

秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控

李飞, 韩兴, 马秀兰, 王玉军, 宋天琪, 王永永

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 为揭示秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控, 通过田间试验, 探讨秸秆覆盖模式下, 玉米生育期对不同坡度试验小区径流、泥沙和氮磷流失的阻控效果。结果表明: 随着耕地坡度的增加, 地表径流量、土壤及氮磷流失量逐渐增加。玉米种植条件下, 地表径流量与降雨量呈正相关, 土壤流失量与降雨量不相关。秸秆覆盖模式对土壤流失的阻控效果均为随坡度的降低, 阻控率增加, 秸秆覆盖对地表径流和土壤流失阻控率均超过 90%。土壤中氮素流失以溶解态氮为主, 溶解态氮占总氮的 60% 以上; 磷素流失以颗粒态磷为主, 颗粒态磷占总磷的 80% 以上。秸秆覆盖对土壤中总氮、总磷阻控率均超过 85%, 对于控制水土流失和降低面源污染风险具有积极意义。

关键词: 秸秆覆盖; 黑土区; 坡耕地; 地表径流; 氮磷流失

中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2020)04-0037-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.006

Straw Mulch Controls Runoff and Nitrogen and Phosphorus Loss from Slope Farmland in Black Soil Region of Northeast China

LI Fei, HAN Xing, MA Xiulan, WANG Yujun, SONG Tianqi, WANG Yongyong

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: Field experiment was conducted in black soil region of Northeast China to reveal the effects of straw mulching on runoff, sediment and nitrogen and phosphorus loss in different slope experimental plots at different growth periods of corn. The results showed that, surface runoff, soil, nitrogen and phosphorus losses were increased with the increased slope. Under the condition of corn planting, rainfall was positively correlated with surface runoff, but not for soil loss. The reduction rate of straw mulching on soil loss increased with the decreasing slopes. The resistance control rate of straw mulching on surface runoff and soil loss both exceed 90%. Dissolved nitrogen was the main contributor in nitrogen loss in soil, which accounted for more than 60% of total nitrogen. The loss of phosphorus was mainly granular phosphorus is the dominant phosphorus form, which accounted for more than 80% of the total phosphorus. Straw mulching had a resistance control rate of more than 85% for total nitrogen and total phosphorus in soil, which was of positive significance for controlling soil erosion and reducing the risk of non-point source pollution.

Keywords: straw mulching; black soil region; sloping farmland; surface runoff; nitrogen and phosphorus loss

我国东北黑土区总面积为 109 万 km², 区域地形以漫岗丘陵为主, 0.5°~5° 的坡耕地占黑土区耕地总面积的 56%^[1]。东北黑土区降雨集中, 地形具有坡缓、坡长、集雨面积大的特点^[2], 降雨引起的地表径流极易造成坡耕地水土流失^[3]。地表径流向水体迁移是坡耕地土壤氮、磷流失的主要途径之一, 坡耕地的水土流失已成为土壤质量退化的一个重要原因^[4]。根据第三次全国土壤侵蚀遥感调查^[5]显示, 东北黑土

区水土流失量达 2.4 亿 t/a, 流失的氮、磷、钾养分折合成化肥达 500 万 t。氮磷流失导致农田面源污染, 水体富营养化日益严重^[6]。

玉米是东北黑土区坡耕地主要农作物之一, 以垄作方式为主^[7]。垄作是一种常见的耕作方式, 目前耕作垄向分为横垄和顺垄, 垄向的不同直接影响产流产沙及土壤中氮、磷、钾等养分的运移^[8-9], 长时间的垄作模式对耕作区地表径流产生影响, 加速侵蚀沟的发

收稿日期: 2019-12-26

资助项目: 国家重点研发计划项目“东北黑土区侵蚀沟生态修复关键技术研发与集成示范”(2017YFC0504200); 吉林省自然科学基金项目(20180101086JC)

第一作者: 李飞(1994—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事面源污染防控研究。E-mail: 1627227497@qq.com

通信作者: 韩兴(1976—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土流失监测与面源污染控制研究。E-mail: jldhx@126.com

