

# 生育期对红壤旱坡花生地氮素径流流失的影响

王凌云<sup>1,2</sup>, 聂小飞<sup>1,2</sup>, 左继超<sup>1,2</sup>, 刘昭<sup>1,2</sup>, 郑海金<sup>1,2</sup>

(1.江西省土壤侵蚀与防治重点实验室,南昌 330029;2.江西省水土保持科学研究院,南昌 330029)

**摘要:** 探明作物不同生育期的氮素流失特征,以期对红壤旱坡地氮素流失预测与有效防控提供理论依据。采用土壤水分渗漏试验装置,对自然降雨条件下赣北第四纪红壤旱坡花生地不同生育期的地表径流、渗漏水及其各形态氮素输出过程进行连续观测。结果表明:(1)红壤旱坡花生地产生流主要发生在降雨量最为集中的开花下针期。渗漏水是各生育期主要的径流形式,占总径流量的 64%。(2)各生育期,氮素流失的主要途径为渗漏水,主要形式为可溶性氮,占总氮(TN)流失量的 54%~99%。除饱果成熟期外,各生育期渗漏水中氮素流失的主要成分为硝态氮,占 TN 的 38%~50%。(3)地表径流和渗漏水氮素浓度总体表现为幼苗期和开花下针期较大,饱果成熟期最小,而氮素流失量则表现为开花下针期最大。因此,幼苗期和降雨量最为集中的开花下针期为防治红壤旱坡花生地氮素流失的关键时期,控制硝态氮等氮素淋溶损失是减少红壤旱坡花生地氮素流失的关键途径。

**关键词:** 氮素流失; 地表径流; 渗漏水; 花生生育期; 红壤坡耕地

中图分类号:S157.1; S565.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0034-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.005

## Effects of Growth Periods on Nitrogen Loss in Runoff of Peanut Land on Dry Slope of Red Soil

WANG Lingyun<sup>1,2</sup>, NIE Xiaofei<sup>1,2</sup>, ZUO Jichao<sup>1,2</sup>, LIU Zhao<sup>1,2</sup>, ZHENG Haijin<sup>1,2</sup>

(1.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029;

2.Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029)

**Abstract:** This study aimed to explore the characteristics of nitrogen loss in different growth periods of crops, which could provide theoretical basis for the prediction and effective control of nitrogen loss in dry sloping land of red soil. Under natural rainfall conditions, lysimeters were continuously used to collect the data about surface runoff, seepage water and nitrogen output process on dry slope of Quaternary red soil in northern Jiangxi. The results showed as follows: (1) Runoff generation of peanut land on dry slope of red soil mainly occurred at the flowering period with the most abundant rainfall. Leakage water was the main form of runoff in peanut growing period, accounting for 64% of the total runoff. (2) Leakage water was the main path of nitrogen loss in all growth periods, primarily in the form of soluble nitrogen, occupying 54% to 99% of total nitrogen (TN) loss. Nitrate nitrogen (38%~50% of TN) was the main component of nitrogen loss in seepage water during all periods except the ripening period of full fruit. (3) Nitrogen concentrations in surface runoff and seepage water in the seedling period and flowering period were larger than those in other growth periods, while the nitrogen loss in them was the largest in flowering period. Therefore, the key periods for controlling nitrogen loss in peanut land on dry slope of red soil were the seedling stage with the lowest vegetation coverage and the flowering stage with the most concentrated rainfall. Besides, the crucial way to reduce nitrogen loss in the land was controlling nitrogen leaching loss such as nitrate nitrogen.

**Keywords:** nitrogen loss; surface runoff; leakage water; peanut growth periods; red soil slope farmland

我国南方红壤丘陵区遍及 15 省(市、区),面积约 124 万 km<sup>2</sup>,占全国土地总面积的 12.9%左右<sup>[1]</sup>,是我国重要的土地资源。由于该区域降水丰沛,降雨

侵蚀力高,土壤抗侵蚀能力弱,极易发生水土流失<sup>[2]</sup>。径流是坡地土壤养分迁移的重要载体,在降雨和径流冲刷作用下,坡地土壤养分主要通过壤中流和地表径

收稿日期:2019-05-06

资助项目:国家自然科学基金项目(41761060,41601297);江西省自然科学基金项目(20171ACB21072);江西省杰出人才计划项目(20171BCB23080);江西省水利厅科技项目(201821ZDKT20)

第一作者:王凌云(1987—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与坡地养分研究。E-mail:lywang0812@163.com

通信作者:郑海金(1978—),女,教授级高工,博士研究生,主要从事水土保持与坡地养分循环研究。E-mail:hajinzheng@163.com

流等途径汇入水体<sup>[3]</sup>,从而引起土壤养分流失和水体污染<sup>[4]</sup>,加剧区域水体富营养化<sup>[5]</sup>。因此,深入探究红壤坡地氮素随径流流失特征,对土壤养分流失的预测和农业面源污染的防控具有重要意义。近年来,关于红壤坡地径流和泥沙对土壤养分流失影响的研究日趋成熟,主要集中在地表径流作用下的侵蚀产沙以及养分随地表径流和泥沙流失等方面<sup>[6-9]</sup>,往往忽视了氮素的深层耗损,这对认识坡地农田系统氮素损失的规律不够全面<sup>[10]</sup>。国内已有学者<sup>[11-12]</sup>对红壤坡地壤中流及其养分运移特征进行了初步研究,主要采用模拟降雨或单场天然降雨试验,围绕不同坡度<sup>[12]</sup>、不同雨强<sup>[13]</sup>、不同下垫面<sup>[14]</sup>等因素开展研究,但对自然降雨条件下不同作物生育期土壤养分随地表径流和壤中流的迁移输出同步观测研究较少。

