

施肥与耕作对红壤坡地养分流失的影响

王 云^{1,2}, 徐昌旭^{2*}, 汪怀建¹, 谢志坚²

(1.江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2.江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200)

摘 要:采用田间小区试验方法,通过田间实地监测,在自然降雨条件下,对南方典型红壤坡耕地采取不同施肥量及不同耕作方式对作物养分利用率及地表径流的影响进行了研究。结果表明,萝卜优化施肥(减氮增钾)和花生优化施肥(减氮增磷),作物对氮磷养分吸收量均不会减少,同时提高了氮素养分利用率,萝卜提高 15%,花生提高 3.3%,优化施肥对磷素利用率没有影响且利用率较低,萝卜为 8.55%~8.73%,花生为 2.47%~2.63%。花生垄作氮肥利用率提高 12.15%~12.77%,磷肥利用率提高 1.24%~1.28%;同时期的径流量与降雨量呈显著正相关,相关系数达 0.86;垄作使径流总量降低 $0.43 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$,垄作+秸秆覆盖比单纯垄作径流总量降低 $0.14 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$;除对照(CK)外,径流水中 TN、TP 浓度处理间差异不显著,但可溶性养分(NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、STP)后期有所不同,不同时期径流水中养分浓度变化较大,主要与施肥、农事活动及降水养分浓度有关;径流水氮磷养分流失总量与施肥量呈正比;旱地土壤氮素主要以泥沙结合态流失, NO_3^- -N 是可溶性无机氮流失的主要形态,占 TN 的 10.53%~12.48%, NH_4^+ -N 次之,占 TN 的 6.19%~8.33%,磷素也以泥沙结合态流失为主,STP 占 TP 的 29.38%~40.74%。

关键词:施肥;耕作;地表径流;养分流失;坡耕地;红壤

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)03-0500-08

Effect of Fertilizer Levels and Tillage Methods on Nutrient Loss of Red Soil Slopes

WANG Yun^{1,2}, XU Chang-xu^{2*}, WANG Huai-jian¹, XIE Zhi-jian²

(1.College of Land Resources and Environmental Sciences,Jiangxi Agricultural University,Nanchang 330045,China;2.Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment,Jiangxi Academy of Agricultural Sciences,Nanchang 330200,China)

Abstract: Red soil is the most important soil resources in the subtropical region of China where there is a relatively serious soil erosion caused by unreasonable utilization and heavy rainfall. Nitrogen and phosphorus losses with runoff are the main contributions to water eutrophication. In order to study how to reduce the nutrients losses and improve the nutrients recoveries, a field experiment treated with different application rates and different cultivation methods was conducted on the typical red soil sloping upland in 2008. The results showed that the optimized fertilization treatment increased the radish and the peanut's recoveries for nitrogen fertilizer by 15% and 3.3% respectively, while had no effects on the both crops' recoveries for phosphorous fertilizer. Ridge culture treatment improved the peanut's recoveries for nitrogen and phosphorous fertilizers by 12.15%~12.77% and 1.24%~1.28% respectively. The volume of runoff was positively correlated to rainfall amount significantly with a correlation coefficient of 0.86. Single ridge culture treatment reduced the total volume of runoff by $0.43 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$, while ridge culture combined with straw mulching treatment reduced the total volume of runoff by $0.14 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$, compared to the single ridge culture treatment. Except the control treatment(CK), the concentrations of TN(total nitrogen) and TP(total phosphorous) in runoff were no significant difference between other treatments, while the soluble nutrients, such as NO_3^- -N, NH_4^+ -N and soluble phosphorous, were different between treatments. The concentrations of nutrients in runoff varied with time, which were mainly influenced by the fertilization, farming activities and rainfall. The total loss of nitrogen and phosphorous with runoff was positively correlated to the total amount of application. For red soil sloping upland, both nitrogen and phosphorous lost by adhering to the soil granular with the runoff. NO_3^- -N and NH_4^+ -N were the two main forms of soluble inorganic nitrogen loss, accounting for 10.53%~12.48% and 6.19%~8.33% of total nitrogen respectively. Soluble phosphorous accounted for about 29.38%~40.74% of total phosphorous.

