

紫色土区坡耕地玉米季地表径流及其氮素流失特征

冯小杰, 郑子成, 李廷轩

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 研究川中丘陵紫色土区坡耕地玉米全生育期地表径流及其氮素流失特征, 以为坡耕地氮素流失预测和有效防控提供理论依据。采用人工模拟降雨与微小区(1 m×2 m)相结合的方法, 降雨强度设置为1.0、1.5、2.0 mm/min, 分别在玉米苗期、拔节期、抽雄期和成熟期进行人工模拟降雨。结果表明: 玉米全生育期地表径流量及其氮素流失量随降雨强度的增加而增加。不同降雨条件下, 玉米全生育期地表径流总量表现为苗期显著高于其它生育期。玉米拔节期地表径流中氮素平均流失浓度高达16.36 mg/L; 地表径流中氮素平均流失量在玉米苗期最高, 为10.24 mg/m², 而抽雄期仅为2.97 mg/m²。玉米苗期地表径流中铵态氮流失量最大, 成熟期地表径流中硝态氮流失量最大, 抽雄期硝态氮和铵态氮流失量均最小; 玉米全生育期地表径流中硝态氮为氮素流失的主要形态, 占总氮的77.98%~97.85%。玉米拔节期氮素流失浓度最高, 而苗期为氮素输出负荷量最大, 苗期和拔节期地表径流中氮素流失易造成地表水体富营养化, 可通过控制基肥、追肥的施入量和增加地表覆盖度减少氮素流失。

关键词: 模拟降雨; 玉米全生育期; 地表径流; 硝态氮; 铵态氮

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0043-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.008

Characteristics of Runoff and Nitrogen Loss in Sloping Cropland of Purple Soil during Corn Growing Season

FENG Xiaojie, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan

(College of Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: The characteristics of runoff and nitrogen loss in sloping cropland of purple soil during corn growth stages were carried out to provide a theoretical basis for the prediction and effective prevent of nitrogen loss in sloping cropland. Simulated rainfall combined with runoff plot experiments (1 m×2 m) was employed during each corn growth stage, including seedling stage, elongation stage, tasseling stage and maturity stage. The rainfall intensities were set as 1.0 mm/min, 1.5 mm/min and 2.0 mm/min. The results indicated that the runoff in soil surface and nitrogen loss increased with the increasing rainfall intensity during corn growth stages. Total runoff in the seedling stage was significantly higher than that in other growth stages. The average concentration of nitrogen loss in the elongation stage was up to 16.36 mg/L. The average amounts of nitrogen loss obtained the maximum value of 10.24 mg/m² at the seedling stage, and the minimum value of 2.97 mg/m² at the tasseling stage. For the nitrogen forms, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen accounted the greatest part of nitrogen loss at seedling stage and maturity stage of corn, respectively, and the loss of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen was the least at the tasseling stage of corn. During the whole growth stages of corn, nitrate nitrogen was the main nitrogen form in the runoff of surface soil and accounted 77.98%—97.85% of the total nitrogen loss. The concentration of nitrogen loss was the highest in the elongation stage, and the nitrogen loss amount was the greatest in the elongation stage of corn. Nitrogen loss in the seeding and elongation stage of corn could easily lead to the eutrophication in waters. Thus, it was necessary to cut the application of base fertilizer and top dressing of nitrogen, and increase vegetation cover to reduce nitrogen loss in runoff.

Keywords: simulated rainfall; corn growing season; runoff; nitrate; ammonium

收稿日期: 2016-08-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41271307); 四川省教育厅项目(15ZB0009); 四川农业大学学科双支计划团队项目(2016)

第一作者: 冯小杰(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事养分流失与环境效应研究。E-mail: FengXJ2016@163.com

