 2 Layout of different measures

措施编号 Measure number	措施设计 Measure design	措施编号 Measure number	措施设计 Measure design
CK	裸坡+0%BC+平作	C6	植被+0%BC+平作
C1	裸坡+0%BC+横垄	C7	植被+0%BC+横垄
C2	裸坡+3%BC+平作	C8	植被+3%BC+平作
C3	裸坡+3%BC+横垄	C9	植被+3%BC+横垄
C4	裸坡+6%BC+平作	C10	植被+6%BC+平作
C5	裸坡+6%BC+横垄	C11	植被+6%BC+横垄

用5%过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法(GB 11893—1989),并通过TP浓度与DP浓度相减得到颗粒态磷(PP)浓度。

1.4 数据处理与计算

本试验采用Excel 2016进行数据统计和图表制作,用SPSS 23.0软件进行数据分析和处理,不同措施组产沙数据计算包括产沙量、产沙率和减沙率,养分数据包括磷素流失量和磷素消减率。

$$\text{产沙量}(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})=\sum_{i=1}^{17}\text{第}i\text{次收集的泥沙量}/\text{不同措施对应的土槽面积}$$

产沙率($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)=第*i*次收集的泥沙量/第*i*次采样时间

减沙率(%)=(不同措施产沙量-对照措施产沙量)/对照措施产沙量

$$\text{磷素流失量}(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2})=\sum_{i=1}^{17}\text{第}i\text{次收集总磷浓度}\times\text{第}i\text{次收集的径流量}/\text{不同措施对应的土槽面积}$$

磷素消减率(%)=(不同措施磷素流失量-对照措施磷素流失量)/对照措施磷素流失量

2 结果与分析

2.1 不同坡度下不同措施泥沙流失特征

图2为10°、15°和20°下不同措施随降雨过程的产沙情况。由图2可知,10°和15°裸坡上不同措施组产沙率随降雨历时的变化特征相似,即在产流初期裸坡产沙率随产流时间先迅速减少,于20 min后趋于稳定,但随着坡度增大,20°下C2~C5产沙率先降低后波

动上涨。10°下CK~C5初始产沙量分别为7.78、3.02、25.62、4.23、36.61 g和6.73 g,从大到小依次为C4>C2>CK>C5>C3>C1,可知同一生物炭施加量下,横垄组初始产沙量小于平地对照组,表明横坡垄作措施能有效拦截坡面泥沙;当耕作措施相同时,初始产沙量随生物炭含量增加而增大,表明施加本试验范围生物炭含量加剧了坡面土壤侵蚀。

由图2可知,3个坡度下除C10外,其余植被覆盖组(C6~C9、C11)产沙率稳定值和变化幅度均小于裸地对照组,且变幅随坡度增大波动相对较小,表明种植草被是削弱坡面土壤侵蚀程度的重要措施,可有效降低由坡度升高而造成坡地土壤侵蚀加剧的不利影响。从图中还可知,C10产沙率随坡度升高显著增大,尤其在20°下产沙率甚至高于裸坡对照组,表明在陡坡条件下,添加大剂量生物炭同样具备加重植被坡面侵蚀的风险。

累积产沙量大小能准确反映出土壤在雨滴击溅作用下的侵蚀程度。由表3可知,以累积产沙量小于CK组为减沙判断标准,10°、15°和20°下不同措施组累积产沙量从小到大依次为C1<C6<C8<C7<CK、C6<C8<CK、C6<C7<C9<C8<CK,表明缓坡上设置横垄措施(C1),或在不同坡度下将植被措施(C6)与横坡垄作、3%BC二者或三者合理搭配(C7、C8和C9)均能有效阻控泥沙流失。

在裸坡坡面上,从不同坡度来看,10°、15°和20°裸坡总产沙量(面积6 m²)分别为251.02、463.67 g·m⁻²和864.02 g·m⁻²,表明裸坡土壤侵蚀量随坡度增大呈增加趋势($P=0.001<0.05$)。从不同耕作方式来看,裸

表3 不同坡度下不同措施累积产沙量和累积总磷流失量

Table 3 The sediment accumulation and TP loss accumulation of different measures under different slopes

措施 Measures	累积产沙量 Sediment accumulation/(g·m ⁻²)			累积总磷流失量 TP loss/(mg·m ⁻²)		
	10°	15°	20°	10°	15°	20°
CK	52.12	36.14	201.06	32.26	60.80	134.78
C1	20.94	84.18	363.75	6.88	62.94	243.42
C2	247.65	752.83	1 472.69	205.21	146.00	986.72
C3	103.70	613.73	1 158.48	101.03	363.39	861.65
C4	703.40	394.34	979.48	529.43	341.54	1 152.34
C5	378.29	900.80	1 008.68	394.48	684.75	1 121.11
C6	36.29	8.98	5.63	54.77	28.10	29.44
C7	51.83	53.14	13.56	31.32	25.39	17.62
C8	47.12	35.21	148.85	96.26	41.73	130.47
C9	88.76	114.37	106.46	68.57	59.22	90.79
C10	841.95	512.26	3 230.02	412.67	298.49	1 066.15
C11	71.23	99.65	628.43	63.89	73.73	280.35

