

细沟侵蚀阶段玉米季坡耕地氮素流失特征

何淑勤^{1,2}, 宫渊波^{1,2}, 郑子成³

(1. 四川农业大学林学院, 成都 611130; 2. 四川农业大学,

水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130; 3. 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 研究紫色土区坡耕地玉米全生育期细沟侵蚀阶段水土及氮素流失规律, 以期为研究区氮素流失有效防控提供科学依据。采用人工模拟降雨与野外径流小区相结合的方法, 开展降雨强度为 1.5 mm/min 条件下玉米全生育期细沟侵蚀阶段地表径流、壤中流和侵蚀泥沙中氮素流失特征的研究。结果表明: 细沟侵蚀阶段, 玉米各生育期地表径流量、壤中流量和侵蚀产沙量总体表现为随降雨时间延长呈先增加后平稳的变化趋势。地表径流中总氮、可溶性总氮、硝态氮和侵蚀泥沙中总氮流失量总体呈现先增加后平稳的趋势, 而地表径流中铵态氮流失量变化趋势在降雨前期呈现波动性变化, 降雨后期逐渐平稳。壤中流中总氮、可溶性总氮、硝态氮、铵态氮流失量则随着降雨时间延长呈现平稳的变化趋势。细沟侵蚀阶段地表径流中氮素流失总量在玉米苗期最大, 为 628.77 mg/m²; 壤中流中氮素流失总量在拔节期和抽雄期最大; 侵蚀泥沙中氮素流失总量在苗期最大, 为 144.95 mg/m²。壤中流为氮素流失主要途径, 硝态氮为氮素流失主要形态。

关键词: 细沟侵蚀; 玉米生育期; 地表径流; 壤中流; 侵蚀泥沙; 氮素流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0040-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.007

Characteristics of Nitrogen Loss in Sloping Farmland in the Whole Maize Growth Periods During Rill Erosion Stage

HE Shuqin^{1,2}, GONG Yuanbo^{1,2}, ZHENG Zicheng³

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130;

2. Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 3. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: In order to effectively prevent and control nitrogen loss in the growth stages of maize in the purple soil area during rill erosion stage, the soil erosion and nitrogen loss was studied. The artificial simulated rainfall combined with field runoff plot experiments were used to study the characteristics of nitrogen loss, including surface runoff, interflow and sediment yield, soil flow and erosion sediment, in the whole stages of maize during rill erosion stage under the rainfall intensity of 1.5 mm/min. The results showed that surface runoff, interflow and sediment yield were increased first with rainfall duration, and the values tended to peak during maize growth stages at rill erosion. Total nitrogen, soluble total nitrogen, nitrate and sediment yield in surface runoff showed an overall trend of first increase and then stability, while ammonium nitrogen loss showed volatility in the early rain period and became steady gradually with rainfall duration. The total nitrogen losses in surface runoff were the highest at seedling stage of maize, and the maximum was 628.77 mg/m². The total nitrogen losses in interflow were the highest at jointing stage and tasseling stage of maize. The total nitrogen losses in sediment yield were the highest at seedling stage of maize, and the maximum was 144.95 mg/m². Interflow were the main channels for nitrogen losses, and nitrate nitrogen was the main form of nitrogen loss during the rainfall process.

Keywords: rill erosion; maize growth stage; surface runoff; interflow; sediment yield; nitrogen loss