通信作者: 郑子成(1972—), 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

川中丘陵紫色土区是四川乃至长江上游最重要的农业区域,土地垦殖率高,土体较薄,是一种侵蚀型的高生产力岩性土,极易发生水土流失^[1-3]。严重的水土流失不仅造成土壤生产力下降,同时氮素随地表径流进入水体,加剧区域水体的富营养化^[4],因此深入探究坡耕地地表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^[5-6]。朱波等^[7]通过对川中丘陵区小流域坡耕地氮素收支分析表明氮素流失主要受地表径流影响。影响土壤氮素流失的因素虽较多,但现有研究多数集中于土地利用方式、耕作措施、施肥、雨强和坡度等方面,陈安磊等^[8]研究发现不同土地利用方式下地表径流中氮素流失量表现为农作>油茶林>湿地松>草地>自然林地。鲁耀等^[9]认为与顺坡垄作相比,横坡垄作种植条件下氮素流失总量降低了 2/3 左右。闫建梅等^[10]研究发现改变施肥制度可减小紫色土坡耕地地表径流量及其氮素流失量。Wang 等^[11]通过模拟降雨试验得出坡度与降雨强度和氮素流失浓度无明显差异,但与氮素流失量呈现显著相关关系。也有学者指出作物不同生育期植被覆盖度差异显著,对降雨的再分配和截留等特征也有较大影响^[12-13],张铁钢等^[14]研究表明覆盖度较高的花生地地表径流中氮素流失浓度高于覆盖度较低的玉米地。可见,耕作措施及植被覆盖度对地表径流及其氮素流失影响较大。川中丘陵紫色土区降雨主要集中于 5—9 月,区域内坡耕地以种植玉米为主,玉米生长期大致与暴雨侵蚀期相重,易于产生大量地表径流。鉴于此,本文以紫色土区玉米季坡耕地为研究对象,系统探讨玉米全生育期地表径流及其氮素流失特征,弄清玉米全生育期降雨过程中地表径流及其氮素流失动态变化过程,阐明氮素流失量与径流量、降雨量和植株叶面积指数的关系,可为紫色土区坡耕地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(104°34′12″—104°35′19″ E,30°05′12″—30°06′44″ N),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,年均降雨量 965.8 mm,每年 80% 的降雨集中在 5—9 月,年平均温度 16.8 ℃。研究区坡耕地以玉米种植为主,辅以种植白菜、芋头、海椒等。玉米按照当地实际情况,密度约 40 000 株/hm²。土壤为遂宁组母质发育的紫色红棕紫泥,质地较轻,土壤肥力较低。供试土壤有机质含量 11.62 g/kg,全氮含量 0.73 g/kg,

碱解氮含量 40.13 mg/kg,有效磷含量 14.08 mg/kg,速效钾含量 86.64 mg/kg。对其粒径进行分析得出,砂粒、粉粒和黏粒占总质量的比例分别为 49%,29%,22%。

1.2 试验设计

根据研究区域多年降雨特点,按照玉米生育期降雨频率,设计降雨强度分别为 1.0,1.5,2.0 mm/min,降雨历时为 60 min,分别在玉米苗期、拔节期、抽雄期和成熟期进行。基于野外实地调查,结合坡耕地面积小、分布零散等特点,本研究将试验小区设计为 1 m×2 m 的微小区。小区下垫面用混凝土固化防渗形成相对不透水层,并铺 10 cm 厚石英砂,上面覆土 60 cm。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。根据当地农耕习惯,在每一小区布设横坡垄作,垄高 30 cm,垄宽 50 cm,垄距 90 cm。依据研究区坡度的分布特点,试验坡度设置为 15°,所有试验重复 3 次,共计 12 场降雨。

供试玉米品种正红 6 号,于 2015 年 4 月垄上单行直播,行距 90 cm,株距 25 cm。播种前基施磷酸一铵和硫酸钾 175 kg/hm² 和 150 kg/hm²,于 4 月下旬和 5 月下旬分别追施尿素 125 kg/hm² 和 140 kg/hm²。其他管理措施与当地农耕习惯一致。

采用人工模拟降雨法,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。降雨机高度为 6 m,降雨均匀系数在 85% 以上。降雨前进行仪器调试与降雨率定,试验中准确记录坡面产流时间。

1.3 取样与测试

用塑料桶收集地表径流,每 3 min 收集一次,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,用体积法测定径流体积。收集径流上部清液于 250 ml 塑料瓶中,加硫酸调 pH≤2,存放冰箱(≤4 ℃)冷藏,待测。总氮采用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法;硝态氮采用紫外分光光度法;铵态氮采用靛酚蓝分光光度法^[15]。

