

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.008.

周靖超, 张锡洲, 郑子成, 等. 夏玉米种植条件下黄壤坡耕地径流及磷素流失特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 81-86.
ZHOU Jingchao, ZHANG Xizhou, ZHENG Zicheng, et al. Characteristics of Runoff and Phosphorus Loss from Sloping Farmland in Yellow Soil Region Under the Condition of Summer Maize Growth[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 81-86.

夏玉米种植条件下黄壤坡耕地径流及磷素流失特征

周靖超, 张锡洲, 郑子成, 李廷轩

(四川农业大学 资源学院, 成都 611130)

摘 要:为揭示自然降雨条件下夏玉米生育期内黄壤坡耕地径流及磷素流失规律,采用野外径流小区观测试验与室内分析相结合的方法,探讨了自然降雨条件下地表径流、壤中流及其总磷的流失特征。结果表明:(1)顺坡垄作径流量显著高于其余两种耕作措施,其径流量分别为平作和横坡垄作的 1.13 倍和 1.17 倍。横坡垄作径流磷素流失总量显著低于其余两种耕作措施,其总磷流失量分别为平作和顺坡垄作的 0.79 倍和 0.75 倍。(2)随着玉米生育期的推进,径流量呈增加的变化趋势,表现为成熟期>抽雄期>拔节期、苗期。相较于苗期,成熟期径流量增加了 9.35 倍,径流磷素流失量增加了 12.58 倍。(3)地表径流、0—20 cm 土层壤中流和 20—40 cm 土层壤中流量分别占径流总量的 78.36%,10.20%,11.44%,其磷素流失量分别占径流磷素流失量的 75.10%,9.90%,15.00%。综上,研究区以地表径流为磷素流失的主要途径,且在玉米成熟期达到最大值,横坡垄作措施对于坡面产流及磷素流失具有较好的控制效果。

关键词:地表径流; 壤中流; 磷素流失; 夏玉米; 耕作措施

中图分类号:P333; S153.6 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2023)02-0081-06

Characteristics of Runoff and Phosphorus Loss from Sloping Farmland in Yellow Soil Region Under the Condition of Summer Maize Growth

ZHOU Jingchao, ZHANG Xizhou, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan
(College of Resouces, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract:To reveal the regulation of runoff and phosphorus loss in sloping farmland of yellow soil under natural rainfall with the condition of summer maize growth, runoff plots set in the field were conducted to investigate the characteristics of surface runoff, interflow and total phosphorus loss under natural rainfall. The results showed that: (1) the runoff of downslope ridge planting was significantly higher than that of cross planting and flat planting, accounting for 1.13 and 1.17 times higher than that of flat planting and cross planting, respectively; total phosphorus loss of cross ridge planting was significantly lower than that of the other two tillage measures, accounting for 79% and 75% of that of flat planting and down slope planting, respectively; (2) with the growth of maize, the amount of runoff showed an increasing tendency (mature stage>tasseling stage>elongation stage and seedling stage); compared with the seedling stage, the runoff and the phosphorus loss of mature stage increased by 9.35 and 12.58 times, respectively; (3) surface runoff, interflow in 0—20 cm and 20—40 cm accounted for 78.36%, 10.20% and 11.44% of runoff, respectively, and their phosphorus loss accounted for 75.10%, 9.90% and 15.00% of the total phosphorus loss, respectively. The surface runoff contributed mainly to phosphorus loss, which reached up to maximum at mature stage in the study area. It was efficient to decrease runoff and phosphorus loss by ridge planting.