氮素是植物生长必需营养元素之一, 同时也是提高作物产量的主要贡献因子^[1-2]。近年来, 在作物生

长过程中氮肥投入量逐渐增加, 但是氮素利用率却逐渐降低, 多余的氮素随着径流和侵蚀泥沙流失^[3-4], 不

仅造成了土壤肥力降低,同时也是农业非点源污染的重要来源^[5-6]。细沟侵蚀常发育于坡耕地,是坡面水蚀物理过程的重要组成部分^[7]。已有研究^[8]表明,细沟一旦形成,其侵蚀量占坡面总侵蚀量的70%以上,在坡地侵蚀中具有极其重要的地位。细沟产生后,细沟深和水流速度等增加,此时土壤侵蚀强度也增加到片蚀的几倍到几十倍^[9],故细沟侵蚀常被视为坡耕地最剧烈的水蚀方式^[10-11]。因此,探讨细沟侵蚀阶段径流和侵蚀泥沙中氮素流失特征显得尤为必要。植被覆盖可以消减雨滴的动能,减少土壤侵蚀量和氮素流失量^[12-14],张铁钢等^[15]研究发现,与裸地相比,玉米和花生种植条件下土壤侵蚀量和氮素流失量均降低;作物各生育期的冠层结构对土壤侵蚀阶段和氮素流失也具有不同的调控作用^[16],Wu等^[17]研究表明,在白菜生长过程中,植被覆盖度较低时期的径流中氮素流失量显著高于植被覆盖度较高时期。可见,降雨条件下作物不同生育期,由于植被覆盖度的差异对氮素流失也会产生较大影响。川中丘陵紫色土区降雨主要集中于每年5—9月,玉米作为该区主栽旱地作物之一,生长期与主要降雨侵蚀期重叠,加之紫色土是一种高生产力岩性土,土层浅薄,极易发生土壤侵蚀^[18]。鉴于此,本文以紫色土区坡耕地为研究对象,从玉米全生育期的角度,系统探讨细沟侵蚀阶段发育过程中地表径流、壤中流和侵蚀泥沙及其氮素流失特征,为紫色土区坡耕地在细沟侵蚀寻求合理防护氮素流失时期提供一定理论基础,以期服务于紫色土区农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于长江上游沱江水系花椒沟小支流和响水滩上端(30°05′12″—30°06′44″N, 104°34′12″—104°35′19″E),属四川省资阳市雁江区松涛镇的响水村与花椒村,平均海拔395 m,年均降水量965.8 mm,全年80%的降雨集中在5—9月。研究区坡耕地以玉米种植为主,种植密度约40 000株/hm²,辅以种植白菜、芋头、辣椒等。土壤为遂宁组母质发育的紫色土,质地较轻,砂粒、粉粒和黏粒占总质量的比例分别为49%,29%和22%。土壤有机质和全氮含量分别为11.62,0.73 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别是40.13,14.08,86.64 mg/kg,土壤肥力较低。

1.2 试验设计

基于研究区野外实地调查,结合坡耕地面积小、分布零散等特点,试验小区设计为1 m×2 m。根据当地耕作措施习惯,在每一小区布设垄高30 cm,垄

宽50 cm,垄距90 cm的横垄。紫色土区大于10°坡耕地占耕地总面积70%以上,其中10°~20°坡耕地占65%以上^[19],故试验坡度设置为15°,所有试验重复3次(图1)。根据研究区多年降雨及夏季多暴雨特点,设计降雨强度为1.5 mm/min,跌坎出现为细沟侵蚀开始的标志^[20],降雨历时为细沟开始时间40 min,分别在玉米苗期(5月8日)、拔节期(5月31日)、抽雄期(6月30日)和成熟期(8月7日)进行人工模拟降雨,玉米每一生育期相应的叶面积指数分别为0.108,2.236,2.770和1.356。

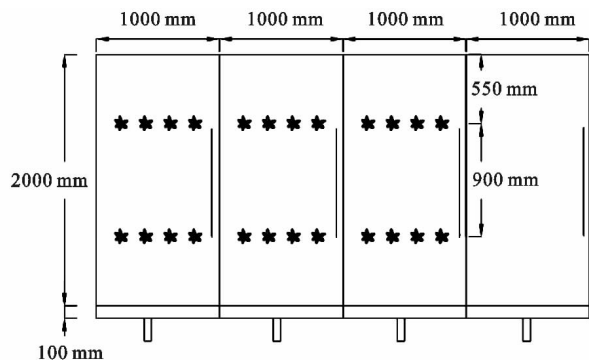


图1 径流小区平面示意

供试玉米(*Zay mays* L.)品种为“正红6号”,于2017年4月直播,行距90 cm,株距25 cm。播种前每小区基施尿素(N 46.4%) g,过磷酸钙(P₂O₅ 12%)120 g,氯化钾(K₂O 60%)30 g,于5月下旬追施尿素(N 46.4%)60 g。根据当地种植习惯,每小区种植玉米8株,其他管理措施与当地农耕习惯一致。人工降雨装置采用中国科学院水土保持研究所生产的SR型降雨机,装置喷头系统为美国V-80100。降雨机高度6 m,降雨均匀系数85%以上。