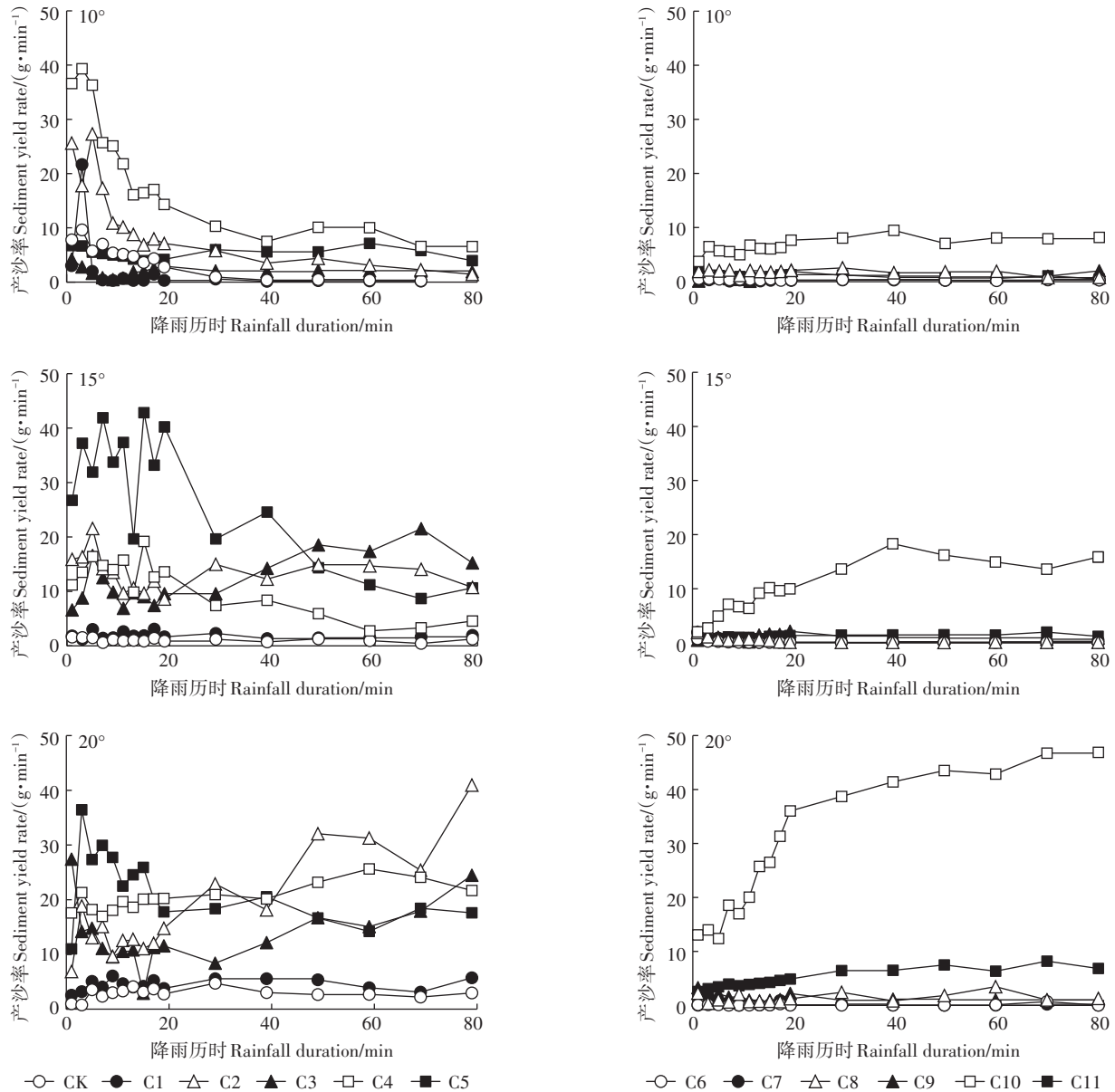


图2 不同坡度下不同措施产沙过程

Figure 2 Sediment yield process of different measures under different slopes

坡+平作总产沙量(CK+C2+C4)在 10° 、 15° 和 20° 下分别为 334.39 、 394.44 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 884.41 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,裸坡+横垄总产沙量(C1+C3+C5)在 10° 、 15° 和 20° 下分别为 167.64 、 532.90 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 843.63 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,表明不同耕作方式坡面产沙量均随坡度的增大而增大。横垄措施在 10° 下泥沙消减率达到 49.87% ,但在 15° 和 20° 坡面下,横垄总产沙量是平地总产沙量的 1.35 倍和 0.95 倍,表明随着坡度增大,横垄措施对泥沙的消减效果减弱或者失效。从不同生物炭含量来看,不同坡度下生物炭含量与裸坡产沙量之间存在显著关联性($P=0.029<0.05$),不同坡度下 0% 生物炭组(CK+C1)、 3% 生物炭组(C2+C3)和 6% 生物炭组(C4+C5)产沙量

(面积 2 m^2)在 10° 下分别为 36.53 、 175.67 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 540.84 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 15° 下分别为 60.16 、 683.28 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 647.57 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 20° 下分别为 282.41 、 $1\ 315.58$ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 994.08 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,表明3个坡度下施加生物炭均对裸坡泥沙流失起到负面影响,且同一生物炭施加量坡面的产沙量随坡度的增大而增大。对施加生物炭的坡面(C2、C4)布设横垄措施(C3、C5)能有效阻控泥沙流失,但横垄减沙效应随生物炭含量增加而减小,以 10° 裸坡为例,C1减沙率最高(59.83%),C3减沙率其次(58.13%),而C5减沙率最低(46.22%)。

