

玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究

王双¹, 叶良惠², 郑子成¹, 李廷轩¹

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 什邡市农业局, 四川 什邡 618400)

摘要: 以顺坡垄作、平作、横坡垄作坡面为研究对象, 研究自然降雨条件下, 黄壤坡耕地地表径流、壤中流及其氮素流失特征, 以期为研究区氮素流失预测和有效防控提供科学依据。结果表明: 自然降雨条件下, 玉米成熟期平均地表径流量分别为 0—20、20—40 cm 壤中流量的 7.96、8.22 倍。不同耕作措施间地表径流量和氮素流失量差异显著, 地表径流量和氮素流失量均表现为顺坡垄作>平作>横坡垄作, 顺坡垄作坡面地表径流量分别是平作和横坡垄作的 1.20、2.07 倍, 顺坡垄作坡面氮素流失量分别是平作和横坡垄作的 1.35、2.06 倍。在 0—20、20—40 cm 壤中流中横坡垄作径流量和氮素流失量则明显高于其他耕作措施坡面, 在 0—20 cm 壤中流中横坡垄作氮素流失量分别是顺坡垄作和平作的 2.45、1.90 倍; 在 20—40 cm 壤中流中横坡垄作氮素流失量分别是顺坡垄作和平作的 2.34、1.79 倍。地表径流为氮素流失的主要途径, 可溶态氮为氮素流失的主要形式, 占总氮流失量的 63.84%~72.61%; 硝态氮是坡耕地无机氮流失的主要成分, 占总氮流失量的 16.47%~59.17%。氮素流失量与径流量和降雨量均呈显著线性正相关关系。研究区自然降雨条件下, 横坡垄作能有效减少氮素流失, 合理的耕作措施有助于防治研究区水土资源和氮素流失。

关键词: 地表径流; 壤中流; 氮素流失; 玉米成熟期; 耕作措施

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0028-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.005

Characteristics of Runoff and Nitrogen Losses in Yellow Soil Sloping Cropland at Mature Stage of Maize

WANG Shuang¹, YE Lianghui², ZHENG Zicheng¹, LI Tingxuan¹

(1. College of Resource Science, Sichuan Agricultural University,
Chengdu 611130; 2. Agricultural Bureau of Shifang, Shifang, Sichuan 618400)

Abstract: The study took down slope ridge planting, flat planting, and cross ridge planting as the study object, studied the characteristics of surface runoff, interflow and nitrogen loss under natural rainfall conditions in the yellow soil area, and intended to provide the theoretical basis for predicting and preventing nitrogen loss. The results showed that: The average surface runoff at maize mature stages was 7.96 times and 8.22 times higher than the interflow in 0—20 cm and 20—40 cm soil depths under the conditions of natural rainfall. The surface runoff and nitrogen loss were significantly different under different tillage measures. The surface runoff and nitrogen loss were in order of down slope ridge planting>flat planting>cross ridge planting. The surface runoff of down slope ridge planting was 1.20 times and 2.07 times higher than that of flat and cross ridges planting respectively. Nitrogen loss in down slope ridge planting was 1.35 times and 2.06 times higher than that of flat and cross ridge planting. Under cross ridge planting, the interflow and nitrogen loss of the 0—20 cm and 20—40 cm soil depths were significantly higher, and nitrogen loss in 0—20 cm soil depths was 2.45 times and 1.90 times higher than that of down slope ridge and flat planting respectively, while nitrogen loss in the 20—40 cm soil depths was 2.34 times and 1.79 times higher than that of down slope ridge and flat planting respectively. Surface runoff was the main channel for nitrogen loss. The dissolved nitrogen accounted for 63.84%~72.61% of the total nitrogen loss, and was the main form of nitrogen loss. Nitrate nitrogen accounted for 16.47%~59.17% of the total nitrogen loss, and was the main form of inorganic nitrogen loss. There were significant linear positive correlations between nitrogen

收稿日期: 2018-05-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(41271307)

第一作者: 王双(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事养分流失和环境效应研究。E-mail: WangShuang7224@163.com

通信作者: 郑子成(1976—), 男, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

loss and runoff, rainfall. Cross ridge planting was an effective way to decrease nitrogen loss under the condition of natural rainfall and reasonable tillage measure can protect water and soil resources and prevent nitrogen loss in the study region.

