

三峡库区坡耕地免耕秸秆覆盖下氮磷流失特征

李刚浩^{1,2}, 夏颖², 黄敏¹, 范先鹏², 吴茂前², 程子珍², 夏淑洁²

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 湖北省农业科学院

植保土肥研究所/湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心/农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室, 武汉 430064)

摘要:为有效防治三峡库区坡耕地氮磷流失,在三峡库区长坪小流域连续进行两年野外径流小区监测试验。在自然降雨条件下进行免耕秸秆覆盖(SM)和对照(CK)两个处理的田间试验,研究了免耕秸秆覆盖措施对地表径流和氮磷养分流失的影响。结果表明:(1)降雨量与径流量极显著正相关,径流主要由几次暴雨事件造成,需要重点防范玉米季暴雨造成的水土流失。免耕秸秆覆盖能减少地表产流产沙,相比对照处理,免耕秸秆覆盖减少19.1%的径流流失,减少63.6%的泥沙流失。(2)免耕秸秆覆盖分别降低了21.3%,25.8%的总氮和总磷流失量,径流量和氮磷流失量呈极显著正相关,免耕秸秆覆盖主要通过减少径流量来减少氮磷流失。(3)坡耕地油菜—玉米种植制的氮磷流失风险期为6—7月初,该时期CK处理41.3%的径流量贡献了81.4%,52.1%的总氮和总磷流失,SM处理38.4%的径流量贡献了75.2%,48.2%的总氮和总磷流失,在该时期通过免耕秸秆覆盖可分别减少17.5%,31.7%的总氮和总磷流失。研究表明,免耕秸秆覆盖是控制三峡库区坡耕地氮磷养分流失的良好水土保持措施。

关键词:秸秆覆盖;面源污染;地表径流;水土流失;三峡库区

中图分类号:S157.4;S153.6⁺1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0093-07

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses on Sloping Farmland Under No-tillage and Straw Mulch in the Three Gorges Reservoir Area

LI Ganghao^{1,2}, XIA Ying², HUANG Min¹, FAN Xianpeng²,

WU Maoqian², CHENG Zizhen², XIA Shujie²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430070, China; 2. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural

Sciences/Hubei Engineering Technology Research Center of Agricultural Non-Point Source Pollution Control/ Key

Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to effectively control the losses of nitrogen and phosphorus from sloping farmland in the Three Gorges reservoir area, the field runoff monitoring experiment was carried out in Changping Watershed for two consecutive years. A field experiment was conducted to study the effects of no-tillage straw mulching (SM) and control (CK) on surface runoff and nitrogen and phosphorus losses under natural rainfall conditions. The results show that: (1) there is a very significant positive correlation between rainfall and runoff; runoff is mainly caused by several heavy rain events; it is necessary to focus on preventing soil erosion caused by heavy rain in the corn season; no-tillage straw mulching can reduce surface runoff and sediment production; compared with the control treatment, no-tillage straw mulching reduces runoff loss by 19.1% and sediment loss by 63.6%; (2) no-tillage straw mulching reduced total nitrogen and total phosphorus losses by

收稿日期:2021-12-31

修回日期:2022-01-13

资助项目:国家自然科学基金联合基金项目“长江中游农业面源污染入江负荷定量解析及滞后效应研究”(U21A2025)

第一作者:李刚浩(1997—),男,广西贵港人,硕士研究生,研究方向为面源污染防治。E-mail:lghe20@163.com

通信作者:夏颖(1983—),女,河南驻马店人,博士,副研究员,主要从事施肥与农业环境研究。E-mail:xiayinghappy105@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

21.3% and 25.8%, respectively; there is a very significant positive correlation between runoff and nitrogen and phosphorus losses; no-tillage straw mulching mainly reduces nitrogen and phosphorus losses by reducing runoff; (3) the risk period of nitrogen and phosphorus loss is from June to early July, during which 41.3% of runoff of CK contributes 81.4% and 52.1% of total nitrogen and total phosphorus losses, 38.4% of runoff of SM contributes 75.2% and 48.2% of total nitrogen and total phosphorus losses; in this period, total nitrogen and total phosphorus losses can be reduced by 17.5% and 31.7%, respectively, through no-tillage straw mulching. No-tillage straw mulching is a good soil and water conservation measure to control the losses of nitrogen and phosphorus nutrients from sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: straw mulch; non-point source pollution; surface runoff; soil erosion; Three Gorges Reservoir area

随着点源污染逐渐得到有效治理,非点源污染,特别是农业生产活动引起的农业非点源污染,已成为大多数水体污染的主要原因^[1]。三峡库区耕地土壤以紫色土和黄棕壤为主,质地松软、土层浅薄、易风化,抗蚀性差,且三峡库区降雨集中,降雨强度大,极易造成水土流失^[2]。三峡库区坡耕地由于地形起伏大,坡度大,加之频繁的耕作,坡耕地土壤侵蚀率高于其他地区^[3]。地表径流携带的大量泥沙和氮磷营养物质是农业面源污染的主要原因,大量氮磷的输入,使得库区水体越来越受到富营养化的威胁^[4]。