1.4 数据处理及分析

地表径流中氮素流失量=氮素流失浓度×地表径流量

试验数据统计分析采用 DPS 11.0 软件,多重比较选择 LSD 法,图表制作采用 Origin 9.0 和 Excel 2003。

2 结果与分析

2.1 坡耕地玉米季地表径流特征

由图 1 可以看出,不同降雨条件下,在产流初期玉米各生育期地表径流量均随降雨的延续而增加,苗期和成熟期、拔节期和抽雄期分别在 12 min 和 27 min 左右达到稳定状态。地表径流总量表现抽雄期

最低,仅为1.03 L/m²,分别为苗期、拔节期、成熟期的 51.50%,70.55%,64.38%。降雨强度对玉米苗期、拔节期和成熟期的地表径流量在产流 15 min 后有显著影响,而抽雄期则出现在 27 min 左右。地表

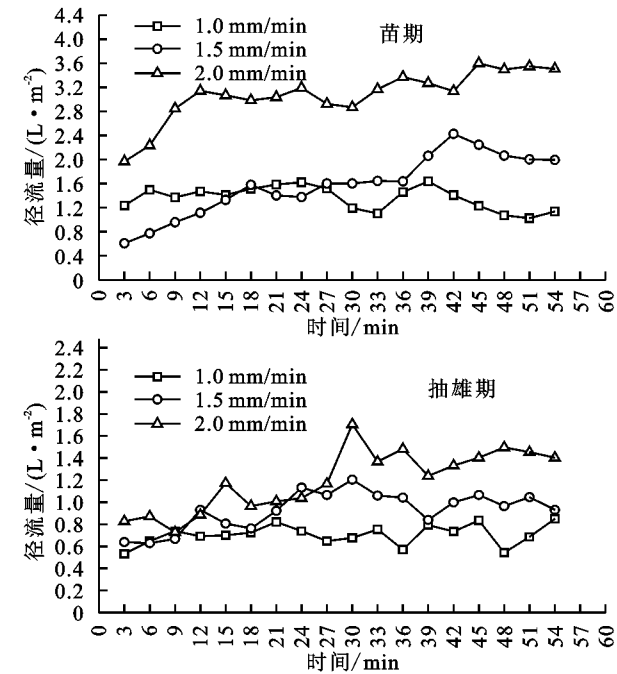


图 1 玉米季不同降雨强度条件下地表径流动态变化特征

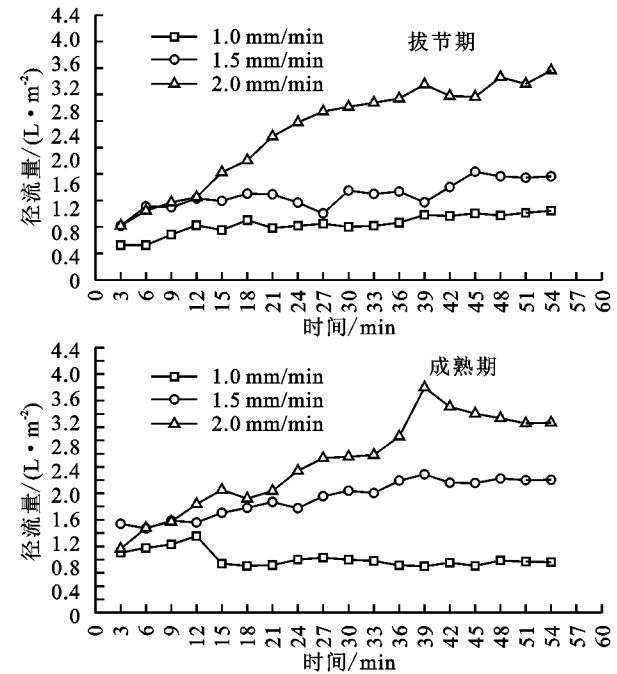
2.2 坡耕地玉米季地表径流中氮素流失特征

由图 2 可以看出,玉米各生育期地表径流中氮素流失浓度随着降雨时间延长呈现波动性变化,地表径流中氮素平均流失浓度总体表现为拔节期>抽雄期>苗期>成熟期。苗期和拔节期在降雨强度为 1.5 mm/min 时地表径流中氮素平均浓度最高,分别为 7.44, 13.18 mg/L;抽雄期和成熟期地表径流中氮素流失浓度分别在降雨强度 2.0,1.0 mm/min 时达到最高,为 10.47,6.95 mg/L。而氮素流失量在玉米苗期达到最高,而抽雄期最低。随着降雨时间的延长,玉米全生育期氮素流失量最大值分别出现在产流的 39, 48,30,45 min 左右。在产流 45,48 min 后,玉米苗期和成熟期、拔节期和抽雄期氮素流失量分别呈现降低和平稳的趋势。氮素流失量随降雨强度的增加而增加,在2.0 mm/min 条件下,玉米全生育期地表径流中氮素流失平均量分别为降雨强度 1.0 mm/min 条件下 2.13,2.23,2.93,1.80 倍。玉米全生育期氮素流失量变化较大,为 0.90~18.05 mg/m²,造成氮素流失量变化较大的原因可能与降雨量、径流量和植株的叶面积指数有关。