育^[10]。20 世纪 80 年代面源污染受到普遍关注^[11-12]，目前防控农田面源污染的技术主要有植被带技术^[13]，深松筑挡技术^[14]，岸边带净化技术^[15]、秸秆覆盖技术^[16]等，但受到土地利用、地形等因素影响，防控技术应用范围具有一定的局限性。当前急需一种便于实施的面源污染防控技术，从源头治理面源污染。秸秆还田可提高地力，秸秆覆盖也可以控制水土流失^[17]。传统的秸秆覆盖是将秸秆粉碎后铺于地面，但在坡耕地上易被风刮走或被坡面径流冲走。因此，本研究提出垄沟秸秆整株覆盖技术，从源头控制径流泥沙运移，减少 N、P 流失。以往的研究主要是通过人工模拟降雨条件来探讨泥沙、氮磷的迁移规律与流失特征，在自然降雨条件下的原位试验研究则较少报道。本试验将秸秆覆盖于顺垄耕地的垄沟上，分析自然降雨条件下，坡耕地（3°，6°，9°）产流、产沙及 N、P 流失的特征，为从源头控制东北黑土区坡耕地面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在吉林农业大学教学科研基地（125°24′55″E，43°48′34″N）进行，属温带大陆性半湿润季风气候，多年平均降水量 577.9 mm，降水主要集中在每年的 6—9 月。每个试验小区面积均为 100 m²（长 20 m×宽 5 m），土壤类型为黑土，土壤基本理化性质为：pH 6.31，土壤容重 1.33 g/cm³，有机质含量 28.1 g/kg，全氮含量 1.25 g/kg，碱解氮含量 124.41 mg/kg，全磷含量 0.62 g/kg，速效磷含量 56.96 mg/kg。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 本试验设 3°，6°，9° 3 个坡度，每个坡度 2 个试验小区，设置常规顺坡垄作（CG 3°、CG 6°、CG 9°）和顺坡垄作秸秆覆盖（FG 3°、FG 6°、FG 9°），共计 6 个处理。试验小区四周用石板砌成，石板高度 30 cm，小区底部修建矩形集流槽，集流槽底端出水口用塑胶管连接到集流桶，集流桶和分流桶为不锈钢材料制作的圆桶，分流桶为 1 级 9 孔分流，分流桶底部横截面积 0.255 m²，分流孔距离桶底 0.45 m，集流桶底部横截面积 0.173 m²，进水口距集流桶底 0.4 m，接收降雨产生的径流和泥沙。

2019 年 4 月末对试验小区进行整地，垄距 60 cm，垄高 20 cm，施肥量与当地农耕施肥习惯相一致，一次性施肥，施肥纯量为 N 210 kg/hm²，P₂O₅ 115 kg/hm²，K₂O 130 kg/hm²。5 月 1 日分别在 6 个试验小区内种植玉米，株距 26 cm，种植密度为 6.4 万株/hm²，出苗后于 5 月 21 日对 FG 3°、FG 6°、FG 9° 3 个试验小区进行垄沟秸秆覆盖，秸秆为 2018 年该

小区人工收获的整株玉米秸秆，秸秆全量覆盖于垄沟中，10 月 1 日收获。

1.2.2 样品采集与指标测定 径流样品采集：用钢尺测量分流桶和集流桶内水深，计算径流量。将分流桶和集流桶内的径流和泥沙搅拌均匀后，用 1 000 mL 取样瓶置于桶内各取 2 个混合样品，1 号瓶用于含沙量测定，2 号瓶用于氮、磷的测定。2 号瓶调节 pH 至 2.0 以下，0 °C 保存，48 h 内测定。

测定指标及方法：降雨量采用气象站（TRM—ZS2 型）现场测定后自动记录；

径流量 = 分流桶水深 × 底面积 + 集流桶水深 × 底面积 × 9

含沙量 = 样品烘干泥沙重 / 采样体积

土壤流失量 = (分流桶水深 × 分流桶底面积 × 分流桶含沙量) + (集流桶水深 × 集流桶底面积 × 9 × 集流桶含沙量)