在植被坡面上,除C10累积产沙量高于C4以外,3个坡度下其他植被措施组(C6~C9、C11)累积产沙量

均小于对应裸地组(CK~C3, $P=0.017<0.05$),表明植被覆盖是减缓坡地土壤侵蚀的有效措施。从不同坡度来看,10°、15°和20°下植被覆盖坡面总产沙量(面积6 m²)分别为189.53、137.27 g·m⁻²和688.83 g·m⁻²,相较于同坡度下裸地坡面产沙量,不同坡度下植被覆盖对泥沙的消减率分别为24.49%、70.40%和20.28%,表明植被覆盖能有效控制坡面泥沙流失,且在15°条件下调控效果最好。从不同耕作措施来看,植被+平作总产沙量(C6+C8+C10,面积3 m²)在10°、15°和20°下分别为308.45、185.49 g·m⁻²和1 128.17 g·m⁻²,植被+横垄总产沙量(C7+C9+C11,面积3 m²)分别为70.61、89.05 g·m⁻²和249.48 g·m⁻²,对比可知植被覆盖与不同耕作方式相结合,其产沙量均随坡度的增

大而增大。各坡度下植被+横垄组减沙率分别为77.11%、51.99%和77.89%,表明植被覆盖和横垄措施相搭配在不同坡度下能进一步消减泥沙流失。从不同生物炭含量来看,植被+3%生物炭(C8+C9,面积2 m²)减沙率由10°坡面下的61.33%升至15°坡面89.05%,最后达到20°坡面下的90.30%,植被+6%生物炭(C10+C11,面积2 m²)减沙率在10°和15°坡面下分别为15.58%和52.75%,但在20°坡面减沙率为负值,表明植被覆盖对施加生物炭坡面整体上具有消减作用,但植被措施对施加生物炭坡地泥沙的消减作用存在一定的承载限度,在陡坡条件下其拦沙效果减弱甚至失效。

2.2 不同坡度下不同措施磷素流失特征

图3为不同坡度下不同措施TP浓度随降雨历时

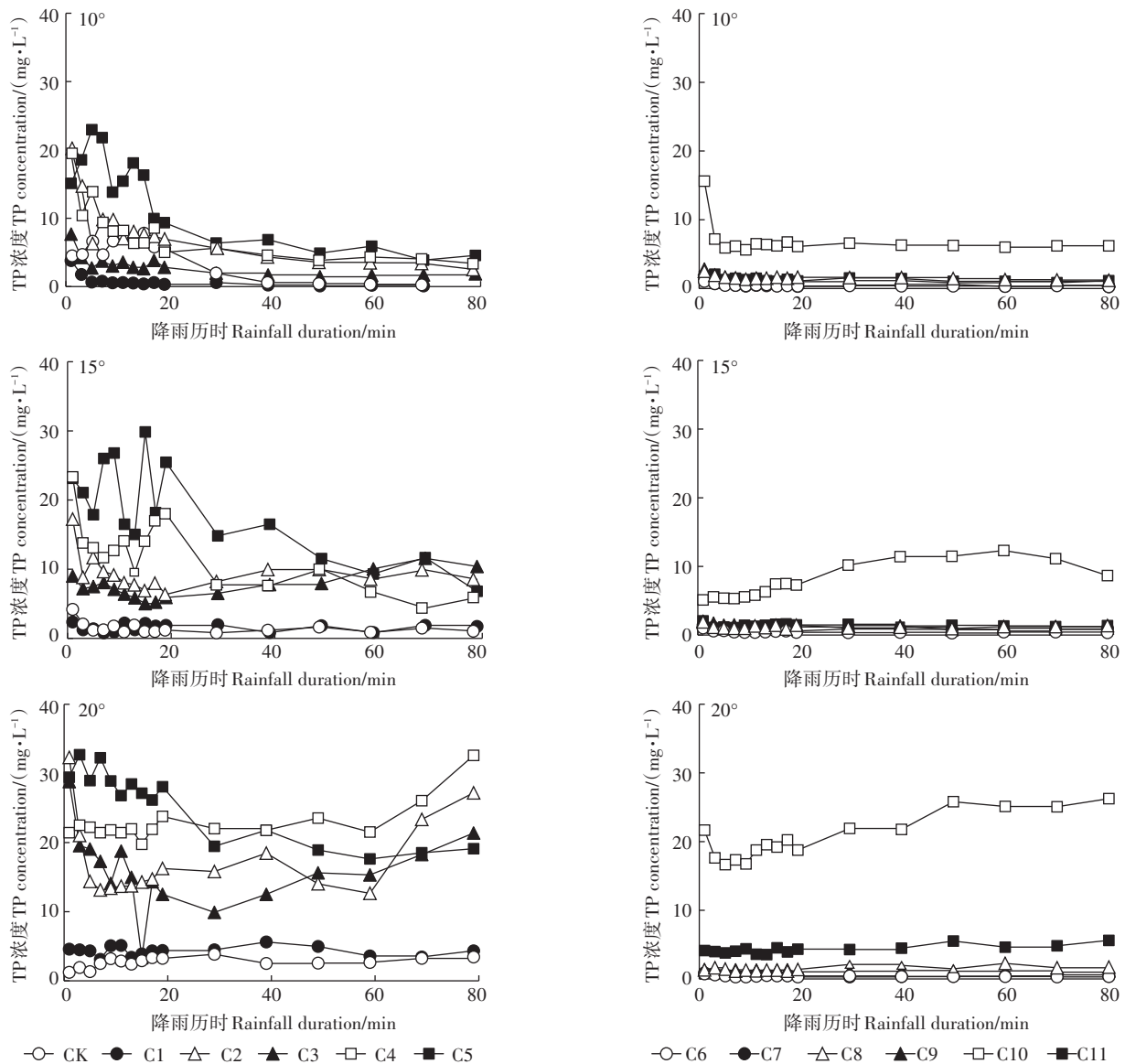


图3 不同坡度下不同措施总磷浓度变化过程

Figure 3 Dynamics of TP concentration of different measures under different slopes