研究表明,在三峡库区,种植业是造成农业面源污染的主要原因,其等标污染负荷比达 56.1%,控制氮磷的排放可以有效减少农业面源污染^[5]。为了减少种植业造成的水土流失,促进农业生产,水土保持措施的研究越来越受到人们的关注,不同的研究表明,采取适当的管理措施,包括横坡垄作、植物篱、秸秆覆盖、生物炭等措施可以提高土壤持水性能^[6],减少土壤养分的流失。秸秆覆盖具有取材方便、操作简单、效果显著等优点,根据严坤的研究发现,三峡库区的秸秆还田率只有 8.8%^[7],多数的秸秆到处丢弃和任意焚烧,造成资源浪费和环境污染。秸秆覆盖能够降低雨滴对地表的溅蚀效果,拦截径流,降低土壤侵蚀,是一种有效的水土保持措施,具有广阔的应用前景。盘礼东对黔西喀斯特区的研究表明,秸秆覆盖与对照相比,年均径流深减少 21.9%~50.5%,土壤侵蚀模数减少 50.1%~85.9%^[8]。李太魁等^[9]对丹江口库区的研究发现,秸秆覆盖减少了 62.3%总氮流失,63.3%总磷流失。王静等^[10]对巢湖流域的研究同样证明,相比传统的耕作处理,秸秆覆盖下产流量和产沙量分别减少 30.5%,22.9%。

目前,尽管关于秸秆覆盖的研究已有较多报道,但由于氮磷流失机理的复杂性和区域差异性,使得秸秆覆盖还田对氮磷流失影响的研究还处在探索阶段,且以往的研究主要以人工模拟降雨方式研究氮磷迁

移流失规律^[11-12],缺乏自然降雨条件下的长期连续监测,难以全面反映秸秆覆盖的作用。相关研究表明,降雨和土壤管理措施是影响径流和土壤侵蚀的两个主要因素^[13],本研究通过对野外径流小区进行自然降雨下的原位监测,研究不同降雨条件下,秸秆覆盖对地表径流和泥沙流失的影响,探索秸秆覆盖在坡耕地中的水土保持作用,以期为三峡库区农业面源污染的治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于宜昌市兴山县古夫镇长坪小流域(110°44'21"—110°46'17"E,31°18'30"—31°20'1"N),小流域地处亚热带,属季风气候,雨量适中,年平均气温 13.3℃,年均降雨量约 1 100 mm。全年降雨集中在 4—10 月,该时期的降雨总量约占全年的 89%,降雨具有夏季暴雨多、强度大、历时短的特点。土壤类型为黄棕壤,土壤基本理化性质为 pH 值 7.49,有机质 17.3 g/kg,碱解氮 121.9 mg/kg,速效磷 44.8 mg/kg,速效钾 755.0 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2015 年 10 月 1 日—2017 年 9 月 30 日在三峡库区长坪小流域进行。本试验共设置 2 个处理,分别为对照 CK(平坡种植+优化施肥),免耕秸秆覆盖 SM(平坡种植+优化施肥+免耕+两季秸秆全量覆盖)。各处理设 3 次重复,3 次重复分上中下排列,共 6 个小区,小区坡度 10°~12°,各小区面积为 30 m²(长 6 m×宽 5 m),小区四周均用 15 cm 厚的水泥挡板隔开,地下埋深 30 cm,地上高 20 cm,以防各小区径流发生混合。采用径流池法收集地表径流,在各小区下部设置径流池,收集降雨后产生的径流和泥沙,待产流结束后,读取径流池水深,计算得出各小区径流量,径流池上部用铁皮片遮挡,防止雨水和其他杂物进入。试验基地设置雨量计记录降雨量。

施肥为有机无机肥配合施用,油菜季施用有机肥

(干猪粪)5 250 kg/hm²,化肥施用量折算为纯 N 45 kg/hm²,P₂O₅ 45 kg/hm²,K₂O 45 kg/hm²,玉米季施用有机肥(干猪粪)5 250 kg/hm²,化肥施用量折算为纯 N 120 kg/hm²,P₂O₅ 45 kg/hm²,K₂O 67.5 kg/hm²。免耕秸秆覆盖处理为玉米收获后翻耕,移栽油菜,油菜收获后不进行翻耕,直接播种玉米。收获后,将玉米和油菜秸秆切成 20~30 cm,均匀铺在行间。

1.3 测试项目

径流水样主要测试总氮、硝态氮、铵态氮、总磷和可溶态总磷。水样中总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度计比色法测定,硝态氮(NO₃⁻-N)采用紫外分光光度法测定,铵态氮(NH₄⁺-N)采用靛酚蓝比色法测定,总磷(TP)采用过硫酸钾钼蓝比色法测定,水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,测定溶解态总磷(TDP),测定方法与总磷相同;颗粒态总磷(PP)浓度等于总磷浓度减去溶解态总磷浓度。