Keywords: fertilization; cultivation; runoff; nutrient loss; slopes; red soil

收稿日期:2010-08-06

基金项目:全国第一次污染源普查:种植业源污染物流失系数测算坡耕地地表径流重点监测(WX-Z-07-0);国家“十一五”科技支撑计划(2007BAD87B01,2007BAD87B08)

作者简介:王 云(1985—),女,硕士研究生,研究方向:环境污染与修复。E-mail:wangyun_304789@126.com

* 通讯作者:徐昌旭 E-mail:changxux@sina.com

肥料是重要的农业生产资料,增加化肥投入已成为提高耕地生产力的主要途径之一。近30年来,单位耕地的化肥用量迅猛增长,但化肥养分报酬逐渐递减,大量的养分以不同方式进入环境。地表径流是耕地养分流失的重要途径之一,径流水携带的N、P是造成水体富营养化重要来源。Parry^[1]的研究,湖泊、河流富营养化的养分分别有50%、60%来源于农田径流水。Sharpley等^[2]认为,当季磷肥的流失量通常不超过5%,但对水体富营养化具有关键的作用。

红壤是我国亚热带地区重要的土壤资源,且该区域多为低山丘陵,雨热资源丰富,加上人类长期不合理利用和集中强降水加剧了该区域水土流失。水土流失量主要受降雨量、降雨强度、地形、土壤质地、土壤肥力状况、地表植被、肥料用量、耕作方式和人为管理等多种因素影响,由于年际间降雨及时空分布差异明显,要准确估算区域土壤侵蚀导致的养分流失量比较困难。国内外对旱坡地的研究主要集中在采用人工降雨方法研究不同雨强条件下裸土养分流失的规律^[3],不同土地利用类型对养分流失的影响^[4-6]以及养分流失的形态研究^[7-8],而对于不同土地耕作方式对旱地养分流失的影响研究较少,不同耕作方式与施肥方式相结合的研究更少。张丽^[9]研究了植物篱与不同农艺措施相结合对旱地养分流失影响,结果表明,紫穗槐植物篱能有效涵养水分、保持水土,同时平衡施肥可以减少坡地径流产生和泥沙侵蚀,且单纯植物篱措施和植物篱与平衡施肥相结合措施效果优于植物篱与垄作相结合的措施。但重点考虑了植物篱的作用,而对于不同农艺措施对养分流失的单独作用没有研究。林超文^[10]研究了紫色土不同雨强条件下不同耕作方式对养分流失规律的影响,但采用的是人工降雨,忽略了季节变化及气候对土壤养分流失的影响。本文主要通过田间实地监测,研究自然降雨条件下,采取不同施肥水平及不同耕作方式下对作物养分利用率的影响,地表径流发生规律及径流养分的流失量的影响,为旱作物施肥和坡耕地氮磷流失农艺阻控提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 监测点概况

监测点位于江西省东乡县境内的江西省农业科学院赣东北红壤试验区,地理位置东经116°34′58.3″,北纬28°11′9″,属亚热带湿润气候区,年均气温17.7℃,年降水量1710.4 mm,全年无霜期271 d。地形为

浅丘缓坡地,监测地块坡度7°。土壤类型为第四季红色黏土发育成的红壤。耕作层土壤基本理化性状为有机质13.25 g·kg⁻¹,全氮0.87 g·kg⁻¹,硝态氮1.37 mg·kg⁻¹,铵态氮34 mg·kg⁻¹,全磷0.53 g·kg⁻¹,有效磷5.4 mg·kg⁻¹,有效钾65.84 mg·kg⁻¹,pH4.95。

1.2 试验设计

试验共设5个处理:不施肥+顺坡耕作(CK),常规施肥+顺坡耕作(CA),优化施肥+顺坡耕作(OA),优化施肥+横坡垄作(OH),优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖(OHB)。各处理3次重复,随机排列。