将玉米全生育期降雨量、径流量和植株叶面积指数与氮素流失累积量进行回归分析得出: $Y=34.60608+1.125835X_1+1.19495X_2-45.9099X_3$ ($R^2=0.8535, P<0.01$)。式中:Y 为氮素流失量(mg);X₁ 为降雨量(mm);X₂ 为径流量(L);X₃ 为叶面积指数。

2.3 坡耕地玉米季地表径流中氮组分流失特征

2.3.1 地表径流中氮组分流失比例 从表 1 可以看

平均径流量随降雨强度增加而增加,在 2.0 mm/min 降雨强度条件下,地表径流总量均最大,分别是 1.5, 1.0 mm/min 降雨强度条件下的 1.95,1.76,1.28, 1.31倍和 2.26,2.68,1.74,2.78 倍。



出,地表径流中氮素流失以硝态氮为主,占总氮的 77.98%~97.85%,在玉米各生育期地表径流中硝态氮流失量所占比例大小表现为抽雄期>成熟期>拔节期>苗期,玉米苗期和拔节期地表径流中硝态氮所占比例在 1.0 mm/min 降雨强度条件下最高,抽雄期在 2.0 mm/min 降雨强度条件下最高,成熟期却在 1.5 mm/min 降雨强度条件下最高。地表径流中铵态氮流失所占比例依次为抽雄期>拔节期>成熟期>苗期,玉米苗期地表径流中铵态氮所占比例在 1.0 mm/min 降雨强度条件下最高,拔节期和成熟期在 2.0 mm/min 降雨强度条件下最高,抽雄期地表径流中铵态氮所占比例却在 1.5 mm/min 降雨强度条件下最高。

2.3.2 地表径流中氮组分流失浓度变化过程 由图 3 可知,玉米全生育期地表径流中硝态氮平均流失浓度总体表现为成熟期>拔节期>苗期>抽雄期,苗期和成熟期地表径流中硝态氮流失浓度在产流 15 min 和 45 min 左右达到峰值,拔节期和抽雄期则在 9,27 min 左右达到峰值。玉米苗期和拔节期,在降雨强度为 1.5 mm/min 时地表径流中硝态氮流失平均浓度最高,分别为 5.63,5.75 mg/L,抽雄期在降雨强度为 2.0 mm/min 时最高,为 4.17 mg/L,成熟期在降雨强度为 1.0 mm/min 时最高,为 6.39 mg/L。而玉米全生育期地表径流中铵态氮的流失浓度表现为拔节期>抽雄期>成熟期>苗期,随着降雨时间的延长呈现出波动性。玉米苗期和成