1.4 数据统计分析方法

采用 Origin 2018 绘图,SPSS 26 进行数据相关性分析。

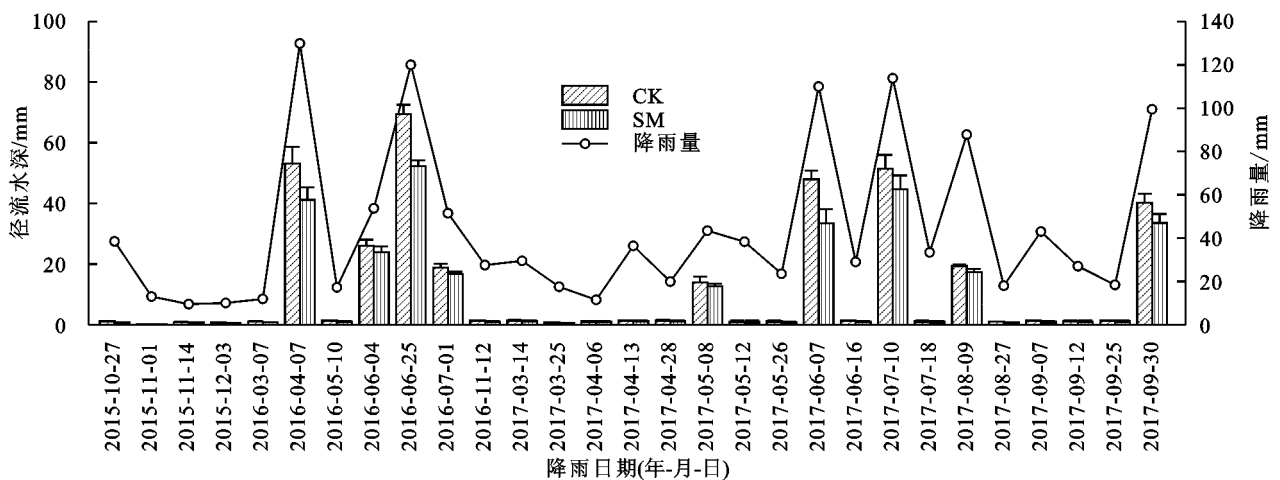


图 1 不同管理措施下的径流量

在油菜—玉米轮作制度下,油菜种植期为 10 月—次年 5 月,玉米种植期为 6—9 月,CK 处理和 SM 处理的玉米季的径流量分别是油菜季的 3.42、3.46 倍,因此,玉米季是径流发生的主要风险期。径流水深和径流系数的变化是不同管理措施和降雨侵蚀共同作用的结果,与 CK 处理相比,SM 处理可以减少地表径流流失,SM 处理相比 CK 处理可以减少 19.1%径流流失。综上,秸秆覆盖还田能有效减少产流量,主要是由于秸秆覆盖能增加雨水的下渗,增加壤中流,延长地表产流时间,减轻雨水对地表的冲刷,从而减少地表产流。

2.2 秸秆覆盖对泥沙流失的影响

图 2 分析了次降雨下对照处理和秸秆覆盖处理的单位面积的泥沙流失量。CK 处理的泥沙流失量变化

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对地表径流的截留效果

在试验期间共有 29 场降雨产生了径流,降雨范围为 9.5~129.9 mm。CK 处理的产流系数为 1.7%~57.9%,平均年产流系数为 16.8%,SM 处理的产流系数介于 1.3%~44.4%,平均年产流系数为 14.6%。降雨量达到 8.5 mm 时开始产流,降雨量大于 50 mm 的单场降雨产生了 8 次径流,合计降雨量 766.2 mm,年均暴雨降雨量占年降雨量的 63.8%。暴雨产生的径流中,CK 处理的平均年径流量占年总径流量的 90.3%,SM 处理的平均年径流量占年总径流量的 90.1%,可知径流流失主要发生在暴雨条件下。从图 1 可以看出,径流水深随着降雨量的增大而增大,根据相关性分析,降雨量和径流水深线性关系极显著($p < 0.01$)。6—7 月是径流产生的关键时期,该时期 42%的降雨量贡献了 59.9%的径流量,这与 6—7 月的降雨量较大、作物处于苗期地表裸露度高相关。

范围为 1.82~780.45 kg/hm²,SM 处理的泥沙流失量变化范围是 0.97~241.12 kg/hm²。CK 处理和 SM 处理的年均泥沙流失量分别为 1 107.14、403.48 kg/hm²,SM 处理相比 CK 处理相比,减少了 63.6%的泥沙流失,秸秆覆盖对泥沙的拦截效果明显优于对径流的拦截效果,这与秸秆覆盖可以避免降雨水对地表的直接冲刷,减少了泥沙随地表径流流失有关。

分析图 2 可知,泥沙流失量与降雨量呈正相关,即降雨量越大,泥沙流失量越大。泥沙流失主要发生在暴雨条件下,6—7 月初是泥沙流失的主要时期,该时期 CK 处理和 SM 处理的泥沙流失量达到 802.30、237.78 kg/hm²,分别占 CK 处理和 SM 处理年均泥沙流失量的 72.5%、58.9%,相比 CK 处理,该时期