Keywords: surface runoff; interflow; nitrogen loss; maize mature stage; tillage measures

坡耕地是水土流失最主要的策源地^[1],而降雨造成的径流带走了土壤中颗粒态和水溶态的养分,不仅降低了土壤肥力以及肥料的利用效率,而且也会引起水体污染等问题^[2-3]。因此深入探究坡耕地径流中氮素流失特征,可为研究区氮素流失预测和有效防控提供科学依据。降雨产生的地表径流是土壤氮素流失的优先途径,硝态氮和铵态氮是氮素流失的主要形态^[4]。近年来国内外在氮素流失方面开展了大量研究,但大多研究条件是模拟降雨,而对自然降雨条件下坡面氮素流失特征研究较少。有研究^[5]表明,在模拟降雨条件下,地表径流是氮素流失的优先途径,硝态氮和铵态氮是地表径流中氮素流失的主要形态。壤中流的产生对地表径流的变化有较大影响^[6],随研究的逐渐深入,壤中流对氮素流失的影响备受关注^[7]。有研究^[8]表明,在模拟降雨条件下红壤区壤中流为氮素流失的主要途径,且以可溶性总氮为主。郑子成等^[9]在野外人工模拟降雨条件下发现,平作措施在降雨强度为 1.0, 2.0 mm/min 下径流量最小,而在降雨强度为 1.5 mm/min 下,横坡措施径流量最小,平作措施和顺坡措施径流量达最大。而鲁耀等^[10]在自然降雨条件下发现横坡垄作氮素流失总量相比于顺坡垄作降低了 2/3 左右。可见,耕作措施对径流和氮素流失影响较大,不同耕作措施对氮素流失的控制效应也不尽相同。黄壤是四川旱坡耕地第二大土壤类型,水土流失较为严重^[11-12]。盆周山区降雨主要集中于夏季,玉米作为当地主栽旱坡地作物之一,其成熟期与该区域降雨侵蚀期相重。鉴于此,本研究以黄壤坡耕地为对象,探讨自然降雨条件下不同耕作措施玉米成熟期坡耕地地表径流、壤中流变化特点,分析不同径流作用下各形态氮素流失特征,揭示氮素流失量与耕作措施的关系,以期服务于区域山地黄壤水土流失的有效防控及农业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区隶属于四川省都江堰市灌口镇(31°00′34″N, 103°36′52″E),海拔 773.5 m。该区属亚热带湿润气候区,年均气温为 15.1℃,年均降水量为 1 218.4 mm,全年降水量的 80%集中于夏秋两季。研究区内为山地地貌,土壤类型为黄壤,质地为砂质中壤土,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 36.30%, 22.50%, 41.20%,土壤 pH 6.12,有机质含量 20.16 g/kg,全氮含量 1.46

g/kg,碱解氮含量 96.14 mg/kg,有效磷含量 7.51 mg/kg,速效钾含量 80.62 mg/kg。

1.2 试验设计

基于研究区实地调查和坡耕地坡度分布特点,设置径流小区为 4 m×2 m,小区坡度为 15°,为防止各小区间发生水分和养分交换,小区之间用水泥墙的田埂隔开。在小区坡面下部,用砖和水泥砌成高 10 cm 的“U”形集水槽,集水槽通过直径为 3.2 cm 的 PVC 管连接到径流收集桶中。在小区坡面下部 20, 40 cm 土层,用水泥砌有宽 30 cm,厚 1 cm 的集水面,在直径为 3.2 cm 的 PVC 管口处,铺设有卵石,通过 PVC 管收集 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,垄高 20 cm,垄宽 50 cm,垄距 90 cm,各耕作措施重复 3 次。

供试玉米品种为当地主栽的“资玉 22”,于 2016 年 4 月中旬播种。夏玉米栽培参照当地实际情况,采用穴播方式,单行双株种植,行距 90 cm,株距 45 cm。施肥情况为:氮肥(N) 270 kg/hm²,磷肥(P₂O₅) 90 kg/hm²,钾肥(K₂O) 75 kg/hm²,管理措施均按当地农耕习惯进行。