花生是我国红壤旱坡地春夏季的主栽作物,种植期(4—8月)恰逢雨季,频繁耕作叠加本区充沛的降水,共同导致氮素不仅易淋洗损失,还易随地表径流而损失,但当前对红壤旱坡地花生种植体系中土壤氮素损失的主要途径和时期不甚清楚。鉴于此,本研究以红壤旱坡花生地为研究对象,探讨自然降雨条件下花生不同生育期氮素随地表径流和渗漏水流的流失特征,揭示红壤旱坡地不同形态氮素流失在不同生育期和不同途径间的差异,为红壤坡地寻求防治氮素流失关键时期和重点途径提供理论基础,以期服务于红壤区生态农业可持续发展。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验设在江西省德安县城郊的江西水土保持生态科技园(29°17'N,115°43'E)开展。该园地处亚热带季风气候区,雨量充沛,四季分明。多年平均气温16.7℃,多年平均降水量1449mm,多年平均蒸发量1558mm,多年平均无霜期249d,年日照时间1650~2100h;地貌为浅丘岗地,海拔30~100m,坡度5°~25°。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,地带性土壤为第四纪红黏土发育的红壤。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验装置 本试验在可收集地表径流和渗漏水(含侧渗水和下渗水)的钢制渗漏土槽(Lysimeter)中开展。试验装置设计示意图见图1。综合考虑江西省红壤旱坡地坡度分布状况及试验代表性,土槽坡度设定为8°,土槽规格为3m(长)×0.75m(宽)×0.6m(高)。土槽填土时,为防止土壤颗粒漏失、堵塞小孔,先于土槽底部和侧渗水出流口铺1层土工布,再铺1层10cm细沙以保证试验过程中水分自由下渗;之后分4次、每次10cm填装过10mm筛后充分混匀的供试土壤,填土容重根据田间实测值控制在

(1.32±0.10)g/cm<sup>3</sup>。供试土壤为园区内第四纪红黏土发育的表层红壤,土壤有机质含量7.64g/kg,全氮含量0.52g/kg,碱解氮含量33.32mg/kg,铵态氮含量1.40mg/kg,硝态氮含量4.79mg/kg,全磷含量0.18g/kg,速效磷含量0.34mg/kg;黏粒、粉粒和砂粒含量分别为28.39%,50.32%和21.29%,质地为黏壤土(美国制)。将填土后的土槽东西向至于野外,待沉降稳定后开展试验。

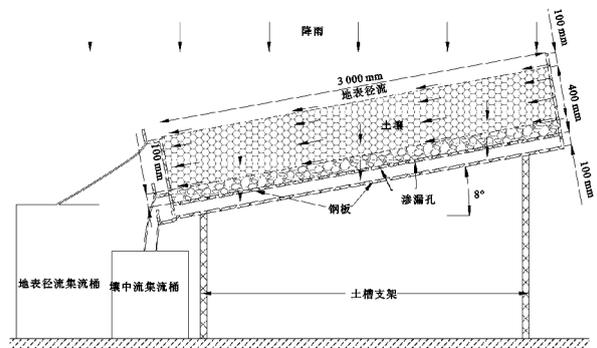


图1 试验装置剖面示意

1.2.2 试验设计 供试花生品种为“纯杂1016”。花生播种方式为浅沟穴播,穴深约5cm,每穴播入3粒花生籽,齐苗后定株2株。根据当地农户习惯,耕作方式采用常规翻耕处理,所有试验重复3次。施肥处理按照当地常规施肥水平(N 172kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 117kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O 100kg/hm<sup>2</sup>)施用尿素(N,46.4%)、钙镁磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,14%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O,60%)。其中,钙镁磷肥和氯化钾全部用作基肥,尿素按照3:2的比例分基肥、追肥2次施用。基肥在花生开穴播种前均匀撒施在土壤表面,追肥于7月7日小雨后撒施尿素。其他管理措施同当地耕作管理习惯。

1.2.3 观测指标与方法 花生于2017年5月17日播种,8月19日收获。试验期间开展逐场次自然降雨条件下的试验观测。其中,地表径流和渗漏水(含侧渗水和下渗水)根据径流桶水位采用预先率定好的水位—体积关系计算获取,降雨数据基于试验区虹吸式自记雨量计获取。每次产流结束后,待径流桶中水样静置4h后采集500mL上清液装瓶用于检测分析。每瓶水样现场添加1~2滴浓硫酸固定,并迅速带回实验室于4℃冰箱保存。样品检测分析在48h内完成,原样分成2份,一份直接检测总氮(TN),另一份过0.45μm滤膜,滤液用于检测溶解态氮(DTN)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)。TN/DTN采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用水杨酸钠分光光度法测定;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N采用硫酸肼还原法测定。

### 1.2.4 数据处理

(1)每场降雨产流事件地表径流和渗漏水计算公式为:

$$V_i = S \times H_i \times 10^{-6}$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  场降雨地表径流或渗透水的量 ( $m^3$ );  $S$  为径流桶的底面积 ( $cm^2$ );  $H_i$  为第  $i$  场降雨事件后径流桶的平均水位 ( $cm$ )。

(2) 每场降雨产流事件径流中各形态氮素流失量计算公式为:

$$Q_{kj} = \sum_{i=1}^N 10 \frac{C_{ijk} \times V_{ik}}{A}$$

式中:  $i=1, 2, \dots, N$  为第  $i$  场降雨产流事件;  $N$  为降雨产流事件场次;  $Q_{kj}$  为第  $k$  类径流第  $j$  种形态氮的流失量 ( $kg/hm^2$ );  $C_{ijk}$  为第  $i$  次降雨产流事件、第  $k$  类径流、第  $j$  种形态氮输出的质量浓度 ( $mg/L$ );  $V_{ik}$