氮磷测定方法参考《土壤农业化学分析方法》^[18]，总氮（TN）含量采用开氏法测定；溶解态氮（DN）溶液过 0.45 μm 滤膜，采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定；颗粒态氮（PN）为全氮与溶解态氮的差值；总磷（TP）采用硫酸—高氯酸氧化—钼蓝比色法测定；溶解态磷（DP）溶液过 0.45 μm 滤膜，采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法测定；颗粒态磷（PP）为总磷与可溶态磷的差值。

1.3 统计分析

采用 Excel 2007 对数据进行处理和图表分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对径流的阻控效果

玉米生长期为 2019 年 5 月 1 日至 10 月 1 日，共降雨 74 次，降雨量为 787.4 mm，其中 49 次降雨量和雨强均较小，在 6 个试验小区均未产流，不进行统计；25 次降雨在试验小区出现了不同的产流现象（其中有 9 次降雨在 6 个试验小区出现了全产流现象），总降雨量为 612.4 mm，其中，5—6 月 5 次降雨，降雨量为 97.6 mm；7—8 月 18 次降雨，降雨量为 433.0 mm；9 月 2 次降雨，降雨量为 81.8 mm。试验小区产生径流的 25 次降雨，径流量与降雨量的关系见图 1、图 2。从图 1 可以看出，常规模式下，CG 9°、CG 6°和 CG 3° 3 个坡度试验小区均产流 25 次，径流量与降雨量进行线性拟合，拟合方程的相关系数 R² 分别为 0.173 8*，0.232 7*，0.252 5*，均达到显著差异水平。说明降雨量增加，坡耕地的地表径流量增加。不同坡度对比发现，降雨量相同，坡度越大，径流量越高。

由图 2 可知，秸秆覆盖模式下，FG 9°产流 13 次，FG 6°产流 11 次，FG 3°产流 9 次，产流次数明显低于

常规模式。径流量与降雨量拟合方程的相关系数 R^2 分别为 0.184 9^{*}, 0.363 3^{**}, 0.274 6^{**}, FG 3°和 FG 6°相关系数 R^2 达到差异极显著水平, FG 9°相关系数 R^2 达到差异显著水平。与常规模式相比, 秸秆覆盖模式能够显著降低径流量。降雨发生后, 径流量与入渗量相互作用, 当降雨量一定时, 二者处于此消彼长的关系。鲁耀等^[19]在研究坡耕地产流过程中发现, 径流曲线基本表现为单峰型, 且雨强对峰型影响较大, 雨强增大, 地表径流过程曲线由“矮胖型”向“高瘦型”转变。在每次降雨的初始阶段, 土壤湿度较低, 水分在土壤中的入渗能力大于降雨强度, 以土壤入渗的方式为主, 随着表层土壤含水量增加, 水分的入渗能力下降至小于降雨强度时, 地表径流开始产生、变大并趋于平衡, 降雨结束后径流逐渐消退。基于上述地表径流的产生机理, 秸秆覆盖处理能够显著降低径流量, 主要是因为秸秆具有吸水保水能力, 降雨开始后秸秆处于吸水状态, 秸秆覆盖模式由于秸秆对降雨的吸收作用, 试验小区的径流量小于常规模式; 另一方面, 由于秸秆覆盖对降雨具有拦截作用, 增大了地表粗糙度, 增加了雨水滞留试验小区的时间, 土壤入渗量随之增大。