1.3 样品采集与分析

用径流桶收集地表径流和壤中流,采用比重瓶法测定含沙量 C(g/L);采用称重法测定径流与泥沙质量 $M_{\text{水样}}$ (kg) 和壤中流质量 $M_{\text{壤中流}}$ (kg);采用体积法测定径流与泥沙体积 $V_{\text{水样}}$ (L)。

收集地表径流和壤中流于 250 mL 塑料瓶中,加硫酸调至 pH≤2,存放于冰箱(<4℃)冷冻,待测。径流中总氮、可溶性总氮含量采用过硫酸钾氧化—间断化学分析法测定;硝态氮、铵态氮含量采用间断化学分析法测定^[13]。

1.4 数据处理

径流中氮素流失量=氮素流失浓度×径流量

试验数据采用 DPS 11.0 软件进行统计分析,选择 LSD 法进行多重比较,采用 Origin 9.0 和 Excel 2010 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 玉米成熟期降雨和径流特征

在玉米成熟期,共监测到 9 场降雨,其中侵蚀性降雨为 6 场。最大雨量和降雨强度分别为 55.86 mm 和 27.93 mm/h,属同一场降雨。在不同场次的

降雨条件下,各耕作措施间地表径流量和壤中流量特征量差异显著(表1)。由表1可知,在不同耕作措施坡面下,地表径流量均为最大。地表径流量变化范围为15.29~110.01 L,且地表径流总量占总径流量的80.18%。其中横坡垄作坡面的地表径流量为平作坡面的57.97%,顺坡垄作坡面的48.22%。而0—20,20—40 cm 壤中流量分别占总径流量的10.07%和9.75%,其流量变化范围分别为1.89~14.40,1.84~13.48 L,在20,40 cm 壤中流中横坡垄作坡面流量高于其他2种措施,横坡垄作坡面20,40 cm 壤中流量分别为平作坡面的1.55,1.76倍,顺坡垄作坡面的1.98,2.33倍。

2.2 地表径流中氮素流失特征

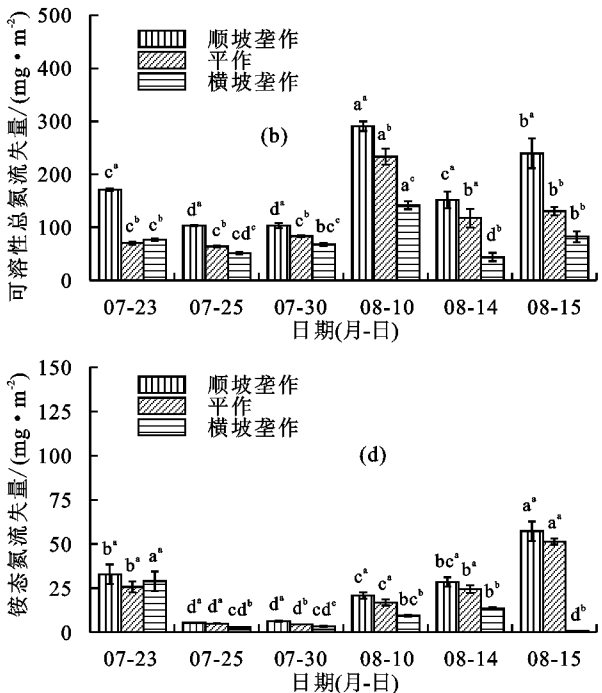
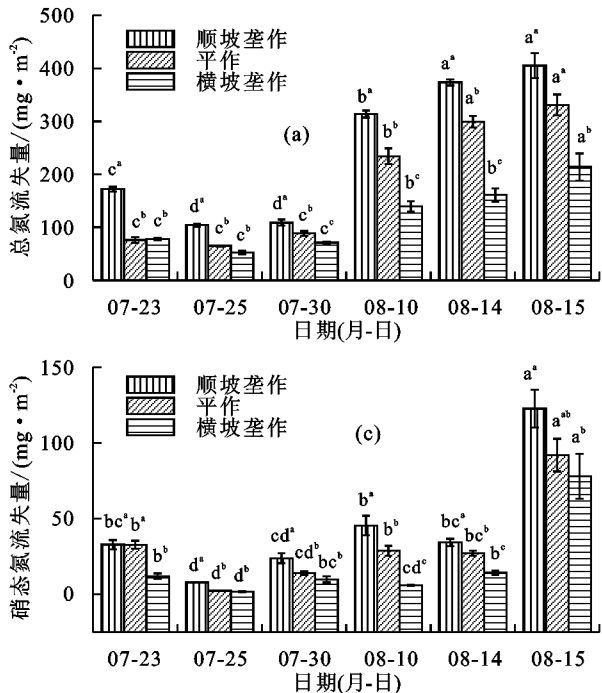
由图1可知,各形态的氮素流失量均表现为顺坡垄作>平作>横坡垄作。顺坡垄作坡面的总氮流失量分别是平作和横坡垄作的1.35,2.06倍,顺坡垄作坡面的可溶性总氮流失量是平作和横坡垄作坡面的1.52,2.29倍,顺坡垄作坡面的硝态氮流失量是平作和横坡垄作坡面的1.36,2.19倍,顺坡垄作坡面的铵态氮流失量是平作和横坡垄作的1.83,2.57倍。可溶性总氮占总氮流失量的63.84%~72.13%,是氮素流失的主要形态,而硝态氮和铵态氮流失量占总氮的比例变化范围分别为17.05%~18.09%和8.20%~10.22%。其各耕作措施坡面总氮和硝态氮流失总量均在8月15日为最大值,而各耕作措施坡面可溶性