为第  $i$  次降雨、第  $k$  类径流所对应的径流量 ( $m^3$ );  $A$  为试验小区的面积, 本文为  $2.25 m^2$ 。

采用 SPSS 20.0 软件开展单因素方差分析, Excel 2010 软件处理数据及绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨产流特征

试验期总降雨量为 976.2 mm, 占全年降雨量 (1 839.6 mm) 的 53.0%; 其中产流降雨 11 场次, 累计降雨量 900.9 mm, 占同期降雨量的 92% (表 1)。各生育期的渗透水量均大于地表径流量, 平均占总径流量的 64% (图 2)。可见, 红壤旱坡花生地渗透水是各生育期降雨径流的主要形式。

表 1 各生育期降雨特征

生育期	降雨量/mm	产流降雨			
		总降雨量/mm	平均雨强/( $mm \cdot h^{-1}$ )	总降雨历时/min	场次数
幼苗期	126.5	78.8	1.73	2510	2
开花下针期	443.4	433.6	1.94	12010	4
结荚期	185.4	178.3	3.46	3345	2
饱果成熟期	220.9	210.2	5.72	4040	3
合计	976.2	900.9	3.21	21905	11

注: 根据花生栽培观察记载技术规范<sup>[15]</sup>, 将花生不同生育期划分为幼苗期(5月17日至6月10日)、开花下针期(6月11日至7月3日)、结荚期(7月4日至8月2日)、饱果成熟期(8月3日至8月19日)。

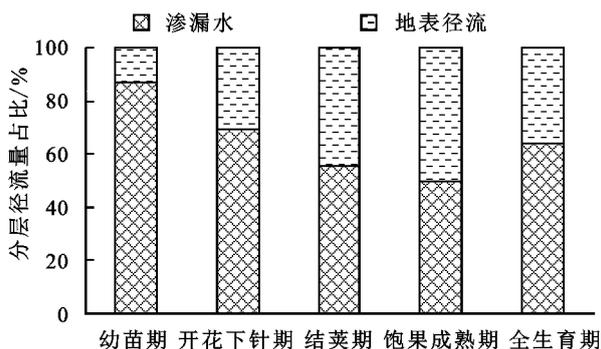


图 2 各生育期地表径流和渗透水占总径流量的百分比

由不同生育期产流观测结果(图 3)可知, 红壤旱坡花生地产流时期主要为开花下针期, 该时期渗透水量和地表径流量分别达 257, 113 mm, 分别占全生育期的 55% 和 43%。地表径流和渗透水量均表现为开花下针期 > 饱果成熟期 > 结荚期 > 幼苗期。幼苗期 2 次降雨事件中产流较少, 这可能与该时期土体较为松散、降雨量小、降雨大部分入渗有关。经过幼苗期的 2 次降雨, 前期翻动的土壤得以压实, 土壤透水性有所降低, 且开花下针期降雨较为集中, 雨量大(占生育期产流降雨的 45%)、场次多(4 次产流降雨), 导致开花下针期产流量增加。

### 2.2 地表径流中氮素流失特征

由图 4 可知, 地表径流中 TN 和 DTN 浓度均表现为结荚期 > 开花下针期 > 幼苗期 > 饱果成熟期。除饱果成熟期显著低于前 3 个生育期外, 其余生育期间差异

不显著 ( $P > 0.05$ )。  $NH_4^+ - N$  和  $NO_3^- - N$  浓度均表现为幼苗期最高, 分别达 2.88, 1.72 mg/L, 但各生育期间浓度差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。各生育期  $NH_4^+ - N$  浓度均大于  $NO_3^- - N$  浓度, 前者为后者的 1.3~2.2 倍。