SM处理可以减少70.4%的泥沙流失,高于全年平均拦截率63.6%。6—7月初是玉米播种的初期,地表刚被翻耕,土质疏松,种植的玉米处于苗期,地表覆盖

率极低,又处于雨季,多因素叠加造成了泥沙的大量流失,秸秆覆盖措施可以使地表覆盖率接近100%,在该时期应用秸秆覆盖措施可以显著减少泥沙流失。

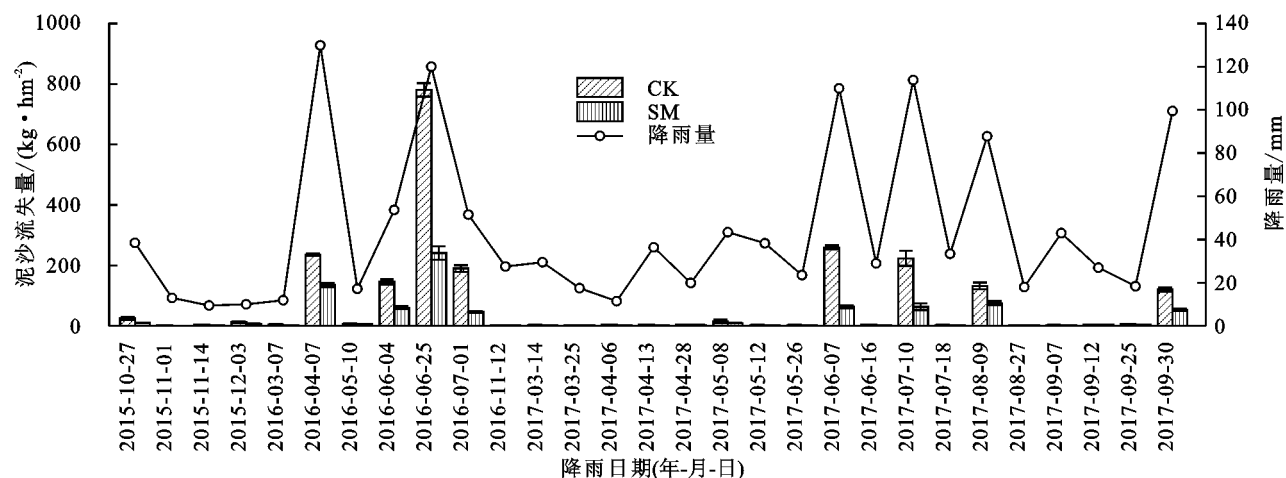


图2 不同管理措施下的泥沙流失量

2.3 秸秆覆盖对地表径流氮磷浓度变化的影响

试验期间,地表径流氮磷流失浓度见表1。CK处理的径流中TN的浓度变化范围为2.22~15.78 mg/L, SM处理的TN浓度范围为1.78~16.64 mg/L。2016年CK和SM的TN浓度峰值均出现在6月25日,分别为15.78,16.64 mg/L,2017年CK和SM的TN浓度峰值则是发生在6月7日,浓度分别为10.23,10.04 mg/L。分析发现,这两次的降雨量均超过了100 mm,达到了大暴雨级别,并且均发生在6月,此时地表裸露度高,暴雨冲刷再加上玉米种植施用基肥因素的影响,从而导致径流中TN的流失浓度峰值。CK处理径流中TP浓度范围为0.16~1.29 mg/L,SM为0.08~1.54 mg/L,TP流失浓度明显低于TN,但也远超过了湖泊发生富营养化的临界浓度0.02 mg/L。

根据T检验,SM处理和CK处理径流中各形态氮磷浓度没有显著性差异($p>0.05$),秸秆覆盖处理不能显著降低径流中氮磷的浓度。SM处理的TN, NO_3^- -N的平均浓度分别比CK降低7.6%,3.4%,但 NH_4^+ -N的平均浓度比CK处理提高11.9%。秸秆覆盖没有降低径流中的TP和TDP的浓度,SM处理的TP和TDP的平均浓度比CK提高3.4%,21.3%。然而,秸秆覆盖降低了径流中颗粒态总磷浓度,相比CK处理,颗粒态总磷浓度降低了15.3%,由此看出秸秆覆盖可以通过降低径流中颗粒态总磷的浓度来削减磷素的流失。

2.4 秸秆覆盖对氮磷流失形态的影响

地表径流中各形态氮磷年平均流失量及所占比例见表2。从表2可以看出,秸秆覆盖可以降低各形态氮磷的流失量,与CK相比,SM处理年均减少2.87

kg/hm^2 的TN流失,1.23 kg/hm^2 的 NO_3^- -N流失,0.10 kg/hm^2 的 NH_4^+ -N,0.33 kg/hm^2 的TP流失,0.02 kg/hm^2 的TDP流失,0.14 kg/hm^2 的PP流失。从各形态氮磷所占比例看, NO_3^- -N是地表径流氮素流失的主要形态,CK的 NO_3^- -N占TN比例为61.7%,SM为66.8%,秸秆覆盖提高了5.1%的 NO_3^- -N占比。与氮素不同,秸秆覆盖处理对磷素的构成有明显的影响,CK处理中颗粒态总磷(PP)是磷素流失的主要形态,占总磷的比例为53.2%,SM处理磷素流失形态以溶解态总磷(TDP)为主,TDP占TP的比例为58.7%,颗粒态总磷(PP)占比为41.3%,秸秆覆盖处理降低了径流中11.9%的颗粒态总磷占比。综上,秸秆覆盖处理能有效降低径流中颗粒态总磷的流失,这与秸秆覆盖增加了地表覆盖度,减轻雨水对地表的冲刷,进而减少泥沙的流失有关。

2.5 秸秆覆盖对氮磷流失总量的控制效果

次降雨下总氮流失量见图3,CK和SM的TN流失量变化范围分别为0.007 4~10.98 kg/hm^2 ,0.007 9~8.70 kg/hm^2 ,CK处理的年平均TN流失量为13.47 kg/hm^2 ,从图3可以看出,秸秆覆盖可以有效减少径流中TN流失,年平均减少21.3%的TN流失量。不同降雨条件下,TN流失存在显著差异,当降雨量大于50 mm时,TN流失量显著增加。TN流失风险期为6月—7月初,该时期CK处理41.3%的径流量贡献了81.4%的TN流失量,SM处理38.4%的径流量贡献了75.2%的TN流失量,该时期秸秆覆盖措施相比对照处理,可减少17.5%的TN流失量。6月—7月初,正值玉米播种施肥时期,地表覆盖度低,土壤松散,在强降雨作用下,产流量和泥沙流失量增加,进而导致TN的大量流失。

总磷流失量的变化规律见图 4。可以看出,TP 的流失量明显低于 TN,CK 和 SM 的 TP 年平均流失量依次为 0.62,0.46 kg/hm²,秸秆覆盖可以降低 25.8%的 TP 流失。TP 流失主要发生在 6 月—7 月初,峰值出现在 2016 年 06 月 25 日,CK 和 SM 处理的 TP 流失量分别达到 0.26,0.20 kg/hm²,该时期 CK 处理 41.3%的径流量贡献了 52.1%的 TP 流失