总氮流失总量在8月10日达到最大值,而各耕作措施下铵态氮流失总量在8月15日达到最大值。

表 1 自然降雨条件下玉米成熟期降雨和径流特征

降雨时间	降雨量/mm	耕作措施	地表径流量/L	0—20 cm 壤中流量/L	20—40 cm 壤中流量/L
07—23	30.67C	顺坡垄作	46.39a ^a	3.21c ^b	3.03c ^b
		平作	36.85b ^a	3.69b ^b	3.69b ^b
		横坡垄作	21.11c ^a	7.21a ^b	6.10a ^b
07—25	24.67D	顺坡垄作	30.25a ^a	3.73c ^b	2.48c ^c
		平作	23.94b ^a	4.99b ^b	4.26b ^b
		横坡垄作	15.29c ^a	8.77a ^b	7.76a ^c
07—30	20.79D	顺坡垄作	30.17a ^a	1.89b ^b	1.84b ^b
		平作	26.50b ^a	2.35ab ^b	2.21ab ^b
		横坡垄作	19.32c ^a	2.71a ^b	2.34a ^b
08—10	50.48B	顺坡垄作	79.55a ^a	7.29c ^b	7.03c ^b
		平作	64.47b ^a	9.24b ^b	8.67b ^b
		横坡垄作	35.17c ^a	13.31a ^b	13.00a ^b
08—14	49.64B	顺坡垄作	92.93a ^a	4.85c ^b	4.30c ^b
		平作	80.48b ^a	6.87b ^b	5.53b ^c
		横坡垄作	40.44c ^a	14.40a ^b	12.18a ^c
08—15	55.86A	顺坡垄作	110.01a ^a	5.58a ^b	4.89c ^b
		平作	91.58b ^a	6.87a ^b	6.75b ^b
		横坡垄作	56.41c ^a	6.18ab ^c	13.48a ^b

注:表中不同大写字母表示不同降雨场次降雨量差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同措施径流量差异显著($P<0.05$);上标不同字母表示同一措施不同径流差异显著($P<0.05$)。