试验按照径流小区设计,各径流小区用砖混结构田埂分隔,小区面积24 m²(长8 m,宽3 m),径流池容积2.2 m³(长2 m,宽1 m,高1.1 m)。

种植制度为传统的萝卜-花生。供试萝卜品种为信丰白萝卜,于2007年10月21日播种,条播,播种量10 kg·hm⁻²,行距35 cm,播后覆土2~3 cm,全部采用平作,于4月23日测定其生物量;萝卜常规施肥量N、P₂O₅、K₂O分别为96、18、0 kg·hm⁻²,氮肥75%做基肥、25%做追肥,磷肥全部做基肥;优化施肥采用“减氮增钾”,N、P₂O₅、K₂O分别为69、18、54 kg·hm⁻²,氮肥75%做基肥、25%做追肥,磷肥全部做基肥,钾肥75%做基肥、25%做追肥。萝卜于2008年4月23日收获,次日播种花生。供试花生品种为粤油552,条播,行距45 cm,株距15 cm,播种量230 kg·hm⁻²,顺坡耕作处理采用平作,横坡垄作处理的垄高10 cm,垄宽50 cm,垄上种植2行花生;花生常规施肥量N、P₂O₅、K₂O分别为135、90、135 kg·hm⁻²,氮肥50%做基肥、25%在苗期追施、25%在下针期追施,磷肥全部做基肥,钾肥基施、苗期和下针期追施分别占施肥量的1/3;优化施肥是在常规施肥基础上采取“减氮增磷、增基减追”,N、P₂O₅、K₂O分别为108、97.5、135 kg·hm⁻²,氮肥65%做基肥、15%在苗期追施、20%在下针期追施,磷肥全部基施,钾肥75%做基肥、25%在下针期追施。花生于2008年9月6日收获。供试肥料品种分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾。

1.3 样品采集与制备

降雨量采用标准雨量筒计量,在每次产生降水后的次日上午9:00记录降雨量并采集降水样品;径流水样在每次产生径流后的次日上午9:00采集,先用卷尺测量各小区径流池中水深并根据径流池面积折算径流量,然后用木棒将径流池中的水混匀,用塑料勺将径流水样装入干净的矿泉水瓶中;采集的降水样和径流水样及时放置冰箱中冷冻保存待测。

萝卜收获后各小区按 5 点取样法采集新鲜植株(含地下直根)混合样带回实验室,将萝卜切碎、混匀后在 50 ℃ 的烘箱中鼓风烘 3~4 h,然后置于 100 ℃ 的烘箱中烘 1~2 h 至恒重;花生收获后各小区按 5 点取样法采集新鲜植株混合样带回实验室,分果实和秸秆两部分在 105 ℃ 烘干 3~4 h 至恒重。经烘干后的植株样品先测定其生物量,然后用高速粉碎机粉碎用于养分测定。

1.4 测定方法

水样测定^[11]:总氮(TN)测定前将水样摇匀,迅速吸取样品 10 mL 采用碱性过硫酸钾消煮(120 ℃,200 kPa 消煮 40 min),紫外分光光度法(GB 11894—1989)测定;硝态氮(NO₃⁻-N)经定性滤纸过滤,采用紫外分光光度法(HJ/T346—2007)测定;铵态氮(NH₄⁺-N)经定性滤纸过滤后采用水杨酸分光光度法(GB 7481—1987)测定;总磷(TP)测定前将水样摇匀,迅速吸取样品 25 mL 采用过硫酸钾消煮(120 ℃,200 kPa 消煮 40 min),钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定;可溶性总磷(STP)经 0.45 μm 滤膜后过硫酸钾消煮(120 ℃,200 kPa 消煮 40 min),钼蓝比色法测定^[12]。

植株样品测定^[13]:全氮采用硫酸-双氧水消煮开氏蒸馏法测定,全磷采用硫酸-双氧水消煮钒钼黄比色法测定。

1.5 计算方法

1.5.1 养分流失总量

地表径流氮、磷流失总量等于整个监测周期中各次径流水中氮、磷浓度与径流水体积乘积之和。计算公式^[14]如下:

$$P = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i \times 10^{-6}$$

式中: P 为氮、磷流失总量,kg·hm⁻²; C_i 为第 i 次径流水中氮、磷浓度,mg·L⁻¹; V_i 为第 i 次径流水的体积,L·hm⁻²。

1.5.2 养分流失系数

养分流失系数以流失率(%)表示^[15]。以氮素为例,计算公式如下:

氮肥流失率(%)=(施肥处理氮素流失量-对照处理氮素流失量)/肥料氮施用量×100%

1.5.3 养分利用率

养分利用率采用差减法计算。以氮素为例,计算方法如下:

氮肥利用率(%)=(施肥处理植株氮素吸收量-对照处理植株氮素吸收量)/肥料氮施用量×100%

其中:

萝卜植株养分吸收量=萝卜生物量×萝卜养分含量

花生植株养分吸收量=花生籽粒产量×籽粒养分含量+花生秸秆产量×秸秆养分含量

籽粒产量、秸秆产量、氮素含量等指标均统一以烘干基表示。

1.5.4 数据处理

数据分析及图表采用 SPSS16.0 和 Microsoft Excel 2010 处理。

2 结果和讨论

2.1 施肥与耕作对作物养分吸收利用影响

2.1.1 施肥对萝卜养分吸收利用影响

由表 1 可以看出,各施肥处理与不施肥(CK)相比,萝卜干物质积累量增加 330~495 kg·hm⁻²,差异显著,同时施肥有利于提高萝卜对氮磷养分的吸收利用,表明红壤旱坡地施肥是提高萝卜产量的重要措施。

在顺坡耕作条件下,优化施肥(OA)与常规施肥(CA)比较,对萝卜干物质积累没有影响,对磷素吸收量和磷素利用率影响也不显著,但可显著提氮素吸收量和氮素利用率,氮素吸收量提高了 6.75 kg·hm⁻²、增加 15%,氮素利用率提高了 15.3 个百分点;表明在红壤坡耕地传统施肥基础上适当减少氮肥用量的同时配施适量钾肥对萝卜产量没有负面影响,并能促进萝卜对氮素吸收利用,降低红壤旱坡地氮素养分流失风险。优化施肥与常规施肥比较,因磷肥用量相同,故对萝卜磷素吸收利用影响较小,同时由于红壤对磷的固定能力较强,因而萝卜磷肥当季利用率较低,只有 8% 左右,增加了强降雨情况下的流失风险。

表 1 萝卜生物量及养分吸收利用

Table 1 Radish biomass and nutrient harvest

处理	萝卜干物质质量/ kg·hm ⁻²	养分吸收量/kg·hm ⁻²		肥料利用率/%	
		N	P	N	P
CK	975a	31.35a	2.145a	—	—
CA	1 395b	45.00b	3.735b	14.19a	8.55a
OA	1 470b	51.75c	3.765b	29.52b	8.73a
OH	1 305b	51.90c	3.735b	29.66b	8.60a
OHB	1 440b	51.90c	3.765b	29.77b	8.70a

注:表格中同一列相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

2.1.2 施肥与耕作对花生养分吸收利用的影响

由表 2 可以看出,各施肥处理的花生荚果和秸秆干物质积累量均显著高于对照(CK),荚果产量增加

325~795 kg·hm⁻²。在顺坡耕作条件下,优化施肥(OA)与常规施肥(CA)比较,花生荚果干物质积累量没有显著变化;但在优化施肥的基础上横坡垄作及覆盖能显著增加花生荚果干物质积累量,减少了秸秆干物质积累量,荚果干物质积累量增加 510~540 kg·hm⁻²,增长 18.9%~20.0%。在顺坡耕作条件下,OA 与 CA 比较,花生荚果和秸秆氮磷养分的吸收量与干物质积累量基本一致,而氮素利用率较常规施肥提高 3.3 个百分点,效果显著;但对磷素养分利用率影响很小,主要是由于优化施肥减少了 20%氮肥用量和磷肥用量增加较少。因此,红壤旱坡地花生在顺坡种植条件下,减少氮肥用量的同时增加磷肥用量是提高肥料利用率、减少养分流失的有效途径。