量,SM 处理 38.4%的径流量贡献了 48.2%的 TP 流失量,相比对照处理,秸秆覆盖降低了 31.7%的 TP 流失量。因此重点防范少数几次暴雨造成的氮磷流失,可有效防控氮磷的流失。综上,秸秆覆盖可以有效控制氮磷的流失,TN 和 TP 的流失量分别比对照处理降低 21.2%,25.8%,秸秆覆盖主要通过减少径流量来减少氮磷流失。

表 1 不同管理措施下地表径流各形态氮磷流失浓度

降雨日期	种植季	降雨量/ mm	总氮/(mg·L ⁻¹)		硝态氮/(mg·L ⁻¹)		铵态氮/(mg·L ⁻¹)		总磷/(mg·L ⁻¹)		溶解态总磷/(mg·L ⁻¹)	
			CK	SM	CK	SM	CK	SM	CK	SM	CK	SM
2015-10-27	油菜	38.5	5.31	4.45	1.98	2.31	0.75	0.43	1.29	1.31	0.15	0.53
2015-11-01	油菜	13.0	3.45	4.82	1.68	1.51	0.42	0.27	0.55	0.46	0.14	0.23
2015-11-14	油菜	9.5	3.03	2.57	1.62	1.49	0.59	0.66	0.27	0.36	0.11	0.20
2015-12-03	油菜	10.0	3.06	3.26	1.78	1.72	0.49	0.51	0.43	0.26	0.30	0.12
2016-03-07	油菜	11.9	6.97	4.99	5.10	4.62	0.49	0.20	0.33	0.14	0.19	0.12
2016-04-07	油菜	129.9	3.09	1.78	1.91	1.29	0.22	0.24	0.31	0.31	0.15	0.17
2016-05-10	油菜	17.2	5.74	4.42	4.00	3.75	0.24	0.25	0.61	0.46	0.12	0.11
2016-06-04	玉米	53.7	4.78	7.06	3.44	5.30	0.41	0.30	0.26	0.10	0.12	0.08
2016-06-25	玉米	120.0	15.78	16.64	7.89	8.18	0.57	0.29	0.41	0.08	0.19	0.05
2016-07-01	玉米	51.5	11.60	7.50	7.35	5.30	0.41	0.44	0.39	0.32	0.08	0.12
2016-11-12	油菜	27.5	6.12	5.25	4.36	3.62	0.25	0.39	0.20	0.37	0.14	0.23
2017-03-14	油菜	29.5	5.97	4.86	2.38	2.67	0.51	0.41	0.53	0.49	0.12	0.22
2017-03-25	油菜	17.5	3.12	3.54	2.49	2.53	0.43	0.79	0.36	0.56	0.09	0.40
2017-04-06	油菜	11.5	3.69	3.80	2.33	2.99	0.45	0.70	1.01	1.06	0.59	0.70
2017-04-13	油菜	36.4	2.41	2.30	1.61	1.77	0.54	0.44	0.86	0.64	0.56	0.45
2017-04-28	油菜	19.9	5.06	4.04	3.67	2.90	0.60	0.90	1.04	1.54	0.47	0.95
2017-05-08	油菜	43.4	6.71	2.25	4.62	1.82	0.22	0.30	0.72	0.41	0.30	0.20
2017-05-12	油菜	38.3	4.27	5.43	3.62	5.01	0.33	0.24	0.22	0.47	0.16	0.12
2017-05-26	油菜	23.5	10.04	5.90	8.30	3.17	0.48	2.06	0.87	1.13	0.74	0.80
2017-06-07	玉米	110.0	10.23	10.04	7.34	7.75	0.25	0.62	0.33	0.26	0.16	0.15
2017-06-16	玉米	29.0	5.86	4.86	3.50	3.07	1.37	0.46	0.58	0.68	0.26	0.31
2017-07-10	玉米	113.8	4.52	6.46	2.65	5.35	0.14	0.18	0.16	0.16	0.04	0.10
2017-07-18	玉米	33.4	4.61	2.46	4.01	2.07	0.47	0.26	0.96	0.93	0.76	0.60
2017-08-09	玉米	87.8	2.22	2.31	1.74	1.85	0.26	0.29	0.60	0.62	0.35	0.38
2017-08-27	玉米	18.0	2.70	4.56	2.38	4.17	0.18	0.23	0.45	0.52	0.38	0.45
2017-09-07	玉米	43.0	2.48	3.91	2.01	3.09	0.18	0.61	0.21	0.45	0.14	0.31
2017-09-12	玉米	27.0	2.76	3.21	2.42	2.57	0.12	0.32	0.24	0.48	0.17	0.33
2017-09-25	玉米	18.4	4.06	4.80	3.52	4.29	0.37	0.30	0.28	0.43	0.24	0.36
2017-09-30	玉米	99.5	2.72	3.09	2.51	2.78	0.20	0.25	0.22	0.21	0.12	0.12

表 2 地表径流中各形态氮磷年平均流失量及所占比例

处理	氮磷年平均流失量/(kg·hm ⁻²)						占比/%			
	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TP	TDP	PP	NO ₃ ⁻ -N/TN	NH ₄ ⁺ -N/TN	TDP/TP	PP/TDP
CK	13.47	8.31	0.58	0.62	0.29	0.33	61.7	4.3	46.8	53.2
SM	10.60	7.08	0.48	0.46	0.27	0.19	66.8	4.5	58.7	41.3

3 讨论

降雨是坡耕地氮磷流失的驱动力,降雨强度、降雨持续时间、降雨量、二次降雨等都是造成土壤侵蚀的重要因素,土壤侵蚀和氮磷流失随降雨量和降雨强

度的增加而增加^[14]。回归分析表明,降雨量和径流量是极显著正相关关系($p<0.01$),这与王宏等^[15]的研究结果相似。在两年的试验研究中,发现径流的流失主要发生在强降雨条件下,8 次暴雨造成的径流流失占总径流流失的 90%以上,强降雨对水土流失有