Keywords: surface runoff; interflow; phosphorus loss; summer maize; tillage measures

磷素是造成水体富营养化的主要限制因素之一^[1-2]。近年来,耕地利用强度的加大以及磷肥施用的增加,造成坡耕地的水土流失及其所引发的面源污染风险日趋严重。坡耕地是水土流失的主要策源地^[3],坡面水土资源及养分流失是一个复杂的动态变化过程,受降雨情况、地形、土壤质地、植被覆盖以及耕作措施等影响^[4]。等高耕作常被视为控制水土流失的有效措施之一,因其简便易行被广泛应用^[5]。有研究表明,自然降雨条件下横坡垄作的径流量较顺坡垄作减少 18.32%^[6],磷素流失量可减少 53.88%^[7]。植被可增加地表覆盖、减少降雨动能并减缓坡面土壤侵蚀^[8],Zhang 等^[9]研究结果表明植被覆盖度不同,其养分流失各异。坡耕地养分流失,不仅导致耕地土壤质量退化,同时也易于增加水体富营养化潜在风险^[10]。三峡库区坡耕地研究表明,地表径流是磷素流失的主要途径^[11],但壤中流和地表径流量特征差异显著,有研究发现壤中流量占总径流量的比例超过 50%,势必会影响到养分的流失^[12-13]。黄壤作为四川坡耕地第二大土壤类型,占全省坡耕地土壤面积的 12.0%^[14],主要分布于四川盆地东部及其边缘的低山地带,水土流失较为严重^[15-16]。玉米作为黄壤坡耕地主栽作物之一,具有生育期与雨季重叠的特点。目前黄土高原区、紫色丘陵区、南方红壤区等养分流失研究较多,而针对山地黄壤的相关研究较少,且四川盆周山区的研究甚少,尤其是自然降雨条件下坡耕地磷素流失特征尚不明确。因此,本研究以黄壤坡耕地为对象,探讨自然降雨条件下玉米种植条件下坡耕地地表径流及壤中流变化特征,分析磷素流失量与径流间的关系,明晰黄壤坡耕地磷素流失的主要途径,以期服务于山地黄壤区坡耕地水土流失的有效防控。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川农业大学教学科研园区(31°00′34″N,103°36′52″E),隶属于四川省都江堰市灌口镇。该区域属亚热带季风性湿润气候,年均温约为 15.1℃,年平均降雨量约为 1 218.4 mm,属华西雨屏区,全年降雨充沛且主要集中于 4—8 月。研究区为山地地貌,主栽作物为玉米和油菜。供试土壤为黄壤,基本理化性质:砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 36.30%,22.50%,41.20%,土壤 pH 值 6.92,有机质含量 20.16 g/kg,全氮含量 1.46 g/kg,碱解氮含量 26.18 mg/kg,有效磷含量 67.92 mg/kg,速效钾含量 69.19 mg/kg。

1.2 研究方法

1.2.1 试验小区布设 基于研究区实地调查和坡耕地分布特点,径流小区为长 4 m,宽 2 m,面积 8 m²,坡度设置为 15°,可用于收集地表径流,以及 0—20,20—40 cm 壤中流。依据当地农耕习惯,布设横坡垄作、平作和顺坡垄作 3 种常规耕作措施,每一耕作措施重复 3 次,共计 9 个小区(图 1)。

供试玉米品种为当地主栽的“资玉 22”,于 2020 年 4 月 8 日播种,根据玉米生长规律及该品种玉米生长特征,将玉米生育期划为苗期(4 月上旬—5 月下旬)、拔节期(5 月下旬—6 月中旬)、抽雄期(6 月中旬—7 月下旬)和成熟期(7 月下旬—8 月下旬)。施肥情况为:氮肥(N)270 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)90 kg/hm²,钾肥(K₂O)75 kg/hm²,在玉米播种时将磷肥和钾肥以基肥的形式施入,氮肥在拔节期进行追施,其他管理环节均按当地农耕习惯进行。