1.3 样品采集与分析

每个小区坡面下部用水泥砌成“V”形集水槽,集水槽通过PVC管连接到径流收集桶。小区下垫面用混凝土固化防渗形成相对不透水层(保持与土面相同坡度),使渗入土体中的水分到达此相对不透水层时,可通过挡板上直径为2 cm的小孔流入集水槽,用于收集壤中流。

用塑料桶收集地表径流和壤中流,每3 min收集1次,直至降雨结束。产流结束后,将径流收集桶放置3 h,待澄清后将径流和泥沙分开,并于105℃条件下烘干泥沙至恒重,待测。分别用体积法和烘干称重法测定径流体积和侵蚀泥沙量。收集径流上清液于250 mL塑料瓶中,加硫酸调pH≤2,存放冰箱(≤4℃)冷冻,待测。径流中总氮(TN)和可溶性总氮(DTN)采用碱性过硫酸钾氧化—Clever Chem 380间断化学分析仪测定;硝态氮(NO₃-N)和铵态氮

($\text{NH}_4\text{—N}$)直接采用间断化学分析仪测定;侵蚀泥沙中全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定^[21]。

1.4 数据分析与处理

径流中氮素流失量(mg/m^2) = 氮素流失浓度(mg/L) $\times$ 径流量(L/m^2)

侵蚀泥沙中氮素流失量(mg/m^2) = 氮素流失浓度(g/kg) $\times$ 侵蚀产沙量(g/m^2)

试验数据统计分析采用 DPS 11.0 软件,多重比较选择 LSD 法,采用 Origin 9.0 和 Excel 2007 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 径流和产沙特征

由图 2 可知,玉米各生育期地表径流量、壤中流量和侵蚀产沙量总体表现为随降雨时间延长而呈先增加后平稳的变化趋势。

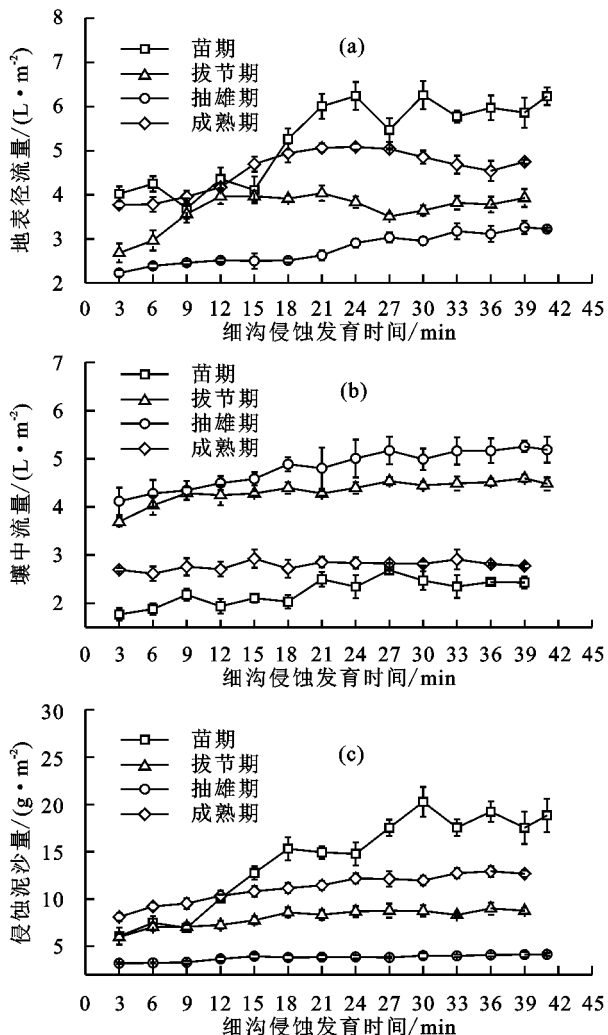


图 2 降雨条件下玉米季地表径流产流量、壤中流量和侵蚀产沙量动态变化特征

地表径流量在细沟侵蚀后期玉米苗期最大,平均值为 $5.25 \text{ L}/\text{m}^2$;相对于地表径流而言,玉米全生育期壤中流量增加幅度较小,且表现为在抽雄期最大,