的变化过程。从图中可以发现,在10°、15°裸坡下,不同措施TP流失过程与产沙趋势大致相同,均在产流初期20 min内迅速降低,最后趋于平稳,且20°下C2~C5的TP浓度在产流前20 min内先降低,之后开始波动上涨。相比于裸地坡面,植被覆盖组(C6~C9、C11)TP浓度较低,浓度稳定值集中在1~1.5 mg·L⁻¹,且TP浓度随坡度增大变幅很小,表明植物覆盖能有效调控TP浓度,且可降低由于坡度升高而造成TP浓度增大的风险。由图3可见,3个坡度下C10组TP浓度均远高于其他植被措施组,且TP浓度随坡度增大呈增大趋势,表明受坡度增大影响,植被措施对6%生物炭含量坡面磷素流失的消减作用逐渐减弱。

由表3可知,以累积TP流失量小于CK组为减磷判别标准,10°、15°和20°下不同措施组累积TP流失量从小到大依次为C1<C7<CK、C7<C6<C8<C9<CK、C7<C6<C9<C8<CK,表明缓坡上布设横垄(C1)、陡坡下设置植被覆盖(C6)或将其与横垄、3%BC二者结合或三者混施(C7、C8和C9)均能减少坡面磷素流失。

从不同裸坡坡面的坡度来看,10°、15°和20°下裸坡累积TP流失量(面积6 m²)分别为211.55、321.57 mg·m⁻²和750.00 mg·m⁻²,表明裸坡累积TP流失量随坡度增加而增大($P=0.001<0.05$)。从不同耕作方式来看,裸坡+平作累积TP流失量(CK+C2+C4,面积3 m²)在10°、15°和20°下分别为255.63、272.78 mg·m⁻²和757.95 mg·m⁻²,而裸坡+横垄TP流失量(C1+C3+C5,面积3 m²)分别为167.46、370.36 mg·m⁻²和742.06 mg·m⁻²,磷素流失趋势表现为两种耕作方式的磷素流失量均随坡度增大而增大,且横垄措施在缓坡条件下消减磷素效果显著,磷素消减率在10°坡面上达到34.49%,但随着坡度增大,消减效果减弱或者失效。从不同生物炭含量来看,0%生物炭组(CK+C1)、3%生物炭组(C2+C3)和6%生物炭组(C4+C5)的磷素流失量(面积2 m²)在10°下分别为19.57、153.12 mg·m⁻²和461.96 mg·m⁻²,在15°下分别为61.87、389.69 mg·m⁻²和513.15 mg·m⁻²,在20°下分别为189.10、924.18 mg·m⁻²和1 136.72 mg·m⁻²,可知不同坡度下裸坡磷素流失量与生物炭含量之间存在显著正相关关系($P=0.021<0.05$),表明施加生物炭加剧了裸坡磷素流失,且磷素流失量随坡度的增大而增大。相较于施加生物炭坡面(C2、C4),在此基础上添加横垄措施(C3、C5)尽管能起到消减磷素流失的作用,但消减能力随生物炭含量的增大而减弱,以10°裸坡为例,当生物炭含量由3%(C2)提高到6%(C4)时,横垄减磷率由

50.77%(C3)降至25.49%(C5)。

在植被坡面上,除C10累积TP流失量高于C4以外,其他植被措施组(C6~C9、C11)累积TP流失量均小于对应裸地组(CK~C3、C5, $P=0.021<0.05$),这表明植被覆盖能有效控制磷素流失。从不同坡度来看,10°、15°和20°植被坡面累积TP流失量(面积6 m²)分别为121.25、87.78 mg·m⁻²和269.14 mg·m⁻²,均小于相同坡度下裸地累积TP流失量,各坡度对应的磷素消减率分别为42.69%、72.10%和64.12%,表明植被措施在15°上消减磷素效果最好,这与其减沙规律一致。在植被覆盖基础上添加不同耕作措施会影响坡地磷素流失,10°、15°和20°下植被+平作累积TP流失量(C6+C8+C10,面积3 m²)分别为187.90、122.77 mg·m⁻²和408.69 mg·m⁻²,植被+横垄累积TP流失量(C7+C9+C11,面积3 m²)分别为54.60、52.78 mg·m⁻²和129.58 mg·m⁻²,各坡度下植被+横垄措施的减磷率分别为70.94%、57.01%和68.29%,说明植被覆盖和横垄措施结合可以进一步减少TP流失,但减磷效应随坡度的增大而减弱。从不同生物炭含量来看,不同坡度下植被+3%生物炭(C8+C9,面积2 m²)磷素消减率分别为46.18%、87.05%和88.03%,植被+6%生物炭(C10+C11,面积2 m²)磷素消减率分别为48.42%、63.73%和40.77%,由此可见植被措施对施加生物炭的坡面均具有固磷作用,除陡坡条件下高生物炭含量坡面的磷素消减能力下降以外,整体上植被措施对施加生物炭坡面的减磷率随坡度的增大而增大。