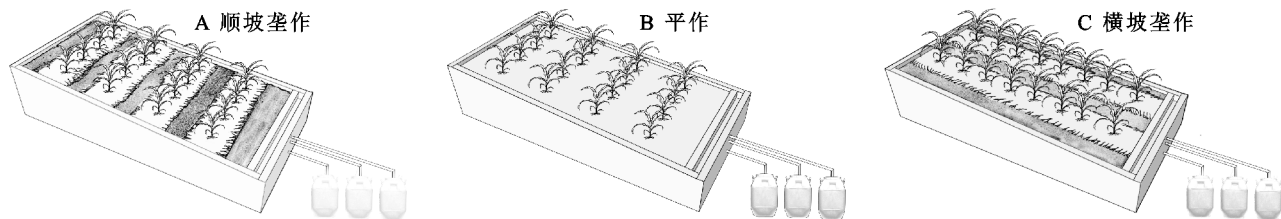


图 1 耕作措施示意图

1.2.2 样品采集 降雨资料:在雨量筒中收集降雨量,在降雨结束后测定。地表径流:地表径流在集水槽内通过直径为 3.2 cm 的 PVC 管在径流收集桶收集,样品在产流结束后采集,待测。壤中流:壤中流在小区 20 cm 和 40 cm 土层处,通过直径为 3.2 cm 的 PVC 管在径流收集桶中收集,壤中流样品于产流结束后收集,待测。

1.2.3 测定项目及方法 降雨资料:雨量筒和人工观测计时法测定。地表径流:采用体积法测定。壤中流:分别于径流小区 20 cm 和 40 cm 土层收集壤中流,采用体积法测定。

同时收集地表径流和壤中流于 250 ml 塑料瓶中,加硫酸调至 pH 值≤2,存放于冰箱(<4℃)冷冻,用于磷素的测定,采用 CleverChem380 全自动间断

化学分析仪进行测定^[17-18]。

1.2.4 数据处理及分析

(1) 径流量:

$$V_{\text{径流}} = \frac{M_{\text{水样}} - M_{\text{沙}}}{\rho_{\text{水}}}; M_{\text{沙}} = C \times V_{\text{浊}} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{径流}}$ 为径流量 (L/m^2); $M_{\text{水样}}$ 为每次采集的径流和泥沙水样的总质量 (g); $M_{\text{沙}}$ 为泥沙质量 (g); $\rho_{\text{水}}$ 为采集的径流水密度 (g/L); C 为采集的泥沙质量浓度 (g/L); $V_{\text{浊}}$ 为每次采集径流和泥沙水样的总体积 (L)。

(2) 总磷流失量:

$$P_{\text{总磷}} = C_{\text{总磷}} \times V_{\text{径流}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{总磷}}$ 为径流总磷流失量 (mg/m^2); $C_{\text{总磷}}$ 为测定径流总磷浓度 (mg/L); $V_{\text{径流}}$ 为径流量 (L/m^2)。

试验数据采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析, 选择 LSD 法进行多重比较, 采用 Origin 2018 和 Excel 2016 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 玉米种植条件下径流特征

2.1.1 玉米种植条件下降雨及地表径流产流特征

界定可导致研究区发生土壤侵蚀的降雨事件为侵蚀性降雨。玉米全生育期共监测到侵蚀性降雨 18 场, 其中最大降雨量和降雨强度为 273.27 mm 和 14.66 mm/h (本年监测期内, 侵蚀性降雨量为 1 038.7 mm), 分别出现在玉米成熟期和抽雄期 (图 2)。降雨特征直接影响到水土流失过程, 由图 3 可知, 随玉米生育期的推进, 其侵蚀性降雨以及地表径流量也随之增加, 地表径流变化范围介于 28.22~350.17 L, 占径流总量的 78.36%。各耕作措施坡面的地表径流量表现为成熟期>抽雄期>拔节期、苗期的趋势, 玉米苗期、拔节期和抽雄期的地表径流量均无显著差异, 仅在玉米成熟期表现为平作、顺坡垄作>横坡垄作, 其中, 顺坡垄作坡面及平作坡面的地表径流量均为横坡垄作的 1.08 倍。

2.1.2 玉米种植条件下壤中流产流特征 由图 4 可知, 就玉米生育期而言, 壤中流总体表现为成熟期>抽雄期、拔节期、苗期, 0—20 cm 和 20—40 cm 壤中流量分别占总径流量的 10.20%, 11.44%。由图 4A 可知, 0—20 cm 壤中流量变化范围为 3.77~48.80 L。玉米苗期和成熟期, 横坡垄作坡面的 0—20 cm 壤中流量显著小于其他耕作措施, 而玉米拔节期和抽雄期, 横坡垄作坡面的 0—20 cm 壤中流量则仅显著小于顺坡垄作坡面。就研究区玉米生育期而言, 其与地表径流量有着相似的趋势, 表现为成熟期>抽雄期>拔节期、苗期的趋势。由图 4B 可知, 20—40 cm 壤中流量