注:图中不同小写字母表示同一措施不同时间差异显著($P<0.05$);上标不同小写字母表示同一时间不同措施间差异显著($P<0.05$)。下同。

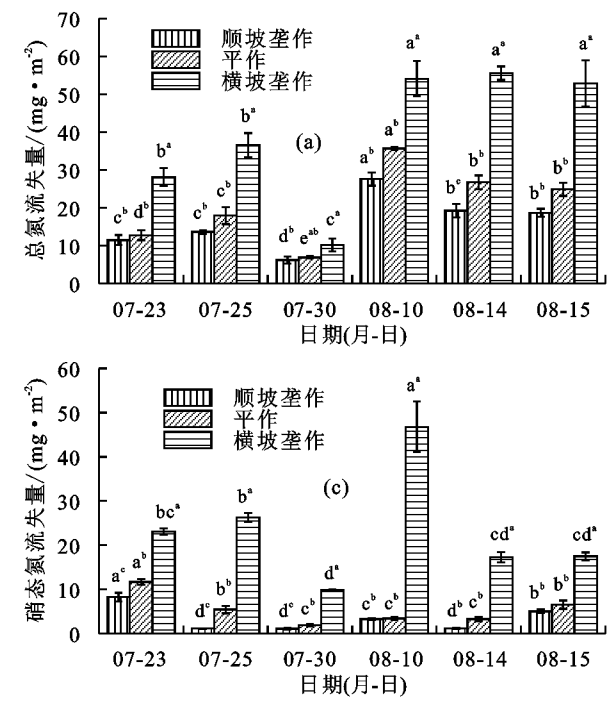
图 1 自然降雨条件下地表径流中各形态氮素流失量变化特征

2.3 壤中流中氮素流失特征

由图2可知,总氮、可溶性总氮和硝态氮的氮素流

失量均表现为横坡垄作>平作>顺坡垄作,铵态氮流失量变化呈现波动性。横坡垄作坡面的总氮流失量分别

是顺坡垄作和平作坡面的 2.45,1.90 倍,横坡垄作坡面的可溶性总氮流失量是顺坡垄作和平作坡面的 2.47,1.82 倍,横坡垄作坡面的硝态氮流失量是顺坡垄作和平作坡面的 7.13,4.39 倍。可溶性总氮占总氮流失量的 68.51%~



72.21%,而硝态氮和铵态氮流失量占总氮的比例变化范围分别为 20.32%~59.17%和 4.59%~11.54%。其各耕作措施总氮、可溶性总氮和硝态氮流失总量均在 8 月 10 日为最大值,而铵态氮流失总量在 7 月 23 日为最大值。

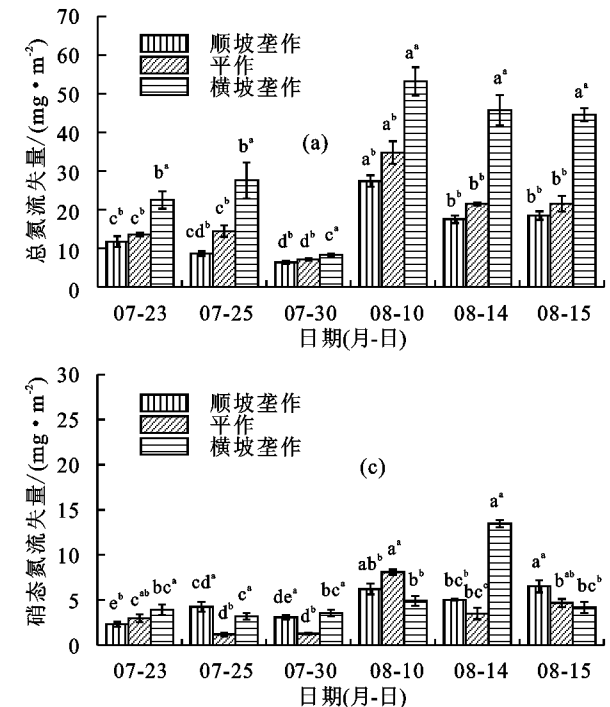
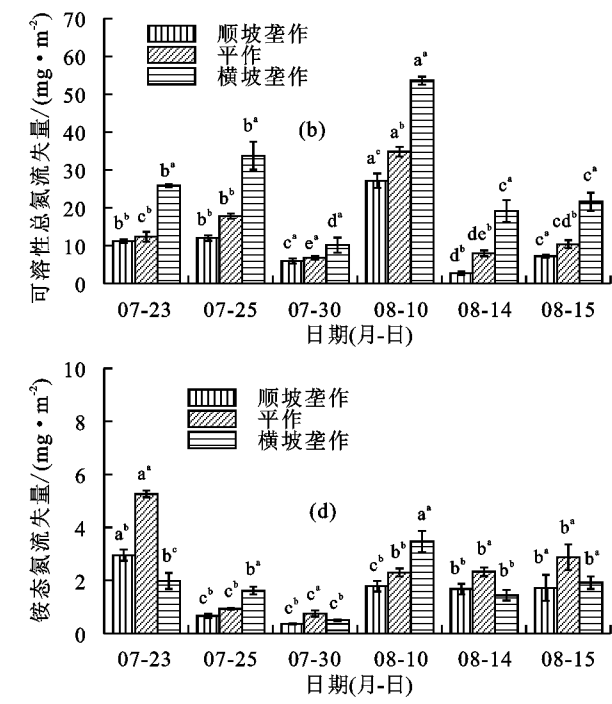