在优化施肥条件下,横坡垄作(OH)和横坡垄作及覆盖(OHB),较之顺坡耕作显著提高花生氮、磷养分吸收量和利用率,花生荚果氮吸收量分别增加 1.45、2.80 kg·hm⁻²,磷吸收量增加 1.4 kg·hm⁻²左右;氮素养分利用率分别提高 12.1 和 12.8 个百分点,磷素养分利用率提高了 1.3 个百分点左右。主要是垄作加厚了活土层,有利于根系伸展下扎,提高根系对土壤养分吸收利用,同时增加了碳水化合物的合成与运转^[16],使养分更多的用于荚果的形成,增加花生荚果

产量。在横坡垄作基础上,秸秆覆盖(OHB)与无覆盖(OH)相比,花生果实和秸秆产量及氮磷的养分吸收量均没有明显差异,这与萝卜秸秆 C/N 比较低,易腐烂,对减少养分流失效果不明显有关。

优化施肥或横坡垄作尽管能提高花生磷素养分利用率,但红壤旱坡地花生磷素养分利用率很低,磷肥当季利用率仅 4%左右。一般情况下,豆科作物具有较强的吸磷能力。本试验花生的磷素利用率较低,可能与供试土壤有效磷含量较低,加上红壤对磷的固定能力较强等有关。

2.2 施肥与耕作对地表径流的影响

2.2.1 降雨时间分配特征

分析 2008 年监测点月降雨量和月降雨日数(图 1),降雨主要集中在 3—7 月,降雨量最大的月份在 6 月,全月 321 mm,月降雨日数 13 d,且多以高强度的暴雨形式出现,日降雨量多在 30 mm 以上,最大日降雨量为 98 mm;1—2 月尽管月降雨日数较多,但单次降雨量小,因此不容易产生径流。在雨季集中的月份,虽然月份之间的降雨日数变化不大,但月降雨总量差异明显。短时间的强降水极易产生地表径流且土壤侵蚀严重;当土壤水分饱和时,日降雨量较小时也易产生径流。

表 2 花生生物量及养分吸收利用
Table 2 Peanut biomass and nutrient harvest

处理	果实干物质质量/ kg·hm ⁻²	果实养分吸收量/kg·hm ⁻²		秸秆干物质质量/ kg·hm ⁻²	秸秆养分吸收量/kg·hm ⁻²		肥料利用率/%	
		N	P		N	P	N	P
CK	2 445a	83.85a	4.98a	1 620a	17.40a	1.02a	—	—
CA	2 700b	105.00b	6.80b	1 800c	29.85c	1.76b	18.12a	2.63a
OA	2 700b	105.90b	6.87b	1 800c	30.15c	1.76b	21.42b	2.47a
OH	3 210c	127.35c	8.22c	1 695b	28.65b	1.77b	33.57c	3.75b
OHB	3 240c	128.70c	8.21c	1 680b	28.20b	1.74b	34.19c	3.71b