变化范围为 2.02~73.09 L。就耕作措施而言, 在玉米苗期, 20—40 cm 壤中流量在耕作措施间无显著差异, 随着玉米生育期的推进, 在玉米拔节期和成熟期表现为顺坡垄作>平作的趋势, 在拔节期表现为顺坡垄作、横坡垄作>平作, 其中平作坡面的 20—40 cm 壤中流量为横坡垄作的 0.94 倍, 为顺坡垄作的 0.48 倍。

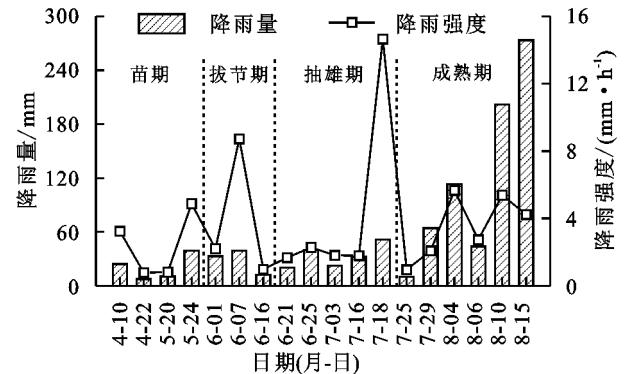
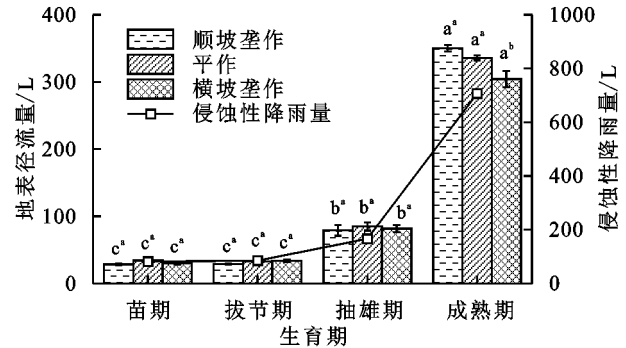


图2 玉米全生育期的降雨特点 (4月10日—8月15日)



注: 图柱上不同小写字母表示同一耕作措施不同生育期差异显著 ($p < 0.05$); 上标不同小写字母表示同一生育期不同措施间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

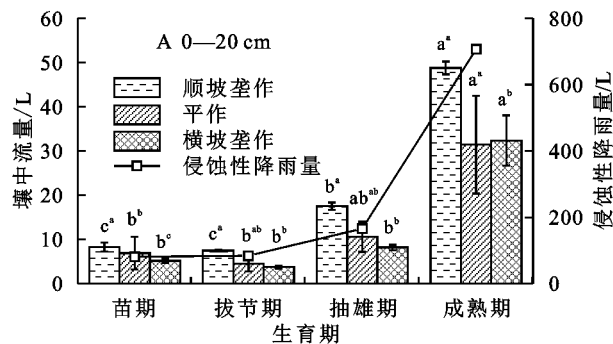
图3 玉米种植条件下黄壤坡耕地地表径流量变化特征

2.2 玉米种植条件下径流中总磷流失特征

2.2.1 玉米种植条件下地表径流总磷流失特征 由图 5 可知, 随着玉米生育期推进, 地表径流中总磷流失量也呈增加的变化趋势。玉米苗期、拔节期和抽雄期, 各耕作措施地表径流总磷流失量无显著差异, 这与地表径流量变化趋势相似; 玉米成熟期, 地表径流总磷流失顺坡垄作和平作>横坡垄作的趋势, 且顺坡垄作坡面总磷流失量分别为平作和横坡垄作坡面的 1.46 倍和 1.32 倍。就玉米生育期而言, 平作和横坡垄作坡面地表径流总磷流失均表现为成熟期>抽雄期>拔节期、苗期, 顺坡垄作坡面却表现为成熟期>抽雄期、拔节期、苗期。