成熟期,在降雨强度为 1.0 mm/min 时地表径流中铵态氮平均流失浓度最高,分别为 0.08,0.11 mg/L;拔节期和

抽雄期则在 1.5 mm/min 时地表径流中铵态氮平均流失浓度最高,分别为 0.17,0.16 mg/L。

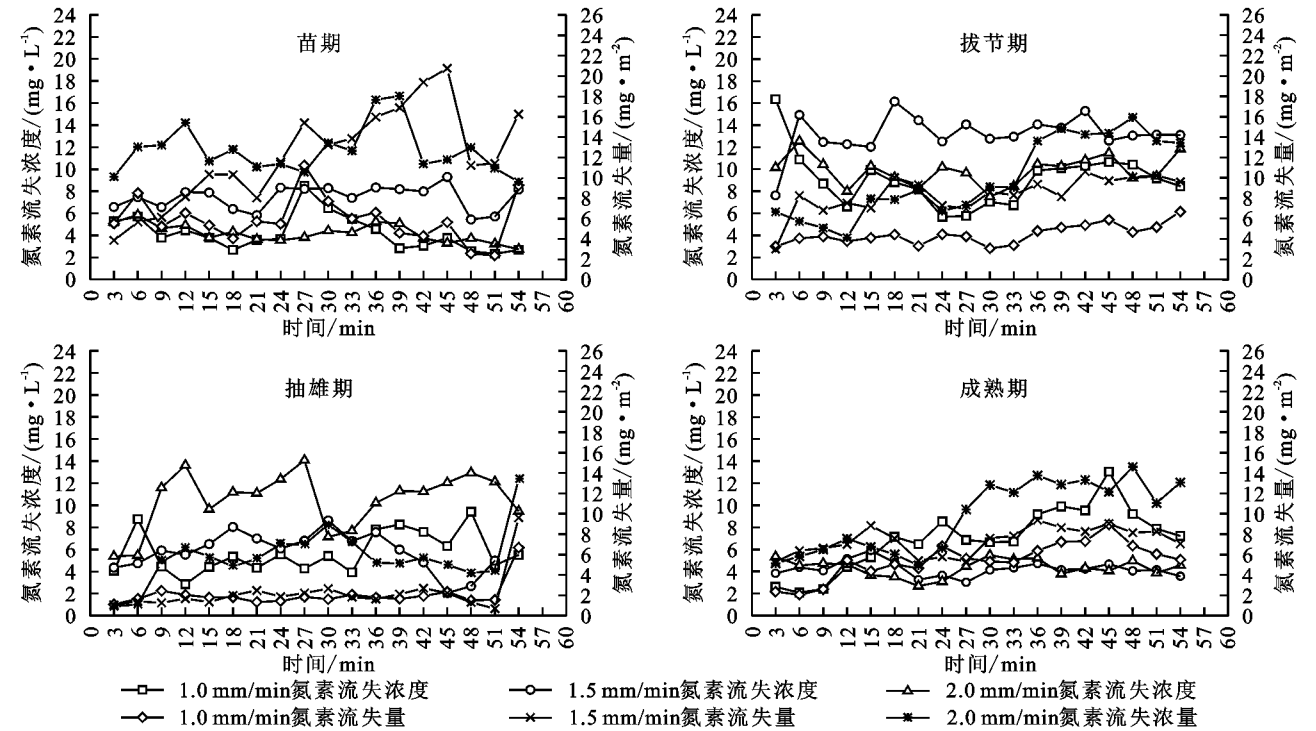


图 2 玉米季不同降雨强度条件下地表径流中氮素流失动态变化特征

表 1 玉米季地表径流中不同形态氮占全氮比例

生育期	硝态氮/%			铵态氮/%		
	1.0/ (mm·min ⁻¹)	1.5/ (mm·min ⁻¹)	2.0/ (mm·min ⁻¹)	1.0/ (mm·min ⁻¹)	1.5/ (mm·min ⁻¹)	2.0/ (mm·min ⁻¹)
苗期	85.57	77.98	78.16	1.74	0.81	1.65
拔节期	92.54	84.23	91.93	2.85	2.53	1.53
抽雄期	94.64	94.19	97.85	4.19	9.17	2.73
成熟期	90.63	94.61	84.95	1.65	1.56	2.57