破坏性的影响。Wei 等^[16]研究发现,少数的几次降雨会造成主要的水土流失,如每年 64.1% 的泥沙损失是由 7 月 8 日的降雨事件造成的。梁斐斐等^[17]对三峡库区紫色土坡耕地的研究发现,大雨条件下产生的径流量远远大于中雨和小雨产生的径流量,其平均累积径流量分别是中雨和小雨时的 2.34 倍和 7.59 倍。

由此可见,暴雨是引起径流的主要原因,因此需要重点防范暴雨造成的径流损失。本研究证明,总氮、硝氮、氨氮、总磷、溶解性总磷、颗粒态总磷和径流量均呈极显著正相关(表 3),毛妍婷等^[18]对云南红壤坡耕地的研究同样证明,径流量和氮磷流失量具有显著相关性,径流的产生伴随氮磷的大量流失。

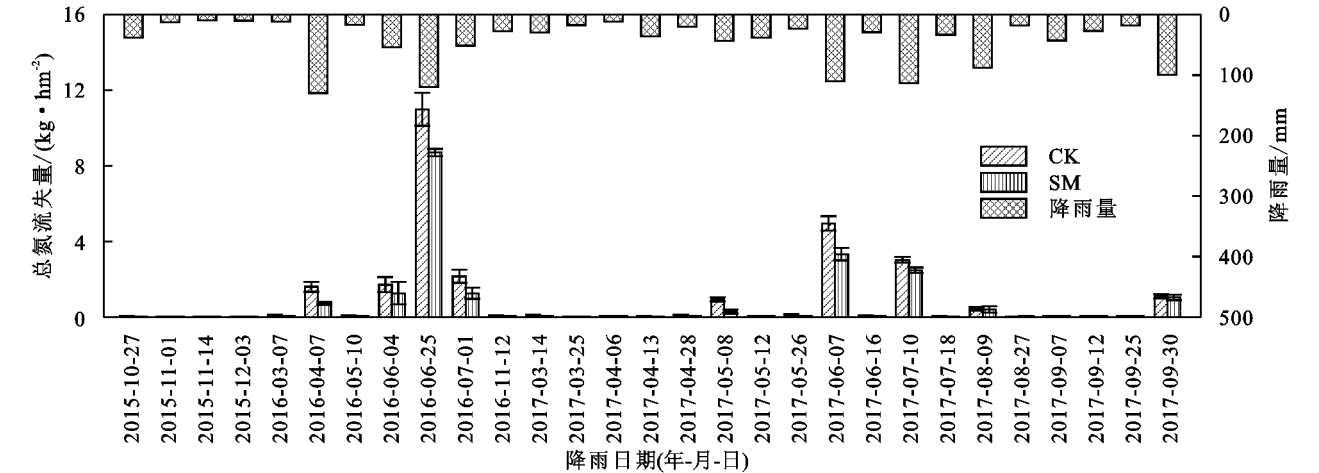


图 3 不同管理措施下径流中总氮流失量

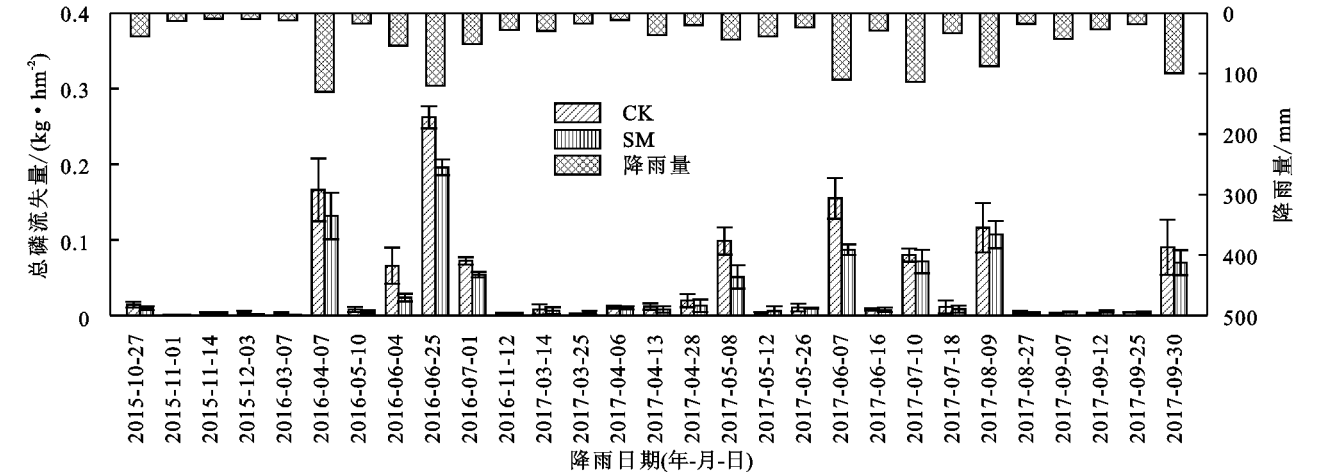


图 4 不同管理措施下径流中总磷流失量

表 3 径流量和氮磷流失量相关性分析结果

处理	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TP	TDP	PP
CK	0.665 **	0.739 **	0.721 **	0.860 **	0.770 **	0.889 **
SM	0.640 **	0.760 **	0.765 **	0.811 **	0.789 **	0.769 **