2.2.2 玉米种植条件下壤中流总磷流失特征 由图 6 可知, 壤中流总磷流失各耕作措施坡面总体表现为成熟期>抽雄期、拔节期和苗期的趋势, 随着玉米生育期推进, 0—20 cm 及 20—40 cm 壤中流总磷流失量均呈增加的变化趋势, 分别占径流总磷流失量的

10.05%, 10.11%。由图 6A 可知, 玉米苗期、拔节期和成熟期, 各耕作措施间壤中流总磷流失量无显著差异; 玉米抽雄期壤中流总磷流失量则表现为横坡垄作坡面显著小于其他措施, 其总磷流失量分别为顺坡垄作



作和平作坡面的 0.59 倍和 0.71 倍。各耕作措施坡面壤中流总磷流失量均表现为成熟期>抽雄期>拔节期、苗期。由图 6B 可知, 玉米全生育期, 壤中流总磷流失量总体表现为顺坡垄作>横坡垄作的趋势。

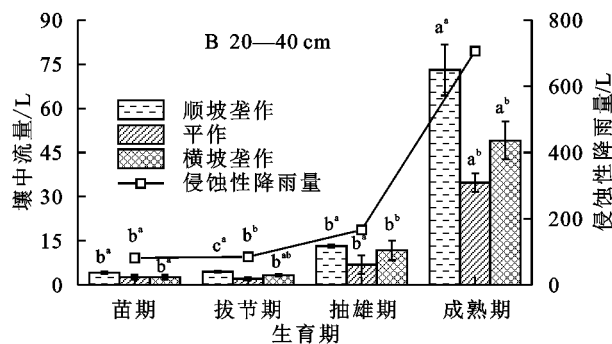


图 4 玉米种植条件下黄壤坡耕地壤中流量变化特征

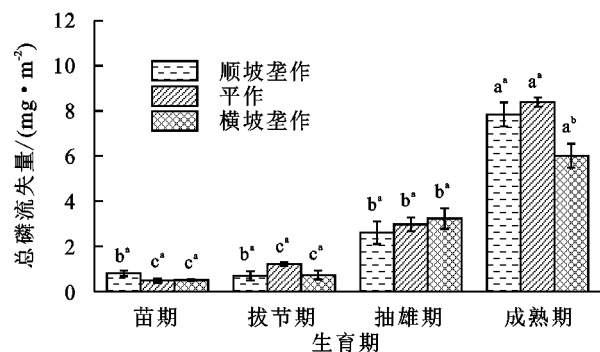
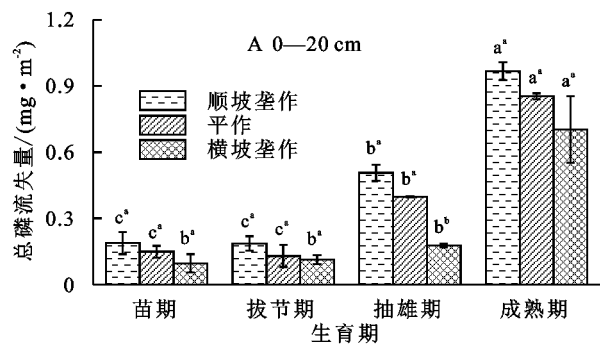


图 5 玉米种植条件下黄壤坡耕地地表径流总磷流失量变化特征



2.3 径流与总磷流失量的关系

由表 1 可知, 玉米全生育期地表径流占总磷流失比例介于 70.78%~90.23%。平作坡面, 通过地表径流流失的磷素在玉米拔节期最高; 横坡垄作和顺坡垄作坡面, 通过地表径流流失的磷素则在玉米抽雄期最高。玉米成熟期的顺坡垄作和横坡垄作坡面, 以及玉米拔节期的平作坡面, 20—40 cm 壤中流磷素流失量无明显的滞后和拖尾现象。

由图 7—8 可知, 总磷流失量与径流量、降雨量均具有较好的线性关系, 决定系数均大于 0.65, 拟合效果良好。在玉米全生育期内各耕作措施地表径流及壤中流磷素流失量, 均与径流量和降雨量呈极显著正相关。