图 2 不同耕作措施下 0—20 cm 壤中流中各形态氮素流失量变化特征

由图 3 可知,总氮、可溶性总氮的氮素流失量表现为横坡垄作>平作>顺坡垄作,而硝态氮、铵态氮变化规律不明显。横坡垄作坡面的总氮流失量分别是顺坡垄作和平作坡面的 2.34,1.79 倍,横坡垄作坡面的可溶性总氮流失量是顺坡垄作和平作坡面的 2.21,1.75 倍。可溶性总氮占总氮流失量的



71.22%~72.61%,而硝态氮和铵态氮流失量占总氮的比例变化范围分别为 16.47%~30.39%和 7.51%~11.33%。在 8 月 10 日期各耕作措施的总氮和可溶性总氮达到最大值,铵态氮流失总量在 7 月 23 日为最大值,而各耕作措施硝态氮流失总量在 8 月 14 日为最大值。

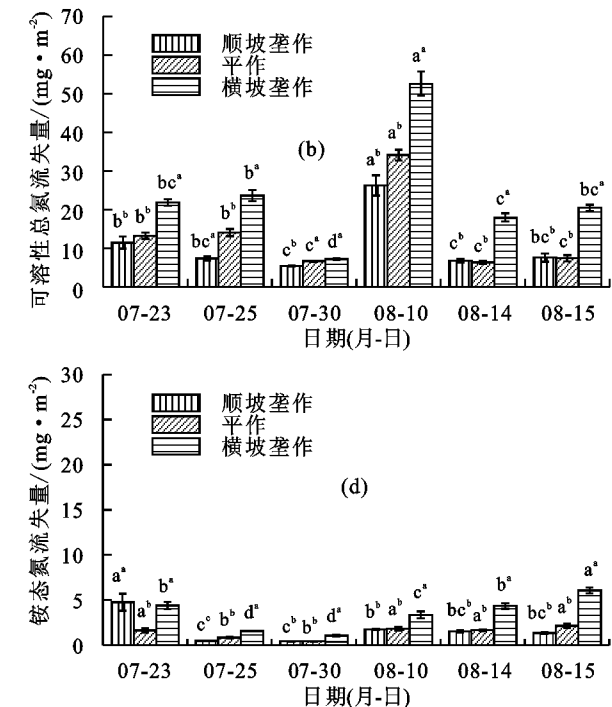


图 3 不同耕作措施下 20—40 cm 壤中流中各形态氮素流失量变化特征

2.4 氮素流失与径流量、降雨量的关系

由表 2 可知,氮素流失量与径流量和降雨量均有良好的相关性,且氮素流失量与径流量在 3 种耕作措施下地表径流与 20—40 cm 壤中流均呈极显著正相关关系,而在横坡垄作条件下,0—20 cm 壤中流中氮素流失量与

径流量关系不显著。在氮素流失量与降雨量的关系中可以看出,在 3 种耕作措施下,地表径流的氮素流失量与降雨量呈极显著正相关关系,而在 0—20 cm 壤中流中呈显著相关的关系,但在平作坡面 20—40 cm 壤中流中氮素流失量与降雨量关系不显著。

表 2 氮素流失量与径流量和降雨量的关系

处理	径流	氮素流失量与径流量		氮素流失量与降雨量	
		回归方程	R^2	回归方程	R^2
顺坡垄作	地表径流	$y=3.9391x-9.3587$	0.9915**	$y=8.7767x-93.2990$	0.9657**
	0—20 cm 壤中流	$y=3.8459x-0.8460$	0.9782**	$y=0.4079x+0.3883$	0.6898*
	20—40 cm 壤中流	$y=4.0642x-0.9228$	0.9945**	$y=0.4438x-2.1296$	0.7495*
平作	地表径流	$y=4.1103x-39.483$	0.9742**	$y=7.6014x-111.72$	0.9053**
	0—20 cm 壤中流	$y=4.1673x-2.7757$	0.9967**	$y=0.5849x-1.7747$	0.7195*
	20—40 cm 壤中流	$y=4.0339x-2.0784$	0.9574**	$y=0.5081x-0.8197$	0.6475
横坡垄作	地表径流	$y=3.9722x-4.9877$	0.9955**	$y=3.9128x-32.067$	0.8896**
	0—20 cm 壤中流	$y=3.2338x+11.264$	0.6238	$y=1.0877x-2.4740$	0.8160*
	20—40 cm 壤中流	$y=3.7211x-0.3592$	0.9613**	$y=1.0366x-6.4351$	0.8434**