2.3 不同坡度下不同措施磷素流失形态特征

径流流失的磷素主要分为溶解态磷素(DP)和颗粒态磷素(PP),其中颗粒态磷素含量由总磷流失量与溶解态磷素流失量相减得到。图4为3种坡度下不同水土保持措施磷素流失形态比例构成,从磷素流失形态构成特征来看,多数措施情景下裸坡PP流失量占据TP流失量80%以上,这表明黄绵土裸坡磷素在径流中主要以颗粒态形式流失,这与大部分研究结果一致^[11]。从不同坡度来看,10°、15°、20°坡面下总PP/TP比例分别为95.39%、97.43%和98.34%,表明裸地坡面PP/TP比例随坡度的增大而增大,以CK组为例,坡面由10°增大到20°时,PP/TP比例由80.16%上升到89.11%,最后增至95.39%。从不同生物炭含量来看,施加3%、6%生物炭的裸地和植被坡面(C3~C5、C8~C11)PP/TP比例均高于同条件下0%生物炭组(CK~C1、C6~C7),且比例随坡度的增大而增大。从不同耕作方式来看,缓坡条件下坡面设置横垄措施能

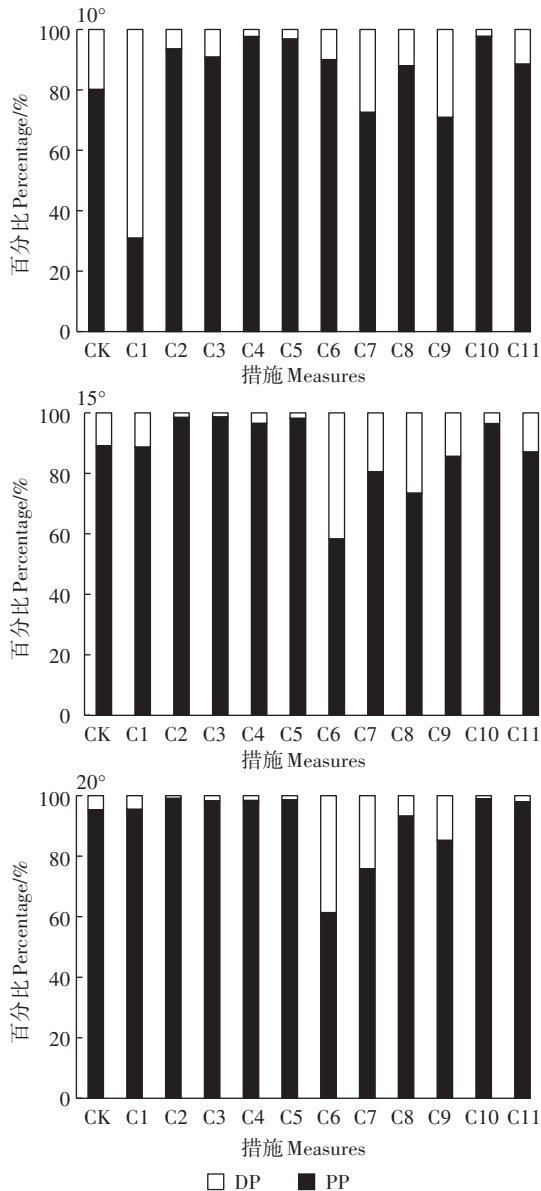


图4 不同坡度下不同措施磷素比例构成

Figure 4 The phosphorus forms of different measures under different slopes

显著降低 PP/TP 比例,但随着坡度增大,横垄裸坡 PP/TP 比例与平作裸坡 PP/TP 比例差异性不大,以 C1 组为例,10°时 C1 组 PP/TP 比例(30.89%)远低于 CK 组(80.16%),在 15°时 C1 组 PP/TP 比例(88.64%)略小于 CK 组(89.11%),而在 20°时 C1 组 PP/TP 比例(95.45%)与 CK 组(95.39%)基本持平,表明横垄措施对 PP/TP 比例的降低作用随坡度的增大而减弱。从不同下垫面条件来看,15°和 20°下植被坡面(C6~C11) PP/TP 比例范围分别为 58.31%~96.46% 和 61.33%~98.96%,小于同坡度下裸地坡面(C1~C5) PP/TP 比例范围 88.64%~98.62% 和 95.39%~99.06%,表明植被覆

盖措施在陡坡条件下仍能有效降低 PP/TP 比例。

3 讨论

本研究采用室内人工模拟降雨试验,探究 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下不同坡度(10°、15°、20°)、不同下垫面条件(裸地、植被覆盖)、不同生物炭施加量(0%、3%、6%)、不同耕作方式(平作、横坡垄作)及其组合条件下黄绵土坡地泥沙及磷素流失规律,以期为黄土高原水土保持措施优化配置提供科学依据。