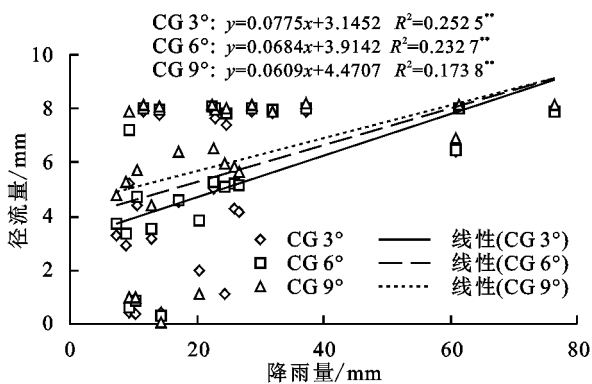


图1 常规模式径流量与降雨量的相关分析

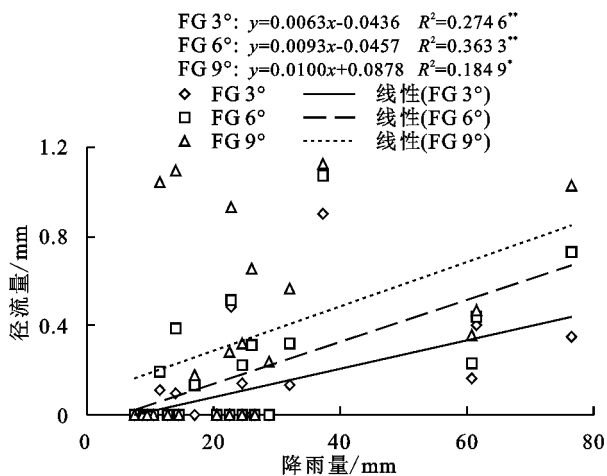


图2 秸秆顺垄覆盖模式径流量与降雨量的相关分析

从表1可以看出, 不同坡度条件下, 常规模式和秸秆覆盖模式产生的径流量均随着坡度的增加而增大, 即 $9^\circ > 6^\circ > 3^\circ$; 相同坡度条件下, 常规模式的产流量明显大于秸秆覆盖模式。常规模式下, CG 9°、CG

6°分别比 CG 3°的径流量增加 18.2%, 10.8%; 秸秆覆盖模式下, FG 9°、FG 6°分别比 FG 3°径流量增加 197.5%, 63.6%。相同坡度条件下, 秸秆覆盖模式径流系数明显小于常规模式, 不同坡度条件下, 径流系数总体表现为 $9^\circ > 6^\circ > 3^\circ$; 9°, 6°, 3°试验小区的径流阻控率分别为 94.4%, 96.7% 和 97.8%, 说明垄沟覆盖秸秆后可有效减少地表径流量。

表1 秸秆覆盖对坡耕地径流的影响

坡耕地 坡度/(°)	处理	径流量/ mm	径流 系数	覆盖径流 阻控率/%
3	CG	126.10	0.168	97.8
	FG	2.79	0.003	
6	CG	139.71	0.186	96.7
	FG	4.56	0.006	
9	CG	149.03	0.198	94.4
	FG	8.30	0.012	

2.2 秸秆覆盖对土壤流失量的阻控效果

从表2可以看出, 在不同坡度间相比, 供试的2种模式均随着坡度的增加土壤流失量增大, 即 $9^\circ > 6^\circ > 3^\circ$ 。常规模式下, CG 9°、CG 6°分别比 CG 3°的土壤流失量分别增加 201.9%, 79.2%; 秸秆覆盖模式下, FG 9°、FG 6°分别比 FG 3°径流量增加 10.3, 2.8 倍。王丽等^[20]研究发现, 耕地坡度 $< 10^\circ$, 随着坡度的增加, 径流量与土壤流失量随之增加。由于坡度越大, 坡面流速越大, 侵蚀动能增加, 对泥沙的搬运能力增强, 使土壤颗粒随坡面流一起运动, 增加了土壤流失量^[21]。在常规模式 CG 9°、CG 6°和 CG 3°均有径流产生的 25 次降雨中, 秸秆覆盖 FG 9°、FG 6°和 FG 3°产流率分别为 52%, 44%, 36%。有无秸秆覆盖坡面的产流率差异巨大, 这与 Li 等^[22]研究结果相一致。秸秆覆盖模式对土壤流失量产生一定的阻控效果, 9°, 6°, 3°试验小区的土壤流失阻控率分别为 90.2%, 94.4% 和 97.4%。说明垄沟覆盖秸秆可有效减少土壤流失量。王静等^[23]研究认为, 秸秆覆盖模式相对于常规模式可有效减少产流产沙量, 这与本文得出的结论相一致。