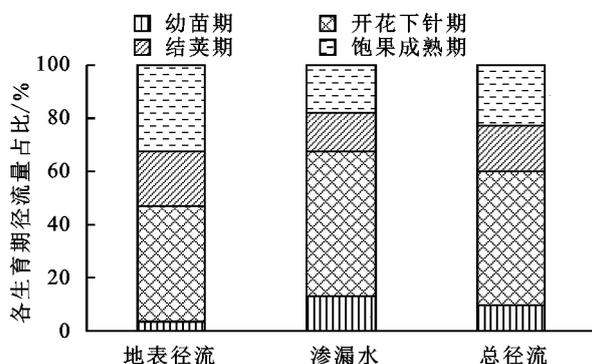


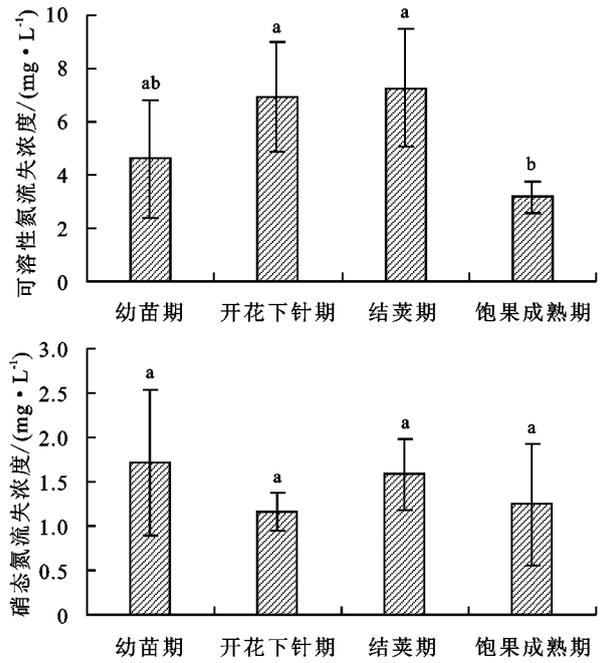
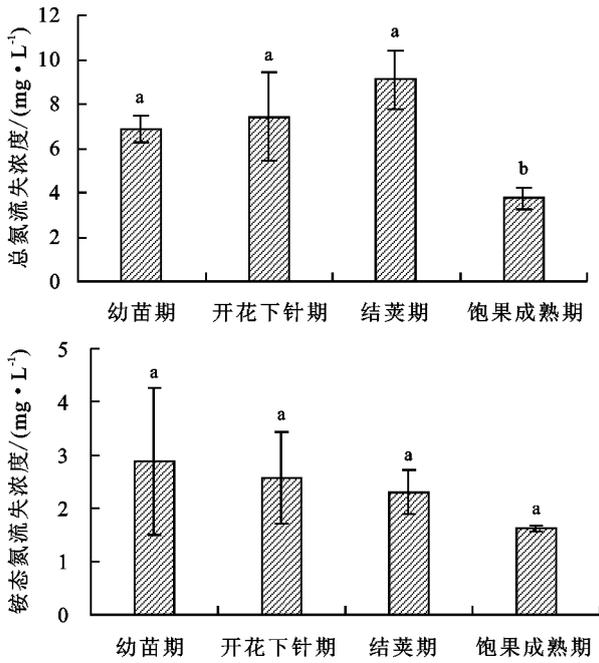
图 3 各生育期产流量占全生育期百分比

地表径流中氮素流失量变化规律与其浓度变化规律有所不同。从图 5 可以看出, 试验观测期, 各形态氮素流失量均表现为开花下针期最大, 其次是结荚期和饱果成熟期, 幼苗期最小; 可见, 开花下针期为地表径流氮素流失的高峰时段, 该时期各形态氮素流失量占全生育期地表径流累计氮素流失量的 49%~56%, 这与地表产流规律基本一致。

本试验中, 地表径流中 TN 累计流失量为 20.07  $kg/hm^2$ , 而 DTN 累计流失量达 17.39  $kg/hm^2$ , 平均占 TN 流失量的 87%, 这表明地表径流中的氮素流失以溶解态为主, 悬浮颗粒态较少; 监测期内地表径

流中溶解态氮以无机氮为主,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  是溶解态无

机氮的主要形态, 平均占 TN 输出量的 30%。



注: 图中不同小写字母表示同一处理下不同生育期间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

图 4 各生育期地表径流中氮素流失浓度

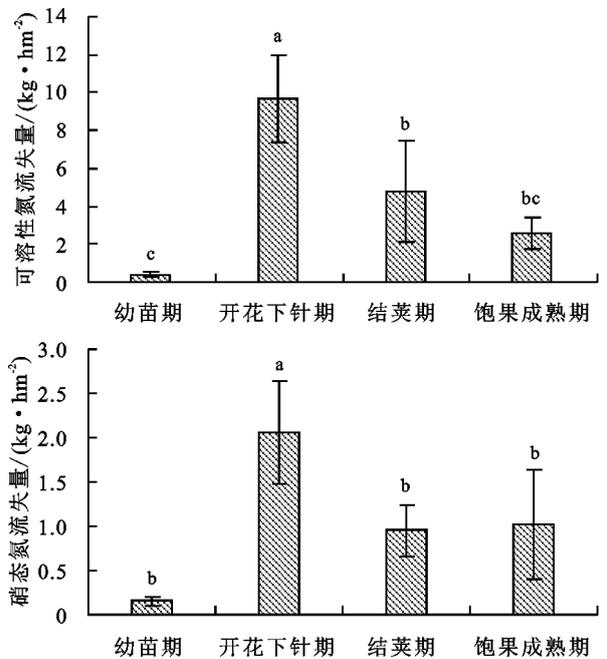
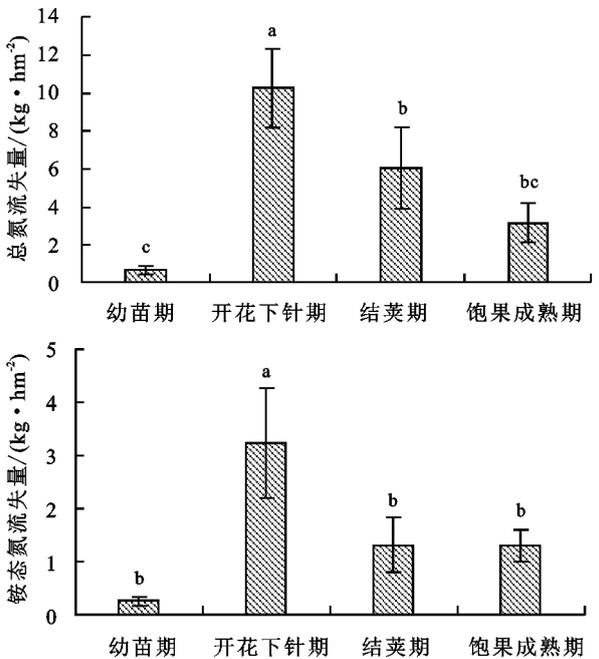


图 5 各生育期地表径流中氮素流失量

### 2.3 渗漏水中氮素流失特征

从图 6 可以看出, 渗漏水中 TN 和 DTN 流失浓度均表现为开花下针期和幼苗期较大, 分别达 11.03~13.76, 10.81~12.57 mg/L, 显著大于饱果成熟期和结荚期;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  流失浓度在开花下针期达最大, 显著高于其他时期; 而  $\text{NO}_3^--\text{N}$  流失浓度则表现为开花下针期 > 幼苗期 > 结荚期 > 饱果成熟期, 除饱果成熟期显著低于开花下针期外, 其他生育期间差异不显著。