平均值为 $4.83 \text{ L}/\text{m}^2$;侵蚀产沙量在玉米苗期细沟侵蚀阶段 15 min 时出现突增现象,在玉米各生育期的平均值分别为 14.24, 8.02, 3.82, 11.17 g/m^2 。

2.2 径流中氮素流失特征

由图 3 可知,玉米苗期地表径流中总氮流失量和可溶性总氮流失量在细沟侵蚀发育 21 min 达到最大后保持平稳的变化趋势,拔节期、抽雄期和成熟期总氮流失量随着降雨时间的延长变化幅度较小,在玉米全生育期总氮流失量的平均值分别为 44.91, 34.52, 21.59, 27.84 mg/m^2 。玉米拔节期和抽雄期的可溶性总氮流失量与总氮流失量变化趋势相似,而成熟期可溶性总氮流失量在细沟侵蚀发育 21 min 达到最小,在玉米全生育期可溶性总氮流失量的平均值分别为 40.64, 27.61, 18.22, 21.87 mg/m^2 。玉米苗期硝态氮流失量在细沟侵蚀发育 33 min 达到最大后基本保持平稳,拔节期、抽雄期和成熟期硝态氮流失量在细沟发育 12 min 达到最大。玉米全生育期铵态氮流失量依然呈现波动性,并均在细沟侵蚀发育 21~24 min 时最小。

由图 4 可知,在细沟侵蚀阶段,玉米苗期和拔节期壤中流中总氮流失量分别在细沟侵蚀发育 30 min 和 21 min 达到最大后保持平稳趋势,玉米抽雄期和成熟期总氮流失量在降雨初期缓慢增加,在降雨末期逐渐减小,玉米全生育期总氮流失量的平均值分别为 70.37, 158.65, 154.65, 72.92 mg/m^2 。玉米苗期、拔节期和成熟期可溶性总氮流失量与硝态氮流失量变化趋势总体呈现相似性,抽雄期可溶性总氮在细沟侵蚀发育 15~27 min 表现为减小的趋势,而该时期硝态氮流失量随着降雨时间的延长而增加。玉米苗期、拔节期和成熟期铵态氮流失量分别在细沟侵蚀发育 24, 18, 33 min 达到最大,并且在降雨末期,铵态氮流失量也逐渐趋于平稳,抽雄期铵态氮流失量随降雨时间的延长总体保持基本稳定的变化趋势。

2.3 侵蚀泥沙中氮素流失特征

由图 5 可知,玉米苗期侵蚀泥沙中氮素流失量在细沟侵蚀发育 30 min 达到最大后保持基本平稳的趋势,平均值为 15.19 mg/m^2 。玉米拔节期氮素流失量随降雨时间的延长缓慢增加,玉米抽雄期和成熟期氮素流失量则呈现平稳趋势,且玉米抽雄期氮素流失量显著小于其他生育期,平均值为 4.37 mg/m^2 。

2.4 氮素流失总量

由表 1 可知,在细沟侵蚀阶段玉米全生育期,壤中流为氮素流失的主要途径,地表径流中总氮、可溶性总氮、硝态氮和铵态氮流失总量均在玉米拔节期最大;而壤中流中氮素和硝态氮流失总量则在玉米拔节期和抽雄期最大,可溶性总氮流失总量在玉米拔节期最大;侵蚀泥沙中氮素流失总量在玉米苗期最大。