本研究秸秆覆盖模式相对常规模式, 径流量减少 94.03%~97.97%, 土壤流失量减少 90.21%~97.39%, 其原因是秸秆覆盖处理避免了雨滴直接打击地面, 秸秆对雨水具有拦截和蓄存作用, 相对于常规模式, 减少了产流历时。秸秆覆盖同时也减缓了地表结皮的形成, 增加土壤孔隙度和入渗能力^[24], 农田表层土壤抗冲刷能力增强, 相比常规模式, 地表的抗蚀性和保水能力均明显增强, 入渗量增多, 地表径流量减少, 径流冲刷土壤表层能力降低, 侵蚀动能减小, 相应减少了土壤流失量。

江森华等^[25]研究表明, 裸地土壤流失量与降雨量呈显著性相关。本试验条件下, 有产流现象的 25

次降雨土壤流失量与降雨量的关系见图 3、图 4。表 3 为玉米生育期内作物植被盖度与植被高度。无论是常规模式还是秸秆覆盖模式,土壤流失量与降雨量均不相关;而径流量与降雨量显著相关,但二者并不矛盾,原因是在玉米苗期,随着降雨量增加,径流量和土壤流失量均增加,到玉米生长中后期,随着降雨量增加,径流量一般也会增加,但此时地表覆盖度较大,作物高度由 0 增加到 2.8 m,而植被覆盖度也由 0 增加到 90%,植被覆盖度的增加减小了降雨直接接触表层土壤的面积,作物叶片对雨水的截留率增加,大量的作物茎叶的缓冲作用降低降雨对地表土壤的侵蚀,并且根系量增加提高土壤的抗蚀性,双重作用减少土壤的流失量。因此,在玉米生长中后期,虽然降雨量增大,但土壤流失量并没有增加。

表 2 秸秆覆盖对坡耕地土壤流失量的影响

坡耕地 坡度/(°)	处理	土壤流失量/ (kg·hm ⁻²)	覆盖泥沙 阻控率/%
3	CG	2526.3	97.4
	FG	66.4	
6	CG	4527.3	94.4
	FG	254.3	
9	CG	7627.6	90.2
	FG	752.9	