注: * 表示相关系数达到显著水平($P<0.05$); ** 表示相关系数达到极显著水平($P<0.01$)。

3 讨论

坡耕地是水土流失的主要策源地,严重的水土流失往往导致大量的土壤养分流失,进而使得土地肥力降低^[14-15]。降雨是影响坡耕地土壤侵蚀重要因素之一^[16],地表径流量主要受降雨量的影响,在最大降雨量时其地表径流中径流量也为最大值,且在不同耕作措施下表现出顺坡垄作>平作>横坡垄作的趋势,这可能是因为横坡垄作拦蓄了地表径流,减少了坡面土壤的侵蚀和径流的汇集,因而降低了横坡面产流量,而顺坡耕作由于垄沟方向与地表水的流动方向相同,从而加速了水流速度,增加了地表径流,造成严重的水土流失^[17]。而横坡垄作能显著增加 0—20,20—40 cm 壤中流量,说明横坡垄作可以减缓径流冲刷速度,增加地表入渗,以此增加壤中流量。

在地表径流中氮素流失量与地表径流量表现出一致的规律,各形态的氮素流失量均表现出顺坡垄作>平作>横坡垄作,与径流量的变化趋势一致。在 0—20 cm 壤中流中除铵态氮外其他各形态的氮素其横坡垄作的氮素流失量均为最大值,也与壤中流量流失特征表现出一致的规律。而铵态氮则表现出波动性,这可能是因为铵根离子随着径流移动时,易被带负电荷的土壤颗粒所吸附,在降雨过程中,雨滴飞溅和径流持续破坏土壤大粒级团聚体,分散为比表面积大、吸附能力强的小粒级团聚体使铵根离子易于流失^[18],而在 20—40 cm 壤中流中总氮、可溶性总氮和铵态氮的氮素流失量均表现出横坡垄作>平作>顺坡垄作,其硝态氮流失量则表现出波动性,这可能是由于土壤中硝化细菌和氧化情况发生变化,土壤中硝态氮的含量不稳定,极易

被淋移,不易被土壤吸附,硝态氮浓度的不稳定掩盖了其流失量随降雨和径流变化的规律性^[19]。

已有研究^[20]表明,径流为氮素流失的主要途径,可溶性总氮为流失主要形态,而其中可溶性总氮又以硝态氮流失为主。本研究中径流氮素流失中也以可溶性总氮为流失主要形态,但可溶性氮中可溶性无机氮所占比例较小,硝态氮只是坡耕地径流无机氮流失的主要成分,这与焦平金等^[21]的研究得出的结果一致。本研究中地表径流氮素流失量显著高于 0—20,20—40 cm 壤中流氮素流失量,说明地表径流为氮素流失的重要途径,这可能与供试土壤的性质有关,选用的土壤为黄壤,质地较黏(黏粒含量为 41.20%),渗漏速率较慢,因此壤中流带走的土壤养分占黄壤总损失养分的比例较小。

本研究中降雨量和径流量均较大的 8 月 10 日、8 月 14 日和 8 月 15 日,其氮素流失量也较大。已有研究^[22]发现径流量和养分流失量具有线性相关性,且 Liu 等^[23]和 Wang 等^[24]研究均表明,径流量与氮素流失量呈极显著正相关。为了进一步弄清氮素流失量与径流量和降雨量的关系,将试验区氮素流失量与径流量和降雨量进行相关分析,分析发现氮素流失量与径流量和降雨量均有显著的正相关性。但这与闫建梅等^[17]的研究有一定差异,其研究表明氮素流失量与年降雨量相关性并不显著,但与径流量的相关性较显著。造成差异的原因可能是因为本试验集中于玉米成熟期,在此期间降雨量大,氮素流失主要受降雨影响,而闫建梅等^[17]的试验是年降雨试验,试验条件差异较大。