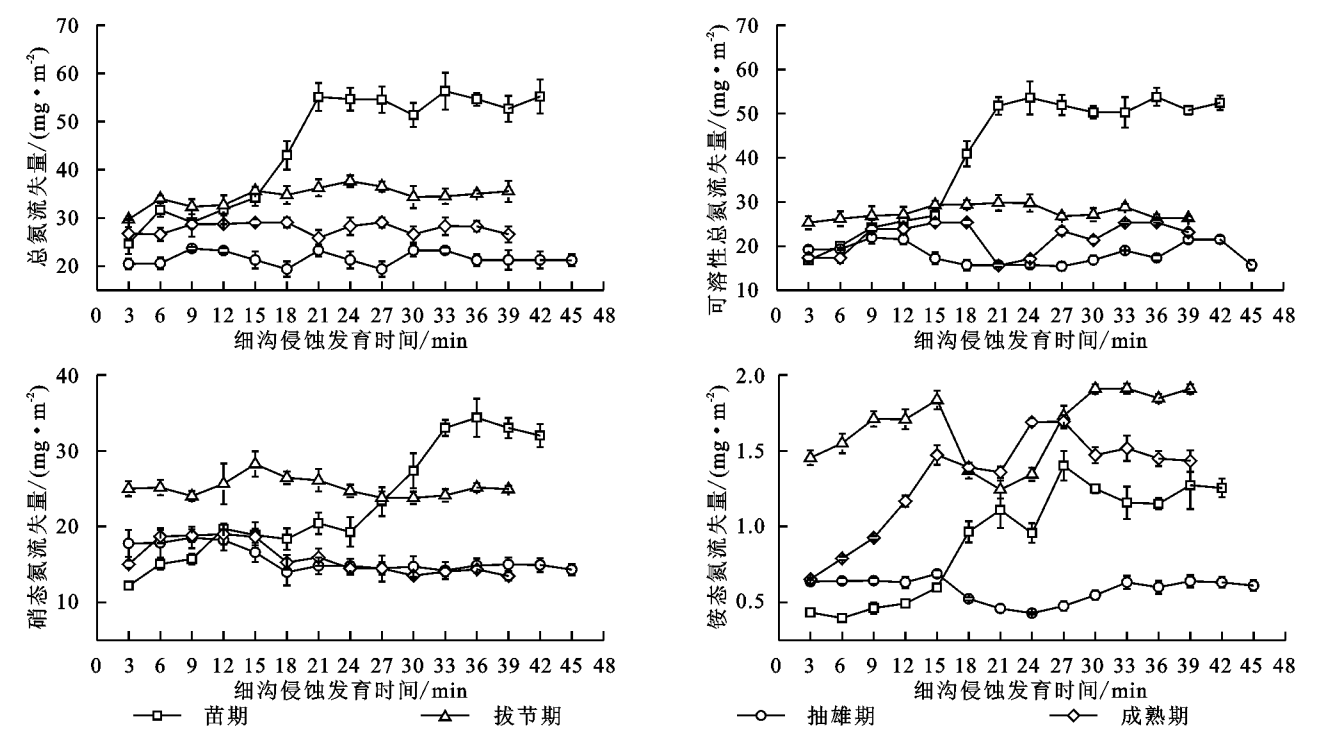


图 3 降雨条件下玉米季地表径流中氮素流失量动态变化特征

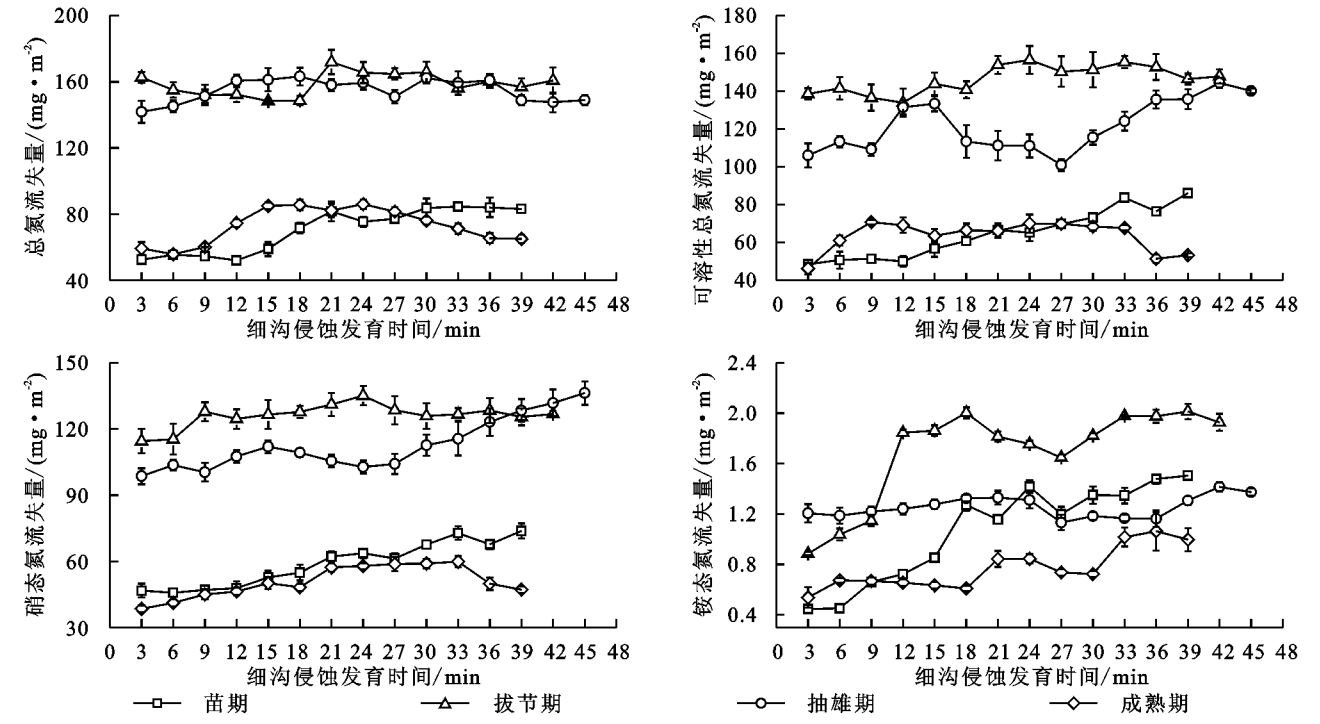


图 4 降雨条件下玉米季壤中流中氮素流失量动态变化特征

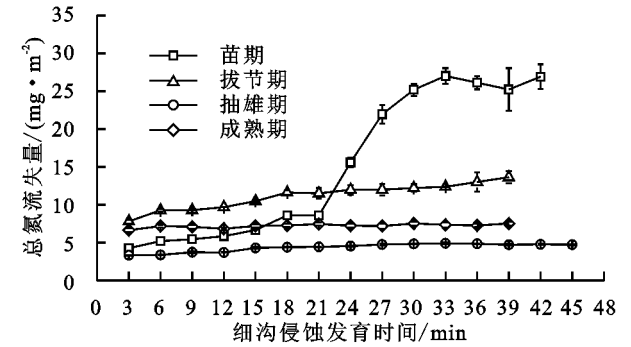


图 5 降雨条件下玉米季侵蚀泥沙中氮素流失量动态变化特征

3 讨论

植被覆盖是影响坡耕地土壤侵蚀的重要因素之一。一方面,植株对降雨进行再分配,减小雨滴动能,进而影响土壤侵蚀阶段发展;另一方面,植株根系则通过改变土壤结构,增加水分入渗和土壤的抗蚀性^[22]。在本研究中,径流量和侵蚀泥沙量均较高,表明细沟侵蚀阶段是水沙输出的主要阶段^[23]。此外,玉米苗期地表径流径流量和侵蚀泥沙量随细沟发育呈波动增加趋势明显,而其他生育时期则呈现缓慢增

加趋势,这主要由于玉米苗期植株冠层对降雨截留能力弱,加之本降雨条件下雨滴动能较大,雨滴的击打能力增强了径流紊动性,径流侵蚀力增加^[24],随着细沟发育径流量和侵蚀泥沙量增幅明显。地表径流量在玉米苗期最大,而壤中流量则在抽雄期最大,这主要是因为苗期叶面积指数最小,对降雨截留作用甚微,故雨滴溅散土壤颗粒易于阻塞土壤孔隙,进而

影响水分入渗。而在玉米抽雄期,一方面玉米叶面积指数较大,径流动能较小,坡面接纳雨水与土壤表面接触充分,入渗能力较强;另一方面,这一生育期玉米根系较为发达,影响土壤内部孔隙分布,故促使壤中流增加。侵蚀产沙量也表现为在玉米苗期最大,抽雄期最小,这可能是由于叶面积指数和玉米根系共同作用所致。