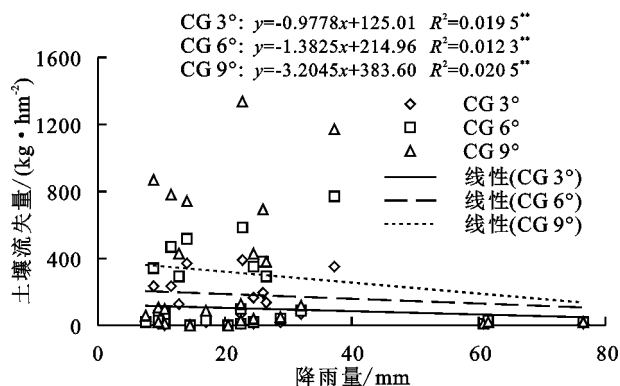


图 3 常规模式土壤流失量与降雨量的相关分析

2.3 秸秆覆盖对氮磷流失的阻控效果

农田地表径流中氮、磷的流失是农业非点源污染物的重要来源,由表 1、表 2 可知,秸秆覆盖模式对地表径流量和土壤流失量有明显的阻滞效果,也必将对

径流中的 N、P 等养分元素进行阻滞。秸秆覆盖对氮阻控效果见表 4。

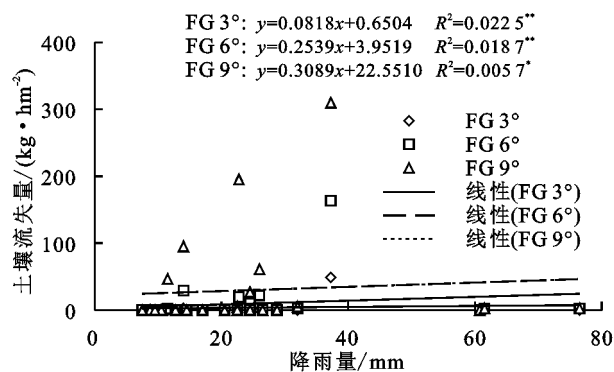


图 4 秸秆覆盖模式土壤流失量与降雨量的相关分析

表 3 玉米生育期内作物植被盖度与植被高度

日期(月-日)	植被盖度/%	植被平均高度/m
05-06	0	0
05-15	1	0.1
06-02	3	0.4
06-16	27	0.8
06-29	44	1.2
07-14	88	1.9
08-01	90	2.3
08-18	90	2.4
08-31	90	2.5
09-15	90	2.8
09-29	90	2.8

由表 4 可知,坡度间相比,氮素的流失量与径流量、土壤流失量的规律相同,随着坡度的增大,不同模式下总氮(TN)、溶解态氮(DN)、颗粒态氮(PN)的流失量均增大,即 9°>6°>3°。秸秆覆盖模式与常规模式相比,前者的氮素流失量远低于后者,说明秸秆覆盖有助于氮素的固定,覆盖阻控率均>88.6%,阻控效果显著;不同坡度的氮素阻控率对比可见,3°>6°>9°,即坡度越小,对不同形态氮素阻控效果越好,主要是由于坡度小,径流的流速低,秸秆的吸附和截留作用更加明显。不同氮素形态对比发现,DN 占 TN 的 67.1%~74.5%,氮素流失主要以溶解态为主。因此,控制坡耕地土壤中氮素流失以控制溶解态为主,即抑制地表径流对减少氮素流失具有更重要的意义。

表 4 秸秆覆盖对氮流失的阻控效果

坡度/(°)	处理	TN		DN		PN	
		流失量/ (kg·hm ⁻²)	覆盖阻 控率/%	流失量/ (kg·hm ⁻²)	覆盖阻 控率/%	流失量/ (kg·hm ⁻²)	覆盖阻 控率/%
3	CG	5.696	96.4	3.907	96.1	1.790	97.1
	FG	0.203		0.151		0.052	
6	CG	7.253	92.8	4.869	92.1	2.384	94.3
	FG	0.522		0.385		0.137	
9	CG	8.647	89.1	6.018	88.6	2.629	90.0
	FG	0.946		0.684		0.262	

由表5可知,坡度越大,磷素流失量越高;秸秆覆盖能减少磷素的流失,降低对水体的污染风险;坡度越小,阻控效果越好;覆盖阻控率均 $>85.4\%$,这与氮素流失规律相一致。但与氮素流失规律不同的是,溶解态磷(DP)仅占总磷(TP)的 $17.7\% \sim 15.8\%$,而颗

粒态磷(PP)占TP的 $84.2\% \sim 87.3\%$,说明磷素以颗粒态为主。

因此,控制坡耕地土壤中磷素流失与氮素有所不同,磷素以控制颗粒态流失为主,抑制土壤流失对减少磷素流失具有更重要的意义。

表5 秸秆覆盖对磷流失的阻控效果

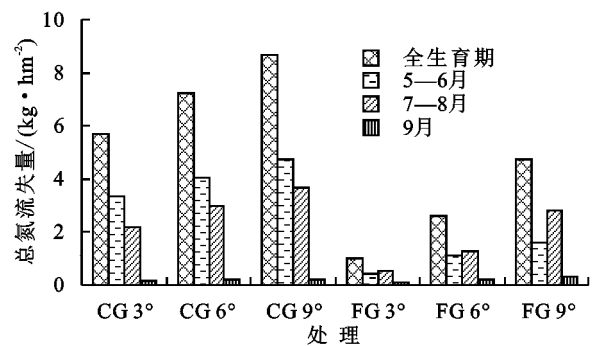
坡度/(°)	处理	TP		DP		PP	
		流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	覆盖阻 控率/%	流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	覆盖阻 控率/%	流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	覆盖阻 控率/%
3	CG	1.197	93.8	0.152	92.3	1.044	94.0
	FG	0.074		0.012		0.063	
6	CG	1.615	90.7	0.220	90.7	1.395	90.7
	FG	0.150		0.021		0.130	
9	CG	2.016	85.9	0.319	88.4	1.697	85.4
	FG	0.285		0.037		0.248	