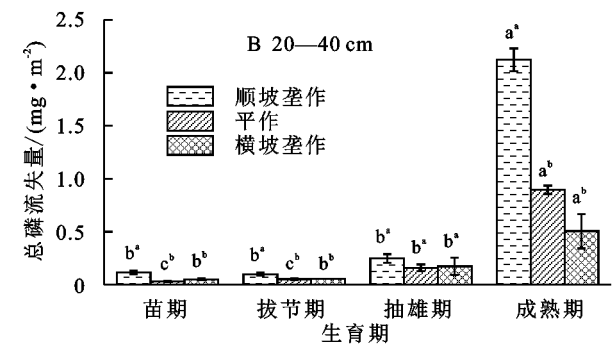


图 6 玉米种植条件下黄壤坡耕地壤中流总磷流失量变化特征

3 讨论

随玉米生育期推进, 径流量与磷素流失量也随之增加, 在玉米成熟期达最大值, 且显著大于其他生育期, 这可能是与研究区土壤性质和降雨特性相关。黄壤黏粒质量分数大, 稳渗速率高^[19], 本研究试验区位于华西雨屏区, 玉米成熟期的侵蚀性降雨量高达 706.7 mm, 占玉米种植条件下总侵蚀性降雨量的 68.03%, 产流方式以蓄满产流为主, 在成熟期刚好处于暴雨期, 且玉米成熟期叶片逐渐枯损, 叶面积指数开始减小, 玉米对于表土的保护能力减弱^[20], 故径流量增加。各耕作措施坡面地表径流量间表现为顺坡垄作、平作>横坡垄

作, 这是由于顺坡垄作由于其垄沟方向与水流方向一致, 为径流的循序汇集和流动提供了天然的通道, 加速了坡面地表径流的产生与流动^[21]; 横坡垄作改变了微地形, 增加了地表糙度, 有效拦截和分散坡面径流, 降低地表径流流速, 减缓了坡面土壤侵蚀^[22]。0—20 cm 及 20—40 cm 壤中流量均表现出顺坡垄作>平作、横坡垄作, 这可能与顺坡垄作垄面的土壤容重 $[(0.94 \pm 0.03) \text{ g/m}^3]$ 显著小于平作 $[(1.07 \pm 0.04) \text{ g/m}^3]$ 和横坡垄作 $[(1.09 \pm 0.02) \text{ g/m}^3]$, 使得顺坡垄作具有更好的下渗条件。有研究表明, 土壤容重改变了土壤的孔隙状况, 影响着水分入渗^[23]。

表 1 玉米种植条件下黄壤坡耕地不同流失途径占总磷流失比例及各途径流失通量

生育期	耕作措施	不同磷素流失途径占总磷流失比例/%			不同磷素流失途径流失通量/(mg·m ⁻²)		
		地表径流	壤中流 (0—20 cm)	壤中流 (20—40 cm)	地表径流	壤中流 (0—20 cm)	壤中流 (20—40 cm)
苗期	顺坡垄作	72.70	17.00	10.30	0.80	0.19	0.11
	平作	72.93	22.55	4.52	0.48	0.15	0.03
	横坡垄作	77.50	14.86	7.64	0.50	0.10	0.05
拔节期	顺坡垄作	70.78	19.13	10.09	0.69	0.19	0.10
	平作	87.05	9.32	3.63	1.21	0.13	0.05
	横坡垄作	81.30	12.65	6.05	0.73	0.11	0.05
抽雄期	顺坡垄作	77.54	15.10	7.36	2.60	0.51	0.25
	平作	84.25	11.28	4.47	2.97	0.40	0.16
	横坡垄作	90.23	4.95	4.82	3.23	0.18	0.17
成熟期	顺坡垄作	71.75	8.85	19.40	7.85	0.97	2.12
	平作	82.76	8.41	8.83	8.39	0.85	0.90
	横坡垄作	83.30	9.72	6.98	6.02	0.70	0.50