表 1 玉米季径流和侵蚀泥沙中氮素流失总量

单位:mg/m²

生育期	地表径流				壤中流				侵蚀泥沙
	TN	DTN	NO ₃ ⁻ —N	NH ₄ ⁺ —N	TN	DTN	NO ₃ ⁻ —N	NH ₄ ⁺ —N	
苗期	628.77Ab	569.01b	322.59Ab	12.89Ca	914.78Ba	839.20Ca	763.80Ba	13.86Ba	212.70Ac
拔节期	448.72Bb	358.87Bb	327.03Ab	21.52Aa	2221.15Aa	2050.31Aa	1764.55Aa	23.74Ab	144.95Bc
抽雄期	323.88Cb	273.36Cb	234.94Bb	8.78Ca	2319.69Aa	1826.08Ba	1691.81Aa	18.84Ba	65.51Dc
成熟期	361.88Cab	284.28Ca	205.56Bb	17.01Ba	947.97Ba	823.79Ca	659.02Ba	10.01Cb	93.91Cc

注:表中大写字母表示不同生育期之间在 0.05 水平上差异显著,小写字母表示同一生育期不同流失途径之间在 0.05 水平上差异显著。

地表径流、壤中流和侵蚀泥沙是土壤中氮素流失的主要途径,良好的植被覆盖能够有效控制相同时段内不同途径氮素流失量^[25-26]。本研究中,细沟侵蚀阶段地表径流和壤中流中氮素流失量均随着降雨时间的延长而总体增加,这是由于氮素易于富集于土壤颗粒表层,随着径流与土壤充分接触,大量氮素溶入径流中并随之流失^[27]。细沟侵蚀阶段地表径流和壤中流中氮素流失率在玉米拔节期最大,主要由于研究区玉米拔节期要进行追肥,故增加了土壤中的氮素浓度,促进了氮素流失。玉米苗期侵蚀泥沙中氮素流失量显著高于其他生育期,这主要是因为玉米苗期植被覆盖度小,土壤侵蚀严重,土壤颗粒被破坏释放出大量氮素随之流失。细沟侵蚀阶段地表径流、壤中流和侵蚀泥沙中氮素流失率均较大,主要是由于在细沟侵蚀过程中,径流具有较强的冲刷能力,径流和侵蚀泥沙具有携带大量的氮素的能力^[28];并且在侵蚀过程中由于细沟形态也在不断改变,径流持续破坏土壤颗粒从而使更多的氮素溶于地表径流^[23]。经计算分析可知,对不同流失途径而言,玉米各生育期地表径流和壤中流对氮素流失贡献率分别为 11.11%~34.42%和 53.93%~87.62%,表明地表径流和壤中流均是氮素流失的重要途径,且壤中流是氮素流失的主要途径。经分析可知,在玉米苗期,地表径流和壤中流中硝态氮占可溶性总氮的比例分别为 56.68%和 90.99%;拔节期地表径流和壤中流中硝态氮占可溶性总氮的比例分别为 91.20%和 86.05%;抽雄期地表径流和壤中流中硝态氮占可溶性总氮的比例分别为 86.00%和 92.66%;成熟期地表径流和壤中流中硝态氮占可溶性总氮的比例分别为 72.29%和 80.02%。可见,不同途径各形态氮素流失总量可以看出可溶性总氮为地表径流和壤中流中氮素流失的

主要形态,而硝态氮为可溶性总氮流失的主要形态,这与莫明浩等^[29]得出的结论一致。对于不同生育期而言,地表径流中硝态氮和铵态氮流失量在玉米拔节期最大,这是因为在拔节期植株根系土壤 pH 变化和土壤微生物作用使土壤中产生大量的硝酸根和铵根离子供植物吸收利用所致^[30]。壤中流中硝态氮和铵态氮流失量则在玉米抽雄期或者拔节期最大,表明此时壤中流量和土壤中氮素浓度是影响硝态氮和铵态氮流失的主要因素。

4 结论

(1)在细沟侵蚀阶段,紫色土区玉米全生育期径流量和侵蚀泥沙量随降雨时间延长先增加后平稳;地表径流和侵蚀泥沙量平均值均表现在玉米苗期最大,壤中流量平均表现为玉米抽雄期最大,控制玉米苗期的地表径流量、侵蚀泥沙量和抽雄期壤中流量是减少氮素流失的前提条件。

(2)地表径流、壤中流和侵蚀泥沙中氮素流失量总体随降雨时间的延长呈现先增加后平稳的趋势。地表径流和侵蚀泥沙中氮素流失量在玉米苗期最大,壤中流中氮素流失量在玉米抽雄期和拔节期最大,在玉米全生育期,壤中流为氮素流失主要途径。可溶性总氮为氮素流失的主要形态,硝态氮为可溶性总氮流失主要形态。