总体上,坡耕地土壤中氮素溶解于水中随径流迁移,磷素被土壤颗粒吸附之后随泥沙迁移。本研究表明,氮磷流失量的大小与径流、土壤流失量的趋势一致,均随着坡度的增大而增大,秸秆覆盖模式可以有效降低径流量和土壤流失量,减少不同形态的氮磷流失,可作为农田面源污染的源头控制措施。

2.4 作物生育期内氮磷流失特征分析

作物生育期是指作物从播种到收获期间的时段。由图5、图6可知,常规模式下,总氮在5—6月的流失量占整个生育期的 $55.0\% \sim 59.1\%$,在7—8月的流失量占生育期的 $38.3\% \sim 42.6\%$;总磷在5—6月的流失量占生育期的 $57.6\% \sim 59.6\%$,在7—8月的流失量占生育期的 $37.6\% \sim 39.3\%$;9月的氮磷流失比例均未超过 5% 。虽然,5—6月的降雨量很小,仅占生育期的 15.9% ,但对氮磷的流失贡献率却超过 55% ,说明5—6月是控制氮磷流失的关键时期。这是因为整地和播种对土壤的扰动较大,地表覆盖度较小,土壤抗蚀性差,氮磷流失比例较大,因此不提倡春季的过度施肥,更不应该采用“一炮轰”的施肥模式,以降低氮磷对水环境污染风险。从作物需肥规律来看,玉米苗期需肥量较少,玉米进入拔节期,由自养发育到异养发育,对水肥的需求量较大,因此,在7—8月进行追肥不仅可以提高肥料利用率,满足作物生长的需要,而且也可以减少氮磷等营养元素进入水体。因此,在追肥过程中要避免地表施肥。

图5、图6中的秸秆覆盖模式与常规相比,总氮总磷的流失量大幅度降低。常规模式下,5—6月的流失量大于7—8月;而秸秆覆盖模式,7—8月的流失量略高于5—6月。主要原因是5—6月土壤疏松,且地表覆盖度低,此时,用秸秆适当覆盖地表,阻控效果非常明显;7—8月后地表覆盖度增加,固土能力增强,秸秆覆盖的阻控效果相对下降。



注:FG处理为扩大5倍后的值。下同。

图5 不同处理不同时期氮素流失情况

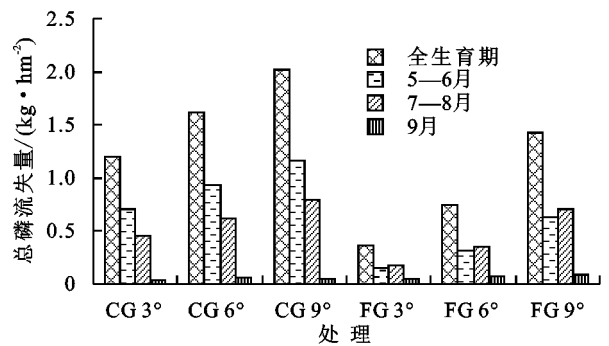


图6 不同处理不同时期磷素流失情况

3 结论

(1)随着坡度的增加,地表径流量、土壤流失量逐渐增加。常规模式下,地表径流量与降雨量呈正相关,土壤流失量与降雨量不相关。秸秆覆盖模式下,对地表径流和土壤流失阻控率均超过 90% ,阻控效果良好。

(2)土壤中氮磷流失呈现出随坡度增加而增加的趋势。氮素流失以溶解态为主,占氮总流失量 60% 以上;磷素流失以颗粒态为主,占磷总流失量 80% 以上。不同时期氮磷流失量对比发现,相对于7—8月,5—6月农田土壤覆盖度低,秸秆覆盖模式的阻控效果更佳。秸秆覆盖模式对土壤中总氮、总磷阻控率分