均显著大于其他时期, 该时期各形态氮素输出量占全生育期渗漏水累计氮素流失量的 67%~72%, 这与渗漏产流规律基本一致。

从图 7 可知, 渗漏水中 TN 累计流失量为 54.86 kg/hm<sup>2</sup>, 其中 DTN 累计流失量为 49.69 kg/hm<sup>2</sup>, 占渗漏水 TN 的 91%, 表明渗漏水中氮素流失以溶解态为主, 颗粒态较少; 监测期内,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  是渗漏水氮素流失的主要形态, 平均占 TN 流失量的 50%,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  占比极少, 平均仅占 4%, 这与地表径流中氮素流失形态有所不同。

从图 7 可以看出, 开花下针期各形态氮素流失量

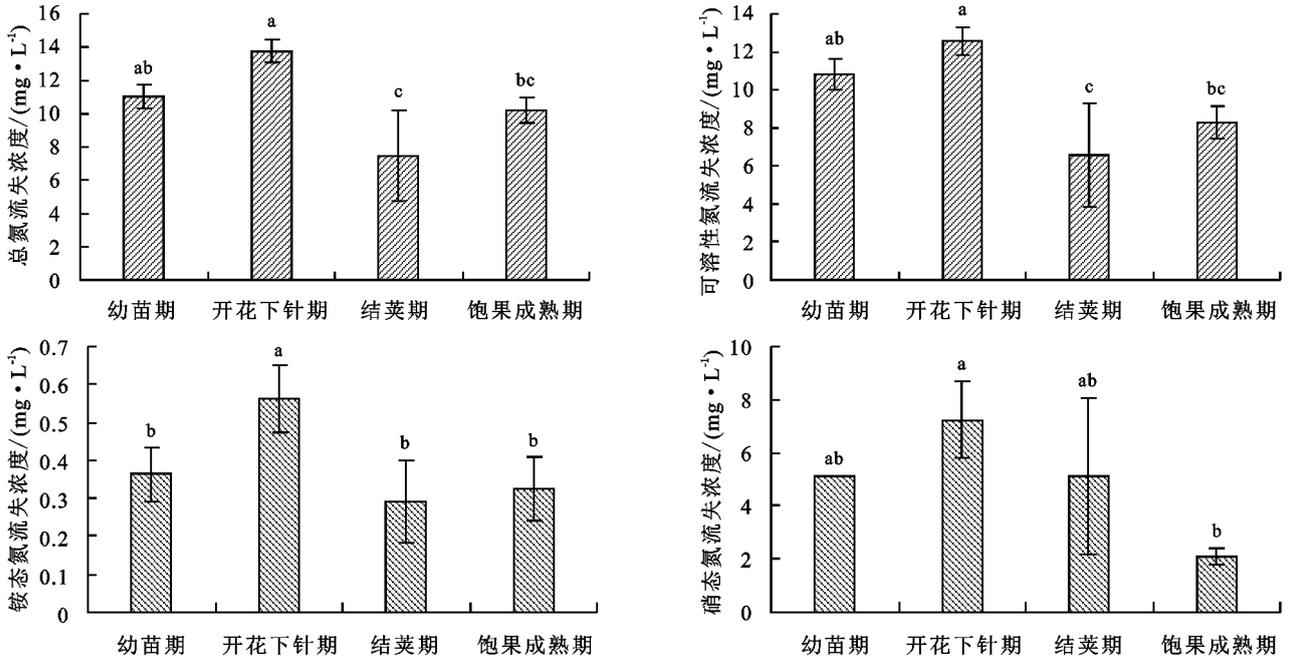


图 6 各生育期渗漏水中氮素流失浓度

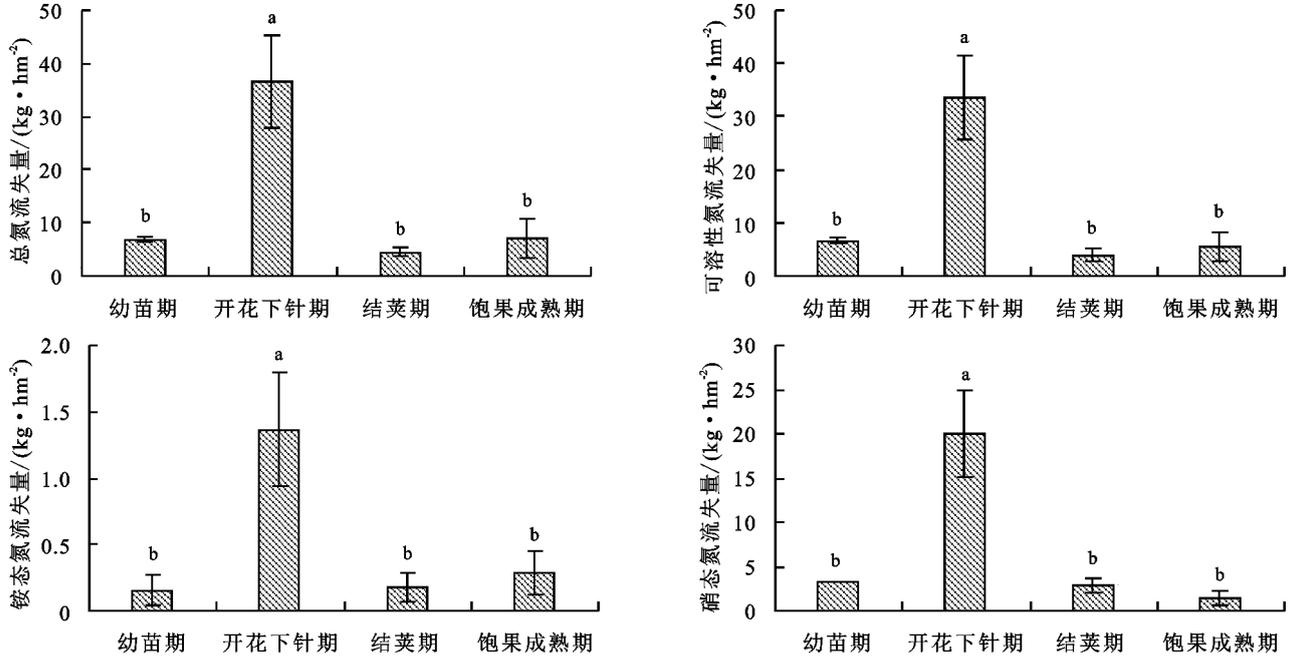


图 7 各生育期渗漏水中氮素流失量

## 2.4 氮素流失途径分析

由图 4 和图 6 可知,除  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  外,其他形态氮素均表现为渗漏水浓度高于地表径流,除结荚期外,渗漏水中 TN、DTN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度分别为地表径流对应氮素浓度的 1.61~2.72, 1.81~2.62, 1.70~6.25 倍,而结荚期渗漏水中 TN、DTN 浓度则略低于地表径流。各生育期,地表径流  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度均大于渗漏水,是渗漏水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  流失浓度的 4.57~7.94 倍。

试验期各径流组分氮素流失量占总流失量比例的结果见图 8。不同时期不同形态氮素流失途径有所差别。除结荚期外,各时期 TN 和 DTN 均以渗流失为主,分别占总流失量的 69%~91%, 68%~94%, 结荚期

TN 和 DTN 随地表径流流失量略大于随渗漏水流失量,分别占总流失量的 57%, 55%, 这可能与花生结荚期追肥和强降雨有关。各时期  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  流失均以地表径流为主,占总流失量的 62%~88%, 平均占 75%; 而  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  流失途径则主要为渗漏水,其流失量占总流失量的 58%~96%, 平均占 87%。

## 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<sup>[16-17]</sup>。已有研究<sup>[18]</sup>表明,径流为氮素流失的主要途径。本研究结果表明,花生各生育期红壤坡地降雨径流的主要输出形式是渗漏水。这与红壤旱坡地自身性质、当地气候条件以及耕作活动