(3)径流为氮素流失主要载体,因此减少紫色土区细沟侵蚀阶段氮素流失总量首先控制拔节期和抽雄期壤中流中氮素流失总量,其次为玉米苗期地表径流中氮素流失总量。

参考文献:

- [1] Jia X C, Shao L J, Liu P, et al. Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (*Zea mays* L.) under lysime-

- ter conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 137: 92-103.
- [2] Liu Z J, Meng Y, Cai M, et al. Coupled effects of mulching and nitrogen fertilization on crop yield, residual soil nitrate, and water use efficiency of summer maize in the Chinese Loess Plateau [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(33): 1-12.
- [3] Wilson G V, McGregor K C, Boykin D. Residue impacts on runoff and soil erosion for different corn plant populations [J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 99(2): 300-307.
- [4] Cherobim V F, Huang C H, Favaretto N. Tillage system and time post-liquid dairy manure: Effects on runoff, sediment and nutrients losses [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 96-103.
- [5] Wang G Q, Hapuarachchi P, Ishidaira H, et al. Estimation of soil erosion and sediment yield during individual rainstorms at catchment scale [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(8): 1447-1465.
- [6] 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: 180-191.
- [7] Qin C, Zheng F, Xu X, et al. A laboratory study on rill network development and morphological characteristics on loessial hillslope [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2017, 18(7): 1-12.
- [8] Shen H, Zheng F, Wen L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J]. *Geomorphology*, 2014, 231: 193-201.
- [9] 赵龙山, 侯瑞, 吴发启. 黄土坡面细沟侵蚀研究进展与展望 [J]. *中国水土保持*, 2017(9): 47-51.
- [10] Peng W, Zhang Z, Zhang K. Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(17): 3677-3686.
- [11] Chen X Y, Zhao Y, Mi H X, et al. Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method [J]. *Catena*, 2016, 136: 135-140.
- [12] Liu R, Wang J, Shi J, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 1069-1077.
- [13] 刘泉, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨条件下不同植被覆盖度/格局的坡地土壤铵态氮流失特征 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 75.
- [14] 罗艺, 吴福忠, 杨万勤, 等. 四川盆地紫色丘陵区不同种植模式下氮流失特征 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2221.
- [15] 张铁钢, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨条件下不同种植方式的坡地氮素流失特征 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 5-8.
- [16] 马波, 吴发启, 陈宇, 等. 玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 118.
- [17] Wu X Y, Zhang L P, Fu X T, et al. Nitrogen loss in surface runoff from Chinese cabbage fields [J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2011, 36(9): 401-406.
- [18] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(9): 1847-1854.
- [19] 车明轩, 宫渊波, 穆罕默德·纳伊姆·汉, 等. 人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 164-168.
- [20] 王鹏飞, 郑子成, 张锡洲, 等. 玉米季横垄坡面细沟侵蚀特征及其影响因素 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 869-880.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] Lin Y M, Cui P, Ge Y G, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 13-26.
- [23] 马小玲, 张宽地, 杨帆, 等. 坡面细沟侵蚀断面形态发育影响因素分析及动力特性试验 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 209-216.
- [24] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 玉米植株对降雨再分配过程的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(12): 2608-2615.
- [25] 彭圆圆, 李占斌, 李鹏. 模拟降雨条件下丹江鹦鹉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.
- [26] Garcia-Estringana P, Alonso-Blázquez N, Alegre J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 389: 363-372.
- [27] Wu L, Long T, Cooper W J. Temporal and spatial simulation of adsorbed nitrogen and phosphorus non-point source pollution load in Xiaojiang Watershed of three gorges reservoir area, China [J]. *Environmental & Engineering Science*, 2012, 29: 238-247.
- [28] 郝好鑫, 郭忠录, 王先舟, 等. 降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 134-140.
- [29] 莫明浩, 谢颂华, 张杰, 等. 红壤坡地氮溶质分层输出特征试验研究 [J]. *水利学报*, 2016, 47(7): 924-933.
- [30] 张学林, 徐钧, 安婷婷, 等. 不同氮肥水平下玉米根际土壤特性与产量的关系 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(14): 2687-2699.