研究发现在恒定雨强下,10°和 15°裸坡不同措施产沙率与 TP 浓度变化规律相似,均在产流 20 min 前迅速减少,随后趋于稳定。这是因为在降雨前期时,裸坡表层土壤颗粒及物质比较丰富,受雨滴击溅作用易随径流大量流失,故磷素容易从土壤中解吸出来并随径流向底部迁移,导致产流初期产沙率和 TP 浓度较高^[12]。随着降雨历时的延长,表层土壤颗粒在雨滴的不断夯实作用下形成地表结皮,导致水流挟带运移泥沙的能力减弱,因此产沙率逐渐下降并趋于稳定。与此同时,在结皮的保护作用下,雨水冲刷能力和土壤磷素吸附解吸反应逐渐稳定,故径流中 TP 浓度趋于平稳。在 20°条件下 C2~C5 产沙率先降低,于 20 min 后波动上涨,这可能是受生物炭异质性影响,导致施加生物炭坡面的结皮土质较为松散,在陡坡条件下易受径流冲刷而最先被破坏,故在降雨后期产沙率不降反升。裸坡产沙量和 TP 流失量均随着坡度的增大而增大,且均存在显著差异性($P < 0.05$),这可能是因为坡度增大导致径流重力沿坡面方向分力增大,从而加大了径流流速及动能,使得雨水入渗量减少,挟沙能力增强;此外坡地土体重心也随坡度增大而升高,导致土壤稳定性随之降低,使得土壤可蚀性增强^[13],为土壤侵蚀提供了丰富的物质来源,因此坡度越陡,坡面泥沙流失越多^[14]。由于磷素流失以颗粒态磷素流失方式为主,而颗粒态磷素一般吸附固结在土壤颗粒表面,与坡地土壤侵蚀程度息息相关,故磷素流失量也与坡度呈正相关关系,这与乔闪闪等^[15]对黄绵土坡面氮磷流失得出的结论一致,即产沙量与总磷流失量均随坡度的增加而显著增大。

研究发现植被覆盖可有效降低产沙率波动幅度,显著减少泥沙及 TP 流失,这主要受两方面影响:一是植物叶面减缓了雨滴对表土的溅蚀作用,同时植物茎秆还起到滞缓径流,截留泥沙的作用;二是植被地下根系改善了土壤结构,增强了坡面入渗能力^[16],且根系还具有固土护坡、吸收磷素的作用^[17],故在实际条

件允许范围内,设置植被覆盖措施是减少坡地泥沙及磷素流失的有力举措之一。分析本试验磷素数据可知,10°坡面下C6产沙量小于CK,但磷素消减效率却为负值,这可能是由于此次试验是植被坡面首次进行降雨试验,生长在黑麦草庇荫处的绿藻类生物结皮不仅提高了土壤磷素含量^[18],同时还随径流冲刷进入到待测水样中,导致测得磷素含量数值偏大。

研究发现坡面泥沙累积量与磷素流失量和生物炭施加量呈正相关,这与Zhang等^[19]研究结果相似,这可能与本试验生物炭施加剂量较大有关。吴媛媛等^[20]对黄绵土可蚀性的研究发现,施加7%含量的生物炭即可增加坡面约1/3侵蚀泥沙量。这是因为过量生物炭的加入一方面增大了坡面土壤孔隙度,导致土壤密度降低,另一方面生物炭的异质性削弱了坡面表土颗粒的黏结程度,导致坡面在暴雨冲刷下更易被侵蚀^[21-22];同时生物炭自身含有大量的氮磷元素,大量施用生物炭使得土壤磷素基值增大,导致测得的磷素流失值偏大^[23],因此在实际农业生产中,要针对土壤性质、地形因素等具体条件合理施用生物炭。对比于裸地坡面,植被措施对施加3%生物炭坡面的泥沙控制效应较好,但当生物炭含量由3%增大到6%含量时,以C10为代表的高生物炭含量植被坡面产沙量和磷素流失量剧增,甚至在陡坡条件下侵蚀量高于裸坡对照组,这是因为除了坡度、生物炭含量增大会加剧坡面土壤侵蚀和磷素流失以外,施加过量生物炭还会抑制黑麦草幼苗生长发育^[24],导致根系发育缓慢甚至烂根,多因素共同作用导致植被减沙固磷能力降低,从而造成坡地泥沙及养分流失加剧,因此在植被坡面上也需要合理选择生物炭用量。

研究还发现横垄措施只在缓坡上降低泥沙及磷素流失作用显著,这与王海雯^[25]对不同坡度下紫色坡地横垄水土保持效应研究结果一致,即横垄在缓坡上易发生垄面漫流现象,在陡坡上易出现断垄现象而导致坡地水土流失加剧,并推测横垄措施临界坡度在15°~20°。这是因为在低坡度条件下,径流易被垄丘拦截并滞留在垄沟内,增大了土壤入渗量,进而起到蓄水拦沙作用^[26-27]。但随着坡度的增大,拦蓄的雨水对垄面侧向压力增大,同时土体重心也随坡度升高而上升,使得垄丘稳固性降低;坡度的增大也使得径流流速加快,对垄丘冲击能力增强,使得陡坡上的横垄更易垮塌毁坏,造成坡面产沙量增大^[28]。虽然本次试验未出现断垄现象,但随着坡度的增大,垄沟蓄水能力降低,当汇集水量超过积蓄能力时,诱使垄侧渗漏

和漫流现象发生^[29],大量径流挟沙下泻造成坡面侵蚀加剧,导致磷素流失量加大。但在陡坡条件下,横垄与植被覆盖搭配使用仍能有效减缓侵蚀与磷素流失,且消减效率均大于50%,故针对不同坡度坡面应该合理搭配选择水保措施,这与多年来治理坡耕地侵蚀总结得出的经验一致,即8°以下建议设置横垄措施,8°~15°时应将坡耕地修整为水平梯田,15°以上采取退耕还林^[30]。