4 结论

(1)玉米成熟期内,各耕作措施坡面地表径流、0—20,20—40 cm 壤中流均受耕作措施影响显著,地表径流表现为顺坡垄作>平作>横坡垄作,而在0—20,20—40 cm 壤中流中横坡垄作则明显高于其他2种耕作措施。

(2)地表径流为氮素流失的主要方式。玉米成熟期内地表径流中氮素流失量总体表现为顺坡垄作>平作>横坡垄作的变化趋势,而在0—20,20—40 cm 壤中流氮素流失量中横坡垄作则明显高于其他2种耕作措施。

(3)试验区不同形态氮占总氮的比例依次为可溶性总氮>硝态氮>铵态氮,径流氮素流失以可溶性氮为主,硝态氮是坡耕地地表径流无机氮流失的主要成分。氮素流失量与径流量和降雨量均呈线性正相关关系,且氮素流失量与径流量呈极显著正相关关系。

参考文献:

- [1] 林超文,陈一兵,黄晶晶,等.不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J].中国农业科学,2007,40(10):2241-2249.
- [2] Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-associated nitrogen and phosphorus losses and particle size composition on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 66(3): 192-200.
- [3] 李英俊,王克勤,宋维峰,等.自然降雨条件下农田地表径流氮素流失特征研究[J].水土保持研究,2010,17(4):19-23.
- [4] 彭圆圆,李占斌,李鹏.模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流氮素流失特征[J].水土保持学报,2012,26(2):1-5.
- [5] 吴希媛,张丽萍,张妙仙,等.不同雨强下坡地氮流失特征[J].生态学报,2007,27(11):4576-4582.
- [6] 汪涛,朱波,罗专溪,等.紫色土坡耕地径流特征试验研究[J].水土保持学报,2008,22(6):30-34.
- [7] 周林飞,郝利朋,张玉龙.辽宁省浑河流域不同施肥方式下农田氮素随地表径流与壤中流流失特征[J].水土保持学报,2012,26(4):69-72.
- [8] 赵越,李泽利,刘茂辉,等.模拟降雨条件下坡度对茶园红壤氮素流失影响[J].农业环境科学学报,2014,33(5):992-998.
- [9] 郑子成,林代杰,李廷轩,等.不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):24-28.
- [10] 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.

- [11] Huang J, Zhao X N, Wu P T. Surface runoff volumes from vegetated slopes during simulated rainfall events [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 68(4): 283-295.
- [12] Miao C, Ashouri H, Hsu K L, 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.
- [13] 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.
- [14] Yakutina O P, Nechaeva T V, Smirnova N V. Consequences of snowmelt erosion: Soil fertility, productivity and quality of wheat on Greyzemic Phaeozem in the south of West Siberia [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2015, 200(2): 88-93.
- [15] 陈正维,朱波,刘兴年.自然降雨条件下紫色土坡地氮素随径流迁移特征[J].人民长江,2014,45(13):82-85.
- [16] 冯小杰,郑子成,李廷轩.紫色土区坡耕地玉米季地表径流及其氮素流失特征[J].水土保持学报,2017,31(1):43-48.
- [17] 闫建梅,何丙辉,田太强.不同施肥与耕作对紫色土坡耕地土壤侵蚀及氮素流失的影响[J].中国农业科学,2014,47(20):4027-4035.
- [18] 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,等.东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J].土壤学报,2015,52(3):489-498.
- [19] 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.
- [20] 汪庆兵,曹旖旎,张建锋,等.浙江赋石水库集水区板栗林土壤氮素迁移特征[J].应用生态学报,2017,28(2):545-553.
- [21] 焦平金,许迪,王少丽,等.自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J].农业环境科学学报,2010,29(3):534-540.
- [22] Kothiyari B P, Verma P K, Joshi B K, et al. Rainfall-runoff-soil and nutrient loss relationships for plot size areas of Bhetagad watershed in Central Himalaya, India [J]. Journal of Hydrology, 2004, 293(1): 137-150.
- [23] 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(3): 34-40.
- [24] Wang G, Wu 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(6): 180-191.