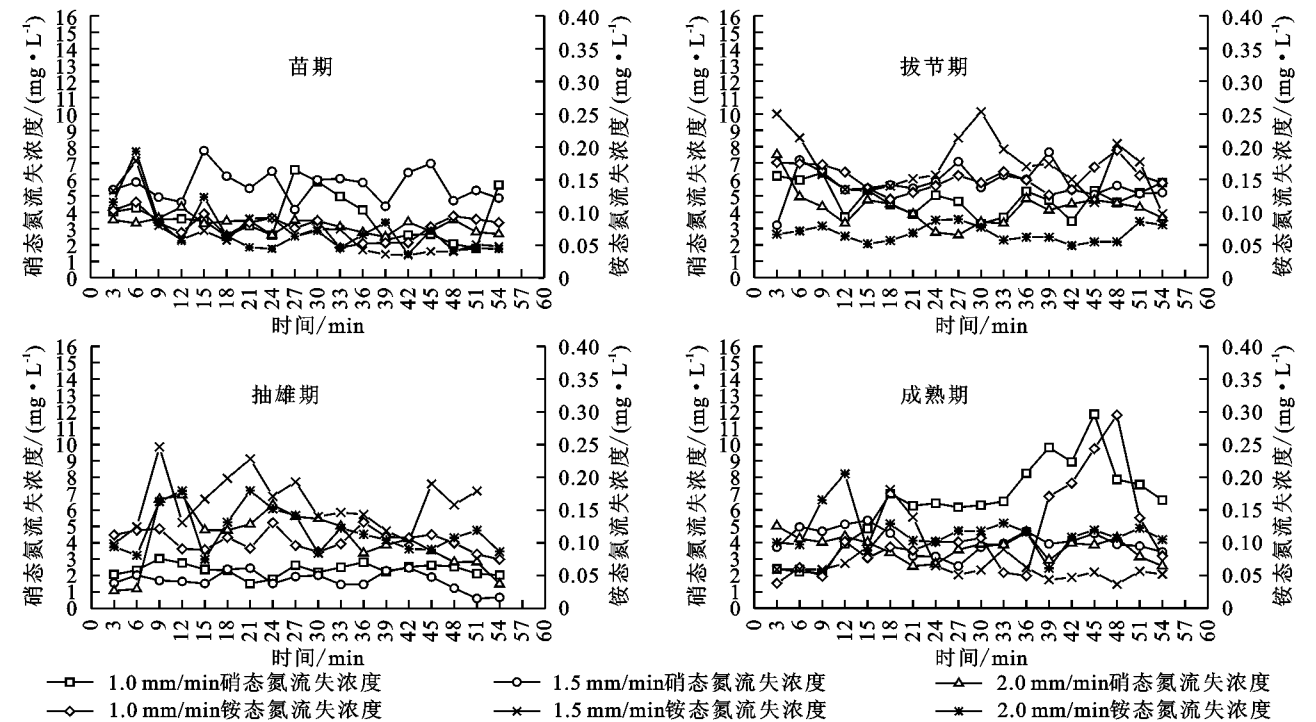


图 3 玉米季不同降雨强度条件下地表径流中氮组分流失浓度动态变化特征

2.3.3 氮组分流失量变化过程 由图4可知,玉米全生育期地表径流中硝态氮平均流失量表现为苗期>拔节期>成熟期>抽雄期,在玉米苗期、拔节期和成熟期地表径流中氮素流失量最大值均在产流12,48 min左右出现峰值,而成熟期则出现在12,30 min左右。地表径流中硝态氮流失量随降雨强度增加而增大,在降雨强度为2.0 mm/min时地表径流中硝态氮平均流失量为降雨强度1.0 mm/min条件下的1.95,2.22,2.90,1.68倍。