由于本次试验施加生物炭含量较大,导致本试验只能探究生物炭对坡面侵蚀的不利影响,后续研究应对0~3%范围生物炭含量设置多组水平进行对比,以探究减缓黄绵土坡面侵蚀的最佳生物炭用量。虽然本试验按照野外实际土壤容重进行了土槽填装,但与野外实际降雨环境仍有差别,且在试验过程中没有涉及到草根根系对磷素的吸收利用和转化过程,因此后续试验需结合黑麦草全生育期水土流失特征,并统计草被地表和根系生物量,进一步深入探究植被措施对坡面侵蚀与磷素流失的阻控机理。

4 结论

(1)在降雨强度 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件下,不同措施下10°裸坡的产沙率和TP浓度变化规律基本一致,均在产流20 min前迅速减少,随后趋于稳定。随着坡度增大,20°裸坡下施加生物炭组(C2~C5)呈先降低,达到最低值后显著升高的变化趋势。3个坡度下植被措施组(C6~C9)产沙及磷素流失过程较为平缓,且稳定值小于裸坡对照组。

(2)不同坡度下C1、C6、C7、C8、C9具有有效减缓黄绵土坡面土壤侵蚀和阻控磷素流失的作用。3个坡度下施加生物炭均会加剧坡面土壤及磷素流失,因此要杜绝盲目、过量施用生物炭。设置横垄和植被覆盖措施能明显减少泥沙和磷素流失,但横垄对裸地坡面消减作用随坡度升高而减弱,而植被覆盖措施在3个坡度上均能有效控制土壤侵蚀及磷素流失,且在15°下阻控效果最好,消减效率可达70%以上。在植被覆盖与横垄措施结合的双重作用下,不同坡度下坡地泥沙和磷素流失均得到了有效控制,且消减效率达50%以上,因此在实际农业生产过程中建议将横垄措施与植物措施搭配布设。

(3)黄绵土坡面径流磷素流失以颗粒态为主,多数措施情景下颗粒态磷流失量占比高于80%,且PP/TP比例随着坡度的增加而增大。同一坡度下坡面施加生物炭会增大PP/TP比例,缓坡横垄对降低PP/TP比

例效果最佳,可低至30.89%,而植被覆盖在不同坡面上均能降低PP/TP比例,最低可达58.31%。

参考文献:

- [1] 储诚山,刘伯霞. 陕西黄土高原生态环境问题及生态保护修复[J]. 开发研究, 2019(5): 125-131.
CHU Cheng-shan, LIU Bo-xia. Study on the ecological and environmental problems and countermeasures of ecological conservation and restoration in Shaanxi Provincial Loess Plateau[J]. *Research on Development*, 2019, (5): 125-131.
- [2] 李宗善,杨磊,王国梁,等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
LI Zong-shan, YANG Lei, WANG Guo-liang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [3] 高海东,李占斌,李鹏,等. 基于土壤侵蚀控制制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1503-1515.
GAO Hai-dong, LI Zhan-bin, LI Peng, et al. The capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [4] 龚世飞,丁武汉,肖能武,等. 丹江口水库核心水源区典型流域农业面源污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2816-2825.
GONG Shi-fei, DING Wu-han, XIAO Neng-wu, et al. Characteristics of surface runoff and agricultural non-point source pollution in the core water source area of the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2816-2825.
- [5] 吕宏虹,宫艳艳,唐景春,等. 生物炭及其复合材料的制备与应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1429-1440.
LÜ Hong-hong, GONG Yan-yan, TANG Jing-chun, et al. Advances in preparation and applications of biochar and its composites[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1429-1440.
- [6] 褚军,薛建辉,金梅娟,等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 409-415.
CHU Jun, XUE Jian-hui, JIN Mei-juan, et al. Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural nonpoint source pollution[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4): 409-415.
- [7] 罗键,郑子成,李廷轩,等. 横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 66-72.
LUO Jian, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan, et al. Multifractal characteristics of surface microtopography and its influence on sediment yield on slope of cross ridge[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 66-72.
- [8] 谢亚茹,程金花,李语晨,等. 黄土区土壤结皮和垄高对坡面产流产沙的影响[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(10): 42-49.
XIE Ya-ru, CHENG Jin-hua, LI Yu-chen, et al. Effect of soil crust and ridge height on runoff producing and sediment yield in loess area [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(10): 42-49.
- [9] 王宇,房含,李明欢,等. 黑土缓坡耕地植被过滤带的拦蓄特征[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(3): 313-315.
WANG Yu, FANG Han, LI Ming-huan, et al. Interception characteristics of vegetation filter strips on black soil sloping farmland[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2017, 39(3): 313-315.
- [10] 王丽,王力,王全九,等. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2171-2178.
WANG Li, WANG Li, WANG Quan-jiu, et al. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment and nitrogen and phosphorus losses from losses from slope cropland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2171-2178.
- [11] 陈玲,宋林旭,崔玉洁,等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 49-55.
CHEN Ling, SONG Lin-xu, CUI Yu-jie, et al. Characteristics of phosphorus loss in sloping arable land of yellow-brown soil under artificial rainfall test[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 49-55.
- [12] 关荣浩,马保国,黄志僖,等. 冀南地区农田氮磷流失模拟降雨雨试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 581-589.
GUAN Rong-hao, MA Bao-guo, HUANG Zhi-xi, et al. Experimental study of simulated rainfall on nitrogen and phosphorus loss from farmland in Southern Hebei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 581-589.
- [13] Ao C, Yang P, Ren S, et al. Efficacy of granular polyacrylamide on runoff, erosion and nitrogen loss at loess slope under rainfall simulation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 490.
- [14] 苏远逸,李鹏,任宗萍,等. 坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 118-122.
SU Yuan-yi, LI Peng, REN Zong-ping, et al. Effect of slope gradient on the process of runoff and sediment yield and water-sediment relation on the loess slope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2): 118-122.
- [15] 乔闪闪,吴磊,彭梦玲. 人工模拟降雨条件下黄土坡面水-沙-氮磷流失特征[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1728-1735.
QIAO Shan-shan, WU Lei, PENG Meng-ling. Simulation of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus loss on bare loess sloping land using simulated rainfall[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(10): 1728-1735.
- [16] 常松涛,黄少燕,查轩,等. 雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 58-63.
CHANG Song-tao, HUANG Shao-yan, ZHA Xuan, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation coverage on runoff and sediment yield on red soil slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 58-63.
- [17] 余冬立,阿力木·阿布来提,陈倩,等. 不同入流条件下植被过滤带对坡面径流氮、磷的拦截效果[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3425-3432.
SHE Dong-li, ALIMU A-bu-lai-ti, CHEN Qian, et al. Effects of vegetative filter strip on overland flow nitrogen and phosphorus intercepting under different inflow conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3425-3432.
- [18] 张国秀,赵允格,许明祥,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤磷素有