等有关。红壤耕作层的土壤有效孔隙度较大、透水性较好,加上作物覆盖对雨水具有消能截留作用,并能增加土壤表层粗糙度和土壤透水性,降低地表径流流速,减

少地表径流输出,加大水分入渗;此外,作物生长根系错综发达,土壤孔隙度增加,有利于雨水向垂直方向渗漏,也增加了渗漏水输出量<sup>[19]</sup>。

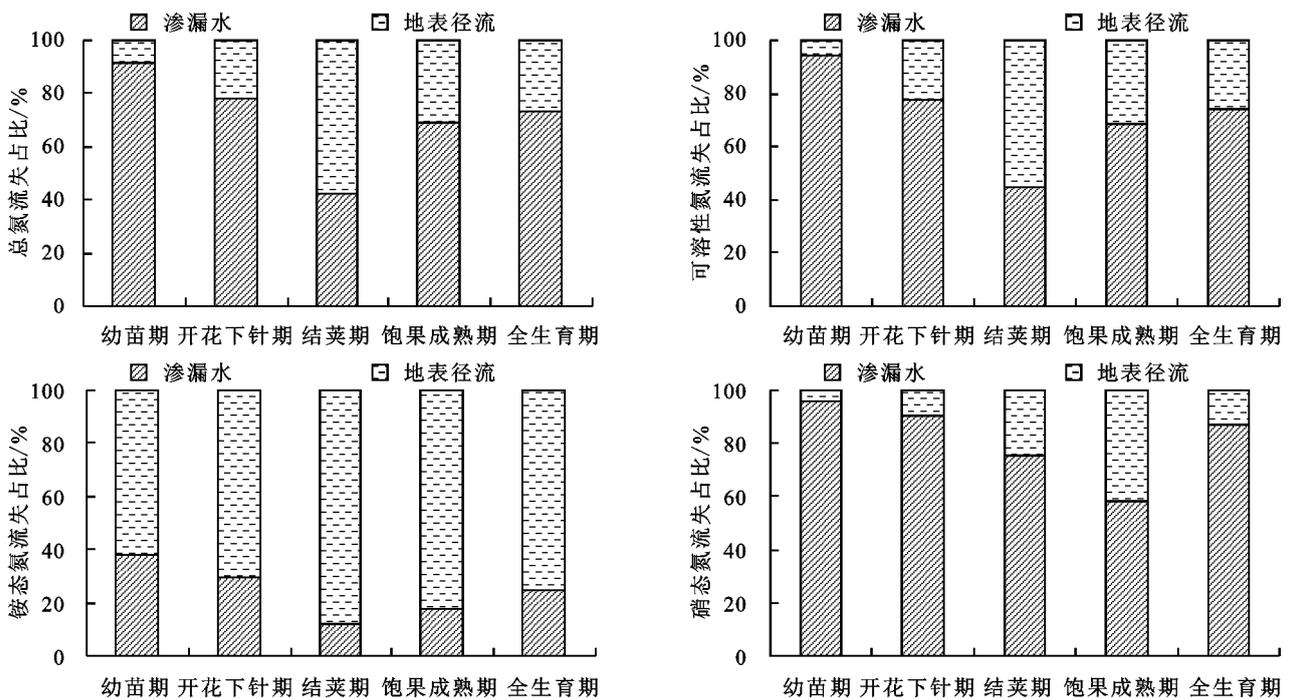


图8 氮素随不同径流组分流失比率

以往研究<sup>[20-24]</sup>表明,随地表径流和渗漏水流失的氮素主要与作物、土壤、施氮量、降雨及灌溉有关。本研究进一步明确了作物生育期对氮素流失规律的影响,研究结果表明,花生各生育期氮素流失浓度总体表现为幼苗期和开花下针期较大,饱果成熟期最小。究其原因,可能与花生生育前中期土壤表层氮素含量较高、可流失氮量相对较多,降雨—产流量相对较大,且花生植株地上部氮素吸收主要集中在中后期(开花下针期至结荚期)<sup>[25]</sup>有关;此外,随着生育期的推进,土壤易于流失的氮素逐渐减少,而且降雨或灌溉的作用导致土壤紧实度增加,水分入渗量下降,故花生生育后期表层释放到径流中的氮素较少,浓度降低。有关研究<sup>[26]</sup>表明,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,而本文分析得出,花生生育期地表径流和渗漏水中氮素流失平均浓度为6.79,10.62 mg/L,而在幼苗期和开花下针期渗漏水中氮素流失平均浓度高达11.03~13.76 mg/L,均远超0.3 mg/L。可见,在本研究条件下,花生各生育期产生的径流进入河湖水体后均存在诱发富营养化的风险,尤以幼苗期和开花下针期表现突出。本研究结果显示,地表径流和渗漏水氮素流失量均表现为在开花下针期达到最大,这主要是开花下针期径流量显著高于其他生育期所致。

本研究发现,除结荚期外,花生季红壤早坡地氮素主要随渗漏水流失,占总流失量的69%~91%,这

与前人<sup>[11,14,27]</sup>的研究结论相似,即在少量或无侵蚀发生的土地利用类型下,氮素流失的载体主要是径流,尤其是壤中流;这可能与红壤的化学性质有关,红壤中的胶体主要为高岭石和铁铝氧化物胶体,其所带的负电荷较少,阳离子交换量低,不利于吸持土壤和肥料中的铵离子和硝酸根离子,造成铵态氮和硝态氮极易随径流流失<sup>[28]</sup>。