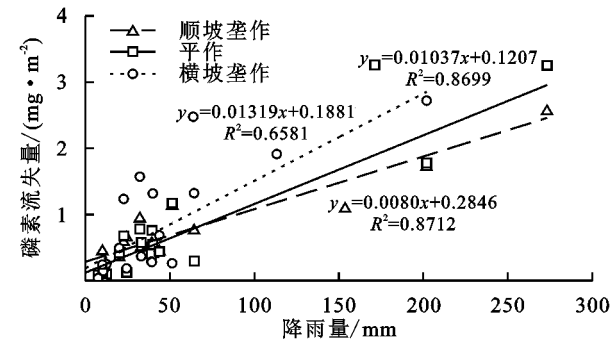


图 7 降雨量与坡面磷素流失量的关系

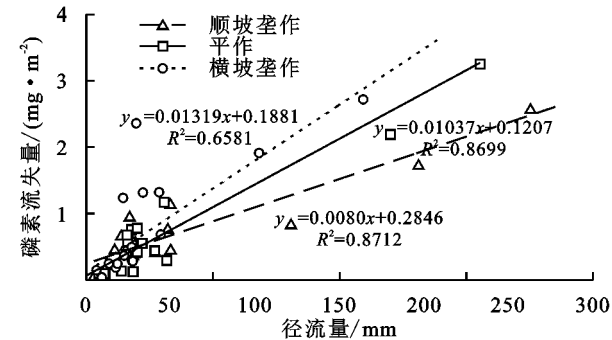


图 8 径流量与坡面磷素流失量的关系

玉米成熟期径流磷素流失量显著高于其他生育期,有研究表明,降雨径流过程是造成磷素流失的原动力,在降雨径流的驱动下,大量可溶性磷素发生迁移,同时降雨过程中土体内的磷素随降水入渗产生淋溶垂直迁移^[24],因本研究条件下玉米成熟期径流量较大,随着地表径流深度增加,水体缺氧加速了底质磷的释放^[25];另一方面,降雨过程中,根系分布也会促进土壤水分和溶质的导量^[26],玉米成熟期根系发达且生物量较大,可促进坡面土壤的导流,利于水分和磷素的迁移。由于横坡垄作坡面垄沟对于径流的拦蓄作用,增加了径流与表层土壤的接触时间,致使土壤中磷素溶解至径流中,增加

了水体磷素浓度,并随地表径流流失;而顺坡垄作由于其对于径流的汇集作用致使地表径流流速加快,与土壤接触时间较短、浓度较低,故各措施间地表径流磷素流失量无显著差异。0—20 cm 与 20—40 cm 壤中流磷素流失量均表现为顺坡垄作、平作>横坡垄作,这与壤中流量变化趋势不一致,一方面这可能是由于平作与垄作差异所致,垄沟对于径流的汇集和拦蓄作用致使垄沟内会形成薄层水流,减缓了降雨动能对于表层土壤的作用,从而导致平作径流浓度较高,在下渗过程中易随壤中流流失^[27];另一方面,由于土壤容重的影响,横坡垄作垄沟内径流下渗较慢,受径流的稀释作用影响较大,在下渗过程的初始浓度较低,因此其磷素流失量显著小于平作^[20]。

地表径流作为研究区玉米种植条件下坡面径流总磷流失的主要途径,在各耕作措施坡面上总磷流失占比达 79.83%。有研究表明,短时强降雨对于坡面的土壤侵蚀贡献率较为突出^[28]。横坡垄作和顺坡垄作坡面在玉米抽雄期径流总磷流失占比最高,这可能是由于 7 月 18 日出现降雨强度为 14.66 mm/h 的短时强降雨有关。0—20 cm 和 20—40 cm 壤中流磷素流失量间无显著差异,但磷素流失浓度随着土层深度加深,却呈增加的变化趋势。这可能与土—水接触时间有关,随产流时间的增加,径流逐渐下渗,与土壤接触时间增加,径流的溶解和浸提力增加,故导致 20—40 cm 壤中流磷素流失浓度增加。本研究径流总磷浓度范围介于 0.113 6~0.316 4 mg/L,属中度水体富营养化水平^[29],且随着土层深度增加,其浓度也随之增加,故研究区存在面源污染的潜在风险,应注意径流磷素流失的防控。