- 效性及碱性磷酸酶活性的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18(3):621-628.
- ZHANG Guo-xiu, ZHAO Yun-ge, XU Ming-xiang, et al. Impacts of biological soil crust on availability of phosphorus and phosphatase activity in hilly regions of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(3):621-628.
- [19] Zhang F, Huang C, Yang M, et al. Rainfall simulation experiments indicate that biochar addition enhances erosion of loess-derived soils [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(18):2272-2286.
- [20] 吴媛媛, 杨明义, 张风宝, 等. 添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):81-92.
- WU Yuan-yuan, YANG Ming-yi, ZHANG Feng-bao, et al. Effect of biochar application on erodibility of plow layer soil on loess slopes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):81-92.
- [21] 魏永霞, 冯鼎锐, 刘志凯, 等. 生物炭对黑土区坡耕地水土保持及大豆增产效应研究[J]. 节水灌溉, 2017(5):37-41.
- WEI Yong-xia, FENG Ding-rui, LIU Zhi-kai, et al. The effect of biochar on soil and water conservation and crop yield of the slope farmland in black soil region[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(5):37-41.
- [22] 吴昱, 刘慧, 杨爱峥, 等. 黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5):287-294.
- WU Yu, LIU Hui, YANG Ai-zheng, et al. Influences of biochar supply on water and soil erosion in slopping farm-land of black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5):287-294.
- [23] 张广格, 邓春生, 张燕荣, 等. 生物炭对土壤拦截外源氮磷等污染物效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9):1782-1789.
- ZHANG Guang-ke, DENG Chun-sheng, ZHANG Yan-rong, et al. Effect of biochar on interception of sewage nitrogen, phosphorus and COD[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1782-1789.
- [24] 武梦娟, 王桂君, 许振文, 等. 生物炭对沙化土壤理化性质及绿豆幼苗生长的影响[J]. 生物学杂志, 2017, 34(2):63-67.
- WU Meng-juan, WANG Gui-jun, XU Zhen-wen, et al. The impact of biochar on mung bean growth and soil physicochemical properties of sandy soil[J]. *Journal of Biology*, 2017, 34(2):63-67.
- [25] 王海雯. 紫色土丘陵区横坡耕作措施在不同坡度上的水土保持性研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32):14264-14266.
- WANG Hai-wen. Research on the soil and water conservation of purple soil in hilly area through the cross-slope farming measure[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(32):14264-14266.
- [26] Yang S, Han R, Xing L, et al. Effect of slope farmland soil and water and soil nitrogen and phosphorus loss based on different crop and straw applications and ridge patterns in the basin of the main stream of the Songhua River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1):42-47.
- [27] Liu Q J, An J, Wang L Z, et al. Influence of ridge height, row grade, and field slope on soil erosion in contour ridging systems under seepage conditions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 147:50-59.
- [28] 刘前进. 棕壤横垄土壤侵蚀特征及其影响因素[D]. 长沙: 华中农业大学, 2014:57-58.
- LIU Qian-jin. Erosion of brown soil in contour ridging systems and its influencing factors[D]. Changsha: Huazhong Agricultural University, 2014:57-58.
- [29] 安娟, 高开通, 丁柳, 等. 横坡垄作下雨型对褐土坡面细沟侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1):32-38.
- AN Juan, GAO Kai-tong, DING Liu, et al. Effects of storm patterns on rill erosion process of cinnamon soil hillslope in a contour ridge system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1):32-38.
- [30] 徐勇, 党丽娟, 汤青, 等. 黄土丘陵区坡改梯生态经济耦合效应[J]. 生态学报, 2015, 35(4):1258-1266.
- XU Yong, DANG Li-juan, TANG Qing, et al. Ecological-economic coupling effects of transforming slope farmland to terraces in the hilly-gully region of Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4):1258-1266.