加之红壤淋溶强烈,壤中流发育,氮素更多地随壤中流流失。结荚期地表径流氮素流失量略大于渗漏水,这可能与结荚期追肥和强降雨有关,尿素为酰胺态氮肥,需要在脲酶作用下水解为铵态氮,再在微生物作用下经硝化作用转化为硝态氮<sup>[29]</sup>,结荚期追施的尿素还没来得及水解转化为硝态氮,就被冲刷流失,导致较少的氮素淋溶下移。除铵态氮外,渗漏水中各形态氮素浓度总体均高于地表径流,这主要与硝态氮等氮素易于淋溶向下迁移有关;此外,壤中流相对于地表径流与土壤相互作用时间长,土壤中氮素溶解更为充分,导致单位水分溶解的氮素更多。铵态氮由于带正电荷,容易被带负电荷的土壤胶体所吸附,较少沿土壤剖面垂直向下移动或从土壤中渗漏淋失。

关于氮素流失形态,氮素随径流迁移输出形态既有以溶解态无机氮为主的,也有以溶解态有机氮为主的,在不同的土地利用方式、气象条件、氮肥品种、施氮量等条件下,坡地氮素随径流迁移输出的主要形式各不相同<sup>[30-32]</sup>。本研究条件下地表径流中氮素流失

以溶解态无机氮为主,而溶解态无机氮中又以铵态氮为主(占 TN 的 27%~31%),而渗漏水则以硝态氮为主(占 TN 的 38%~50%),这与王双等<sup>[33]</sup>结论有所不同,主要原因可能有 2 个方面:一是施肥品种不同,肥料转化后氮素形态及转化效率不同;二是土壤质地不同,本试验土壤为黏壤土,而王双等<sup>[33]</sup>研究的为质地较黏的黄壤(黏粒含量为 41.2%),土壤质地差异导致对不同形态氮素吸附能力有所不同。

## 4 结论

(1)红壤早坡花生地产生流主要发生在降雨量最为集中的开花下针期。在花生各生育期,渗漏水均是主要的径流形式,平均占总径流量的 64%。

(2)红壤早坡花生地各生育期内地表径流和渗漏水中 TN 浓度分别高达 6.79, 10.62 mg/L,其进入河湖水体后均存在诱发富营养化的风险。整个花生生育期,地表径流和渗漏水氮素浓度均表现为幼苗期和开花下针期较大,而氮素流失量则表现为开花下针期最大,因此,幼苗期和降雨量最为集中的开花下针期是防治红壤早坡花生地氮素流失的关键时期。

(3)在花生各生育期,渗漏水是红壤早坡地氮素的主要流失途径,硝态氮为渗漏水中氮素流失的主要成分(占 TN 的 38%~50%),而铵态氮仅为地表径流中溶解态无机氮的主要成分(占 TN 的 27%~31%)。因此,控制硝态氮等氮素淋溶损失是减少红壤早坡花生地氮素流失的关键途径。