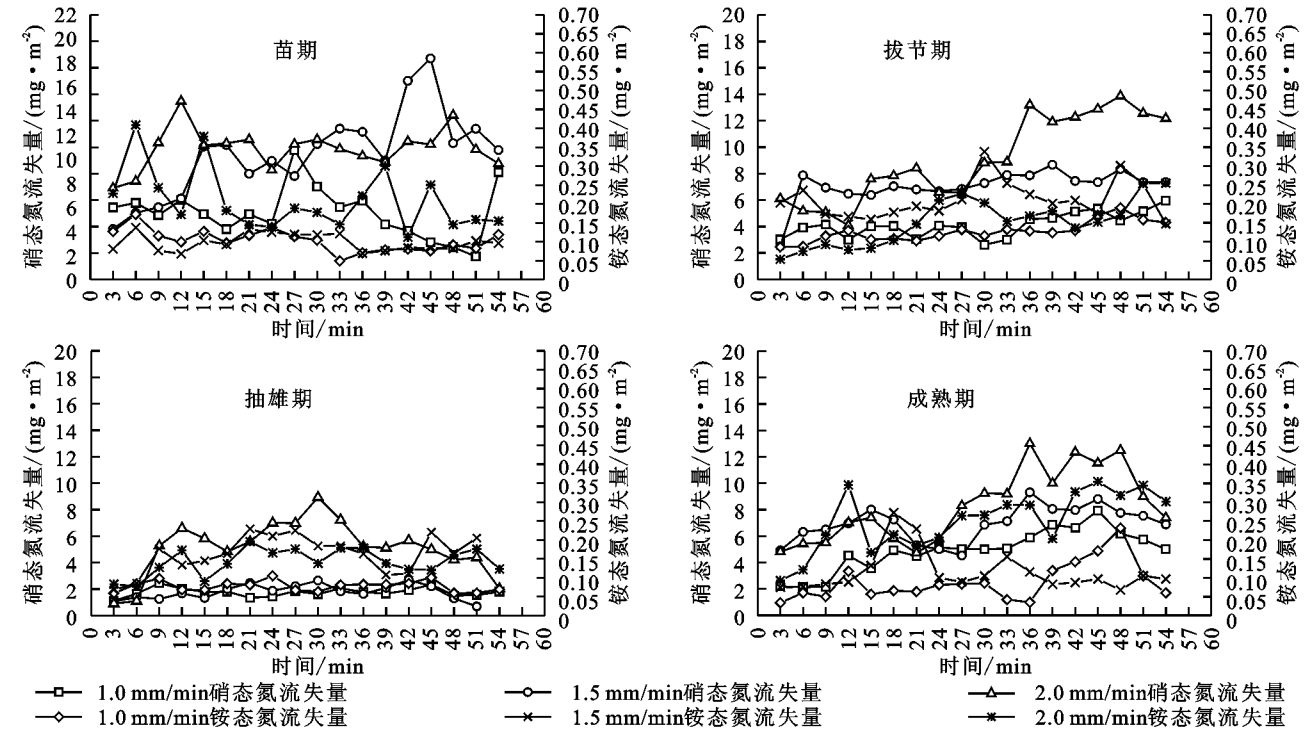


图4 玉米季不同降雨强度条件下地表径流中氮组分流失量动态变化特征

3 讨论

降雨是影响坡耕地土壤侵蚀重要因素之一。本研究结果表明,随着生育期的推进,苗期、拔节期、抽雄期、成熟期地表径流总量分别占降雨量的40.10%,29.15%,18.79%,31.94%,在玉米抽雄期最小,苗期达到最大,这主要由于玉米苗期植被覆盖度最小,抽雄期最大,植被覆盖度越大,截留雨水越多,从而延缓了地表径流的产生^[16]。玉米至成熟期时,叶片逐渐枯损,植株对地面保护的能力逐渐减小,地表径流量呈现出增加的趋势^[17]。随着降雨强度的增加,地表径流总量呈现增加的趋势,这可能与玉米冠层截留量、茎秆流量和冠层穿透雨量与降雨强度呈极显著线性正相关有关^[12]。

本研究发现玉米各生育期地表径流中氮素流失浓度随降雨时间的延长呈现波动性,与地表径流量的变化不同步,这可能是因为降雨产流初期氮素吸附在土壤颗粒表面,而较少的氮素随地表径流流失,使得氮素流失浓度较低。随着降雨持续进行,土壤颗粒结