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关,下同。

地表径流氮磷养分流失量取决于径流量及其相关的养分浓度^[19]。在本研究中,免耕秸秆覆盖主要通过减少径流量来减少氮磷流失,免耕秸秆覆盖降低 19.1% 的径流流失,但对径流中氮磷浓度无明显影响,这与王静等^[20]的研究结果相同。从表 4 可以看出,总氮和硝态氮的浓度和对应的总氮和硝态氮流失量具有显著相关性,而铵态氮和各形态磷素的浓度和对应的铵态氮和各形态氮素流失量无显著相关性。Zhang 等^[3]的研究也证明,径流量在决定氮磷流失量

方面比氮磷浓度起着更主要的作用,氮磷流失量主要和径流量有关,因此免耕秸秆覆盖通过拦截地表径流可以有效减少氮磷流失。

表 4 氮磷浓度和氮磷流失量相关性分析结果

处理	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TP	TDP	PP
CK	0.554 **	0.344 *	0.000	0.033	0.012	0.002
SM	0.774 **	0.590 **	0.008	0.116	0.090	0.058

在农业活动中,土壤表面容易受到常规耕作的干扰,且在种植初期作物覆盖率低,在降雨作用下,水土

流失严重。翻耕土壤,会扰动土壤,破坏土壤的紧实度,免耕措施不扰动土壤,土壤的上下孔隙结构贯通,增加了土壤的抗蚀性,从而减少地表径流和土壤侵蚀^[21]。免耕还有利于有机质的积累,使养分固持在土壤中,减少因降雨冲刷造成的泥沙养分流失。秸秆覆盖措施可以阻止雨滴直接打击土壤表面,防止地表结皮,保持土壤高水平的渗透性,减缓径流流速,通过增加入渗和表面粗糙度来减少地表径流^[22]。秸秆覆盖能改善土壤的通透性,从而增强土壤的导水性能,加快雨水的下渗速度,增加壤中流,提高土壤深层的保水能力,减少因雨水的直接冲刷导致的泥沙和氮磷养分随地表径流流失,并且秸秆覆盖可以避免因阳光的直接照射导致的土壤表皮龟裂,保持了土壤良好的表层结构^[23]。免耕和秸秆覆盖的联合措施,可以有效削弱雨滴的溅蚀作用,减缓坡面流速。不同管理措施的联合使用具有更好的效果,辛艳等^[24]研究发现,免耕和免耕秸秆覆盖相比传统的平翻耕作,总氮分别减少 30%,32%,总磷分别减少 18%,32%。范成五等^[25]研究发现,秸秆覆盖和等高植物篱联用比秸秆覆盖减少了 11.6%径流量和 6.8%TN 输出量。陈静蕊等^[26]对南方紫色土坡耕地的研究发现,横坡垄作相比常规处理,减少了 3.7%径流量,而横坡垄作+秸秆覆盖相比常规处理,减少了 48%径流量,秸秆覆盖和横坡垄作的联合措施可以显著减少径流流失,进而减少径流中氮磷养分流失。

免耕秸秆覆盖作为一种有效的水土保持措施,可以显著减少氮磷养分的流失^[27]。本研究结果与前人研究结果相似,免耕秸秆覆盖处理相比对照处理,总氮和总磷流失量分别降低 21.3%,25.8%。过去对三峡库区秸秆覆盖措施对氮磷减控效果的研究,缺少在长期监测下秸秆覆盖对单次降雨氮磷流失减控的机制研究。本研究在前人研究的基础上,通过 2 a 的野外径流小区监测试验,对不同时期次降雨条件下的氮磷流失规律进行对比分析,发现 6 月—7 月初是三峡库区坡耕地氮磷流失的风险期,在该时期秸秆覆盖措施对氮磷流失的阻控效果更好。三峡库区水土流失严重,识别氮磷流失的关键风险期,并且在风险期采取秸秆覆盖措施可以起到精准防控的效果,本研究可为三峡库区农业面源污染的防控提供一定的理论支持。

4 结论

(1) 降雨量与径流量极显著正相关,径流主要由几次暴雨事件造成,需要重点防范玉米季暴雨造成的水土流失。免耕秸秆覆盖能减少地表产流产沙,相比对照处理,免耕秸秆覆盖减少 19.1%的径流流失,减

少 63.6%的泥沙流失。

(2) 免耕秸秆覆盖分别降低了 21.3%,25.8%的总氮和总磷流失量,径流量和氮磷流失量呈极显著正相关,免耕秸秆覆盖主要通过减少径流量来减少氮磷流失。

(3) 坡耕地油菜—玉米种植制的氮磷流失风险期为 6 月—7 月初,该时期 CK 处理 41.3%的径流量贡献了 81.4%,52.1%的总氮和总磷流失,SM 处理 38.4%的径流量贡献了 75.2%,48.2%的总氮和总磷流失,在该时期通过免耕秸秆覆盖可分别减少 17.5%,31.7%的总氮和总磷流失。

参考文献:

- [1] 姜和震,吴习锦,郝芳华,等.近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J].环境科学学报,2020,40(5):1535-1549.
- [2] 许峰,蔡强国,吴淑安,等.三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究:以等高植物篱为例[J].地理研究,2000,19(3):303-310.
- [3] Zhang Q W, Liu D H, Cheng S H, et al. Combined effects of runoff and soil erodibility on available nitrogen losses from sloping farmland affected by agricultural practices [J]. Agricultural Water Management, 2016, 176:1-8.
- [4] Ma X, Li Y, Li B L, et al. Nitrogen and phosphorus losses by runoff erosion: Field data monitored under natural rainfall in Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2016,147:797-808.
- [5] 蔡金洲,范先鹏,黄敏,等.湖北省三峡库区农业面源污染解析[J].农业环境科学学报,2012,31(7):1421-1430.
- [6] 高泽超,潘焰菲,徐勤学,等.秸秆覆盖对西南喀斯特坡地幼龄橘园产流产沙的影响[J].水土保持研究,2022,29(1):36-43.
- [7] 严坤,王玉宽,徐佩,等.秸秆覆盖对三峡库区坡面侵蚀的影响[J].水土保持通报,2016,36(1):6-10.
- [8] 盘礼东,李瑞,黎庆贵,等.黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J].水土保持学报,2021,35(1):9-16.
- [9] 李太魁,张香凝,郭战玲,等.覆盖与间作对丹江口库区坡地茶园氮磷流失和土壤环境的影响[J].生态环境学报,2020,29(3):543-549.
- [10] 王静,王允青,郭熙盛,等.不同农艺措施对巢湖沿岸坡耕地水土及径流氮输出的控制效果[J].水土保持学报,2016,30(4):38-43,48.
- [11] 冯小杰,郑子成,李廷轩,等.暴雨条件下紫色土区玉米季坡耕地氮素流失特征[J].中国农业科学,2018,51(4):738-749.
- [12] 车明轩,宫渊波,Muhammad N K,等.不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):131-135,142.

- (2):171-181.
- [14] 于元赫,李子君,林锦阔,等.沂河流域土地利用时空变化图谱特征分析[J].自然资源学报,2019,34(5):975-988.
- [15] 薛丽芳,谭海樵.沂河流域水文特征变化及其驱动因素[J].地理科学进展,2011,30(11):1354-1360.
- [16] 刘金玉.沂河流域水沙变化及其对土气候地利用的响应[D].济南:山东师范大学,2020.
- [17] 左亚凡,贺康宁,柴世秀,等.基于 Penman-Monteith 方程模拟青海云杉生长季日蒸腾过程[J].生态学报,2021,41(9):3656-3668.
- [18] 彭涛,梅子祎,董晓华,等.基于 Budyko 假设的汉江流域径流变化归因[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1114-1124.
- [19] 刘静,龙爱华,李江,等.近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J].水利水电技术,2019,50(12):10-17.
- [20] 王国庆,张建云,管晓祥,等.中国主要江河径流变化成因定量分析[J].水科学进展,2020,31(3):313-323.
- [21] 叶晶萍,刘政,欧阳磊,等.不同时间尺度小流域径流变化及其归因分析[J].生态学报,2019,39(12):4478-4487.
- [22] 龙达,董前进,杨荣芳.基于水热耦合平衡方程的六冲河上游流域径流变化归因分析[J].人民珠江,2021,42(10):32-37,48.
- [23] 赵艳红,詹道强,李斯,等.沂沭河流域径流变化特征分析[C]//北京沃特咨询有限公司.2018 中国水资源高效利用与节水技术论坛论文集,广州:2019.
- [24] 苏宁.沂河流域土地利用景观格局变化对年径流量的影响[D].济南:山东师范大学,2018.
- [25] 冷曼曼,张志强,于洋,等.昕水河流域径流变化及其对气候和人类活动的响应[J].水土保持学报,2020,34(3):113-119,128.
- [26] 秦文静,王云琦,王彬,等.土地利用和气候变化对王家桥小流域径流的影响[J].水文,2019,39(2):49-54.
- [27] 邓睿,张治意,陈亚.嘉陵江流域下游地表径流对土地利用变化的响应[J].水土保持研究,2019,26(3):141-147.
- [28] 罗伟林,刘俊.沂河上游土地利用变化的设计洪水响应研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2021,43(2):23-30.
- [29] 杜勇,李建柱,牛凯杰,等.1982—2015 年永定河山区植被变化及对天然径流的影响[J].水利学报,2021,52(11):1309-1323.

(上接第 99 页)

- [13] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2014, 514:180-191.
- [14] Meshesha D T, Tsunekawa A, Tsubo M, et al. Evaluation of kinetic energy and erosivity potential of simulated rainfall using laser precipitation monitor [J]. Catena, 2016, 137:237-243.
- [15] 王宏,徐娅玲,张奇,等.沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J].环境科学,2020,41(10):4547-4554.
- [16] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. Responses of water erosion to rainfall extremes and vegetation types in a loess semiarid hilly area, NW China[J]. Hydrological Process, 2009, 23(12):1780-1791.
- [17] 梁斐斐,蒋先军,袁俊吉,等.降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):81-85.
- [18] 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.
- [19] Guo S, Zhai L, Liu J, et al. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191:48-56.
- [20] 王静,郭熙盛,王允青.自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(3):492-495.
- [21] 李新举,张志国,邓基先,等.免耕对土壤生态环境的影响[J].山东农业大学学报,1998,29(4):104-110.
- [22] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110:34-40.
- [23] 祖艳群,杨静,湛方栋,等.秸秆覆盖对玉米和青花农田土壤面源污染负荷的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):155-160.
- [24] 辛艳,王瑄,邱野,等.坡耕地不同耕作模式下土壤养分流失特征研究[J].沈阳农业大学学报,2012,43(3):346-350.
- [25] 范成五,罗益,王文华,等.不同管理措施对黄壤坡耕地径流氮输出的控制效果[J].农业环境科学学报,2014,33(10):1948-1955.
- [26] 陈静蕊,刘佳,王惠明,等.保护性耕作措施对陡坡地养分流失的影响[J].中国土壤与肥料,2018(1):146-152.
- [27] 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.