### 参考文献:

- [1] 水利部办公厅.关于印发《全国水土保持区划(试行)》的通知(办水保[2012]512号)[Z].北京:水利部办公厅,2012.
- [2] 梁音,杨轩,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策[J].中国水土保持,2008(12):50-53.
- [3] Wang T, Zhu B, Kuang F H. Reducing interflow nitrogen loss from hillslope cropland in a purple soil hilly region in southwestern China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 93(3): 285-295.
- [4] Ftd V, van Groenigen J W, Hoffland E, et al. Nitrogen losses from two grassland soils with different fungal biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(5): 997-1005.
- [5] 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.
- [6] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
- [7] 奚同行,左长清,王伟,等.天然降雨下红壤坡地氮磷流失过程与特征分析[J].水土保持通报,2012,32(5):136-140.
- [8] 张宇,荣湘民,王心星,等.覆盖与生态拦截对旱地土壤地表径流和氮素流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):15-19.
- [9] 刘俏,张丽萍,胡响明,等.红壤丘陵区经济林坡地氮磷流失特征[J].水土保持学报,2014,28(3):185-190.
- [10] 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(10): 2241-2249.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 卜洪龙,任秀文,陆俊卿,等.人工降雨条件下华南红壤氮素流失规律研究[J].环境科学与技术,2016,39(8): 27-34.
- [14] 郑海金,左继超,奚同行,等.红壤坡地氮的径流输出通量及形态组成[J].土壤学报,2018,55(5):1168-1178.
- [15] 中华人民共和国农业部.NY/T 2408—2013 花生栽培观察记载技术规范[S].北京:中华人民共和国农业部,2013.
- [16] Yakutina O P, Nechaeva T V, Smirnova N V. Consequences of snowmelt erosion: Soil fertility, productivity and quality of wheat on Greyzem Phaeozem in the south of West Siberia[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2015, 200(2): 88-93.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [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] 谭德水,江丽华,张骞,等.不同施肥模式调控沿湖农田无机氮流失的原位研究:以南四湖过水区粮田为例[J].生态学报,2011,31(12):3488-3496.
- [21] 张玉铭,张佳宝,胡春胜,等.华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J].土壤学报,2006,43(1):17-25.
- [22] Zhang J S, Zhang F P, Yang J H, et al. Emissions of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>, and nitrogen leaching from direct seeded rice under different tillage practices in central China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 140(1/2): 164-173.
- [23] 孙波,王兴祥,张桃林.红壤养分淋失的影响因子[J].农业环境科学学报,2003,22(3):257-262.

- [16] 张光辉,刘宝元,李平康.槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J].水土保持通报,2007,27(6):56-60.
- [17] 刘琳,刘前进,于兴修.横坡垄作细沟形态特征及其影响因素[J].绿色科技,2015(4):167-171.
- [18] 李振伟,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J].环境科学,2012,33(4):1152-1158.
- [19] Barbosa F T, Bertol I, Luciano R V, et al. Phosphorus losses in water and sediments in runoff of the water erosion in oat and vetch crops seed in contour and downhill[J].Soil and Tillage Research,2009,106(1):22-28.
- [20] 温小乐,夏立江,徐亚萍,等.生活垃圾渗滤液对堆填区周边土壤铵态氮吸附能力的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(3):503-507.
- [21] 梁改革,安娟,屈传新.壤中流条件下垄向坡度对氮和磷流失的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):118-124.
- [22] 蒋锐,朱波,唐家良,等.紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J].水利学报,2009,40(6):659-666.
- [23] 何晓玲,郑子成,李廷轩.不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J].中国农业科学,2013,46(12):2492-2500.
- [24] Pizzolon L, Tracanna B, Porsperi C, et al. Cyanobacterial blooms in Argentinean island waters[J].Lakes and Reservoirs: Research and Management,1999,4(3/4):101-105.
- [25] Tejada M, Benitez C, Gonzalez J L. Effects of application of two organomineral fertilizers on nutrient leaching losses and wheat crop [J]. Agronomy Journal, 2005,97(3):960-967.
- [26] Tejada M, Gonzalez J L. Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality [J]. Geoderma, 2008,145(3/4):325-334.
- [27] 陶春.耕作措施对三峡库区旱坡地氮、磷流失的影响研究[D].重庆:西南大学,2010.
- [28] 史彦林,陈永生,刘建新,等.东北黑耕土区不同作措施保水保土效应研究[J].中国水土保持,2019(1):47-49.
- (上接第 40 页)
- [24] Oenema O, Kros H, de Vries W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J].European Journal of Agronomy,2003,20(12):3-16.
- [25] 张翔,毛家伟,司贤宗,等.施氮时期对夏花生产量及氮素吸收利用的影响[J].中国油料作物学报,2015,37(6):897-901.
- [26] 石辉,刘世荣.森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J].山地学报,2005,23(5):533-539.
- [27] 王洪杰,李宪文,史学正,等.四川紫色土区小流域土壤养分流失初步研究[J].土壤通报,2002,33(6):441-444.
- [28] 袁东海,王兆骞,陈欣,等.不同农作方式红壤坡耕地土壤氮素流失特征[J].应用生态学报,2002,13(7):863-866.
- [29] 张宇,荣湘民,王心星,等.覆盖与生态拦截对旱地土壤地表径流和氮素流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):15-19.
- [30] 张展羽,左长清,刘玉含,等.水土保持综合措施对红壤坡地养分流失作用过程研究[J].农业工程学报,2008,24(11):41-45.
- [31] 王全九,穆天亮,王辉,等.土壤溶质随径流迁移基本特征分析[J].水土保持研究,2008,15(6):38-41.
- [32] 陈晓安,杨洁,郑太辉,等.赣北第四纪红壤坡耕地水土及氮磷流失特征[J].农业工程学报,2015,31(17):162-167.
- [33] 王双,叶良惠,郑子成,等.玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究[J].水土保持学报,2018,32(6):28-33.