构受到雨滴击打作用遭到破坏,释放部分氮素溶入径流中,使氮素浓度升高^[18],随后表层土壤易于流失的氮素逐渐减少,而不断累积的雨水对径流中的氮素稀释作用使得氮素的浓度不断降低^[19]。可见,地表径流量对氮素流失浓度影响较大,这与潘忠成等^[20]研究结果不尽一致,可能原因有2个方面:一是土壤质地不同,本试验土壤中黏粒含量较高(22%);二是植被覆盖度不同,本试验在玉米全生育期进行,而其则为裸地。本研究玉米拔节期地表径流中氮素流失浓度高于玉米苗期,这主要是因为研究区玉米拔节期习惯性追肥,并且拔节期的地表径流量显著低于玉米苗期,而抽雄期地表径流中氮素流失浓度却高于苗期,这可能与地表径流量差异显著有关。当水体中氮素浓度超过0.2~0.3 mg/L时,将会引起水体的富营养化^[21],玉米生育期地表径流中氮素流失平均浓度为7.13 mg/L,而在玉米拔节期地表径流中氮素流失最高浓度为16.36 mg/L,均远超过0.2 mg/L。可见,本研究条件下,玉米各生育期均存在水体富营养

化的风险,尤以玉米拔节期表现突出。因此,在农业生产实践中,应注意水体富营养化的防控,可通过优化施肥量和施肥时间,以减少地表径流中氮素流失。

氮素流失量可用于表征氮素输出负荷量,本研究表明氮素流失量随着降雨时间的延长呈现出先增加后降低、再增加最后呈现平稳的趋势,与吴希媛等^[22]研究结果有所差异,这可能由降雨条件不同所致。本研究表明玉米全生育期地表径流中氮素流失总量分别为施氮量的 3.81%,2.53%,1.07%,2.84%,玉米苗期地表径流中氮素流失量高于拔节期,这主要是苗期地表径流量显著高于拔节期所致。张威等^[23]研究发现地表径流量与土壤养分流失具有线性关系,Liu 等^[24]研究则进一步证明径流量与氮素流失之间呈极显著正相关关系。本研究结果表明,降雨量、地表径流量以及玉米的叶面积指数和氮素流失量显著相关。硝态氮是玉米全生育期氮素流失的主要形态,这与刘晓君等^[25]、梁新强等^[26]所得结果一致。地表径流中硝态氮流失量在玉米苗期产流初期达到最大,而拔节期、抽雄期和成熟期则在产流中后期达到最大,这可能与地表径流量有关,苗期植被覆盖度较低,地表径流量大且产流达到稳定所需时间短。地表径流中铵态氮流失量在玉米全生育期呈现出波动性,由于铵态氮主要吸附于土壤表层颗粒的表面,地表径流与土壤颗粒接触较长时间以后,从而使大量氮素溶于地表径流。可见,研究区控制氮素流失量的关键就是控制地表径流和增加植被覆盖度。

4 结论

(1)紫色土区玉米季各生育期地表径流量随降雨的延长呈现出先增加后平稳的趋势,地表径流总量表现为苗期>成熟期>拔节期>抽雄期。

(2)降雨条件下地表径流中氮素流失浓度总体表现为拔节期>抽雄期>苗期>成熟期,与地表径流量变化不具同步性。地表径流中硝态氮平均流失浓度总体表现为在成熟期最高,抽雄期最低;地表径流中铵态氮平均流失浓度则表现为拔节期最高,苗期最低。

(3)降雨条件下地表径流中氮素流失量总体表现为苗期>拔节期>成熟期>抽雄期,与降雨量、地表径流量与植株叶面积指数显著相关。地表径流中硝态氮和铵态氮平均流失量均表现为在苗期最高,抽雄期最低。

(4)玉米拔节期地表径流中氮素流失浓度最高,而苗期为氮素输出负荷量最大,玉米苗期和拔节期均存在水体富营养化潜在风险,因此,控制基肥、追肥的施入量、地表径流产生量和增加植被覆盖度可减少研究区氮素流失。

参考文献:

- [1] Lin C, Tu S, Huang J, et al. The effect of plant hedgerows on the spatial distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple-soil area of China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105(2): 307-312.
- [2] 罗付香, 刘海涛, 林超文, 等. 不同形态氮肥在坡耕地雨季土壤氮素流失动态特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (3): 12-20.
- [3] 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.
- [4] 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 & Water Conservation*, 2011, 66(3): 192-200.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 朱波, 彭奎, 谢红梅. 川中丘陵区典型小流域农田生态系统氮素收支探析[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 108-111.
- [8] 陈安磊, 王卫, 张文钊, 等. 土地利用方式对红壤坡地地表径流氮素流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 101-106.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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): 118-123.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境出版社, 2002: 254-285.