别超过 89% 和 85%，对于降低面源污染风险具有积极意义。

(3) 秸秆覆盖模式对地表径流、土壤流失及氮磷流失的阻控效果均为随坡度降低，阻控率增加。

参考文献:

- [1] 欧洋, 阎百兴, 白建宏, 等. 东北黑土区侵蚀沟危害面积识别研究[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 24-30.
- [2] 蔡强国, 范昊明, 沈波. 松辽流域土壤侵蚀危险性分析与防治对策研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 21-24.
- [3] Xu X Z, Xu Y, Chen S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: A retrospective study[J]. Environmental Science and Policy, 2010, 13(8): 793-800.
- [4] 吴电明, 夏立忠, 俞元春, 等. 坡耕地氮磷流失及其控制技术进展[J]. 土壤, 2009, 41(6): 857-861.
- [5] 张孝存, 郑粉莉, 安娟, 等. 典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 182-186.
- [6] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299.
- [7] 余玮, 黄璜, 官春云, 等. 我国典型农作区作物生产碳汇功能研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(1): 106-113.
- [8] 王勇强, 王玉宽, 傅斌, 等. 不同耕作方式对紫色土侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 333-335.
- [9] 杨子, 刘晓光, 宁静, 等. 典型黑土垄作区耕地沟蚀对土壤养分的影响研究[J]. 土壤, 2017, 49(2): 379-385.
- [10] 孟令钦, 李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 7-11, 44.
- [11] Domagalski J, Lin C, Luo Y, et al. Eutrophication study at the Panjiakou-Daheiting Reservoir system, northern Hebei Province, People's Republic of China: Chlorophyll-a model and sources of phosphorus and nitrogen[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1/3): 43-53.
- [12] 郑海金, 王辉文, 杨洁, 等. 地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J]. 中国水土保持, 2015(2): 36-39, 69.
- [13] 王良民, 王彦辉. 植被过滤带的研究和应用进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2074-2080.
- [14] 徐英鹏, 赵兰坡, 王宇, 等. 深松筑挡对黑土顺坡耕地不同形态磷流失的阻控效果[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 13-31, 66.
- [15] 潘继征, 李文朝, 陈开宁. 滇池东北岸生态修复区的环境效应: II. 污染净化效应[J]. 湖泊科学, 2006, 18(6): 578-584.
- [16] 王宇, 韩兴, 赵占军, 等. 垄沟秸秆覆盖对黑土顺坡耕地氮、磷养分阻控效果[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 137-140.
- [17] 陈帅. 黑土区坡耕地玉米秸秆还田水土保持功效研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [18] 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: 127-135.
- [19] 鲁耀, 胡万里, 雷宝坤, 等. 云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1544-1553.
- [20] 王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 69-75.
- [21] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 223-228.
- [22] Li L, Davis A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48(6): 3403-3410.
- [23] 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.
- [24] 辛平, 黄高宝, 徐银萍, 等. 耕作方式与地表覆盖量对苜蓿及小麦地水蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 16-18, 23.
- [25] 江森华, 黄荣珍, 谢锦升, 等. 闽北不同土地利用方式水土流失与降雨量的关系研究[J]. 闽江学院学报, 2011, 32(5): 125-129.
- [19] Govers G. Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. Earth Surface Processes Landforms, 1992, 17: 515-528.
- [20] 李凤英, 何小武, 肖青亮, 等. 急陡坡土壤侵蚀试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 38-44.
- [21] 任熠, 王先拓, 王玉宽, 等. 紫色土坡面细沟流的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 39-42, 46.
- [22] 敬向峰, 吕宏兴, 张宽地, 等. 不同糙率坡面水力学特征的实验研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 33-38.
- [23] 张光辉, 卫海燕, 刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 58-61.
- [24] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D, et al. A laboratory study of rill hydraulics; I. Velocity relationship[J]. Transactions of the Asabe, 1984, 27(3): 790-796.
- [25] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究, 1991(4): 39-46.

(上接第 36 页)