4 结论

(1) 在玉米成熟期,各耕作措施坡面产流及总磷流失量均最大,研究区应在玉米成熟期注意水土资源及养分流失的防控。

(2) 在玉米全生育期内,坡面产流及磷素流失量均受耕作措施影响,呈现为顺坡垄作>横坡垄作。横坡垄作对于坡面土壤侵蚀及养分流失具有较好的控制效果。

(3) 地表径流为本研究条件下径流总磷流失的主要途径,研究区径流磷素浓度已达中度水体富营养化磷素水平,存在面源污染潜在风险,尤其应注意地表径流中磷素流失的防控。

参考文献:

- [1] John H, Matthew O, Michael J, et al. How green is my river: A new paradigm of eutrophication in rivers[J]. *Science of the Total Environment*, 2006,365(1/3):66-83.
- [2] Andinet T, Ilho K, Jisung K. mini-review on river eutrophication and bottom improvement techniques, with special emphasis on the Nakdong River[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015,30:113-121.
- [3] 何淑勤,郑子成.浅议四川盆地丘陵区的水土保持[J]. *水土保持研究*, 2005,12(2):101-102,106.
- [4] 王全九,杨婷,刘艳丽,等.土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016,47(6):67-82.
- [5] 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.
- [6] 徐露,张丹,向宇国,等.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[J]. *山地学报*, 2020,38(6):851-860.
- [7] 毛妍婷,刘宏斌,郭树芳,等.耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2020,34(5):26-33.
- [8] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017,33(22):159-166.
- [9] Zhang X C, Shao M A. Effects of vegetation coverage and management practice on soil nitrogen loss by erosion in a Hilly Region of the Loess Plateau in China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003,45(10):1195-1203.
- [10] 王全九,王力,李世清.坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2007,35(12):103-108.
- [11] 刘莲,刘红兵,汪涛,等.三峡库区消落带农用坡地磷素径流流失特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2018,27(11):2609-2618.
- [12] 周明华,朱波,汪涛,等.紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. *水利学报*, 2010,41(11):1374-1381.
- [13] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等.红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. *水土保持学报*, 2014,28(6):41-45,70.
- [14] 邓良基,侯大斌,凌静.四川旱耕地的特征、问题及持续利用探讨[J]. *西南农业学报*, 2001,14(S1):96-102.
- [15] Miao C Y, Ashouri H, Hsu K, et al. Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015,16(3):1387-1396.
- [16] 王双,叶良惠,郑子成,等.玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2018,32(6):28-33.
- [17] 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.
- [18] 林君铿,涂文子,梁永津,等.Smartchem 200 全自动间断化学分析仪测定地表水中磷酸盐含量[J]. *理化检验(化学分册)*, 2014,50(1):130-131.
- [19] 陈美淇,张卓栋,王晓岚,等.西南黄壤和西北黄土坡面侵蚀产沙规律比较研究[J]. *中国水土保持科学*, 2016,14(6):53-60.
- [20] 何晓玲,郑子成,李廷轩.玉米种植下紫色土坡耕地径流中磷素流失特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012,31(12):2441-2450.
- [21] 严冬春,文安邦,龚长文,等.紫色土陡坡耕地顺坡垄作条件下的土壤及其流失特征[J]. *山地学报*, 2014,32(3):314-319.
- [22] Martinez-Agirre A, Álvarez-Mozos J, Giménez R, et al. Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016,161:19-30.
- [23] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2003,23(1):16-18,78.
- [24] 徐畅,谢德体,高明,等.三峡库区小流域旱坡地氮磷流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011,25(1):1-5.
- [25] 韩沙沙,温琰茂.富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2004,23(2):98-101.
- [26] 宋嘉,李怀恩,李家科,等.鸚鵡沟小流域天然降雨条件下水土及养分流失特征[J]. *水土保持研究*, 2021,28(5):7-12,21.
- [27] Liu Q J, Shi Z H, Shi, Yu X X, et al. Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014,136:1-8.
- [28] 宋月君,谢颂华,廖凯涛.基于不同降雨特征的空闲坡耕地产流产沙特征解析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021,32(2):16-22.
- [29] 尚佰晓,王莉,王爽,等.铁岭莲花湖水体富营养化评价[J]. *湿地科学*, 2014,12(1):97-101.