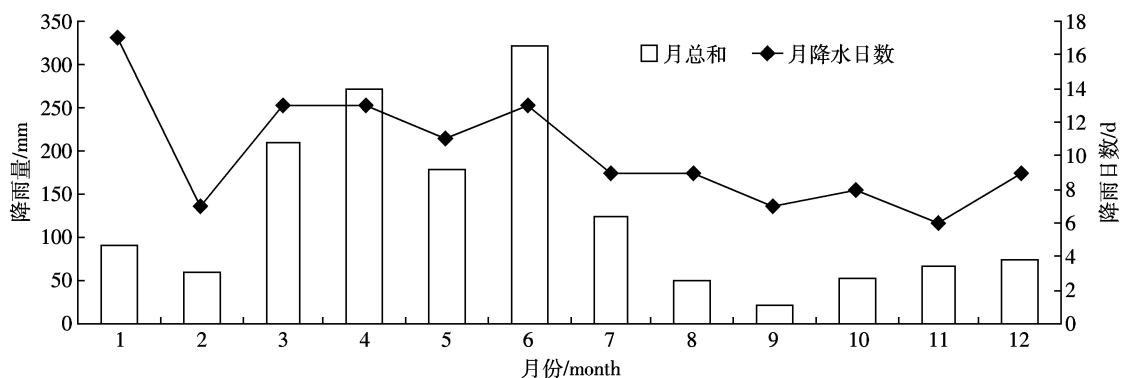


图 1 2008 年度月降雨量与降雨日数

Figure 1 Monthly rainfall and rainfall days in 2008

2.2.2 降雨与地表径流的关系

将降水量与对照处理相对应的径流量做相关分析(如图 2)得出,同时期的径流量与降雨量呈显著正相关($r=0.86$)。

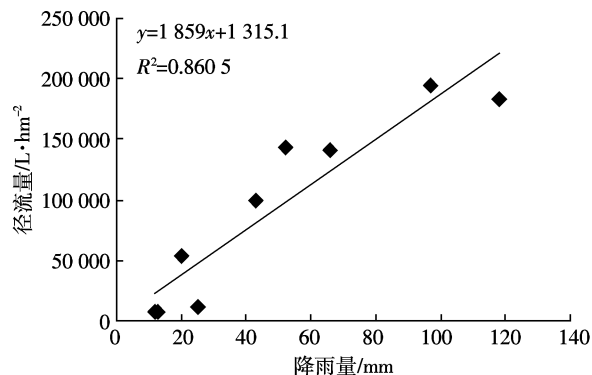


图 2 径流量与降雨量相关性

Figure 2 The correlation between runoff and rainfall

2.2.3 施肥与耕作对地表径流量影响

本次监测试验从花生种植开始采集径流水,到花生收获时共采集 9 次径流水。各处理径流总量 $7.47\times 10^5\sim 8.42\times 10^5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中以对照(CK)的径流总量最大,这与对照处理植被覆盖度低有关。植被覆盖度提高,能减弱降水对地面的直接冲刷作用,而且增加了降水入渗时间,增大雨水的入渗量和蓄积量,从而减少了地表径流量。施肥与不施肥比较,地表径流量降低了 $0.38\times 10^5\sim 0.95\times 10^5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$,降低幅度为 4.5%~11.3%(表 3);优化施肥(OA)与常规施肥(CA)比较,径流总量基本没有差异。

表 3 不同处理的地表径流总量

Table 3 Runoff total amount of different treatments

处理	产流次数	径流总量/ $10^5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$
CK	9	8.42a
CA	9	8.06b
OA	9	8.04b
OH	9	7.61c
OHB	9	7.47d

垄作加厚了活土层,降低了土壤容重,有利于根系下扎和保持水土,防止土壤板结,提高降水入渗能力,同时横坡垄沟拦截径流,因此横坡垄作能显著降低红壤旱坡地地表径流量。横坡垄作(OH)与顺坡耕作(OA)比较,径流总量降低 $0.43\times 10^5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$,降低幅度达到 5.3%。横坡垄作+秸秆覆盖(OHB)与顺坡耕作(OA)比较,径流总量降低 $0.57\times 10^5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$,降低幅度达到 7.1%。在横坡垄作条件下,秸秆覆盖可以减轻雨

水的击溅能力,起到一定的缓冲作用,同时也可截留降水,因此覆盖处理(OHB)与无覆盖(OH)相比,径流总量降低 $0.14\times 10^5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$,降低幅度为 1.8%。

2.3 不同时期径流水中养分浓度变化

由图 3~图 7 可以看出,在整个监测周期中,对照

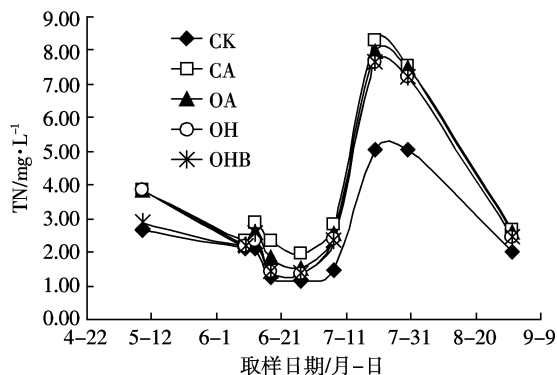


图 3 不同取样时间径流水 TN 浓度

Figure 3 TN concentration in runoff water of different sampling times

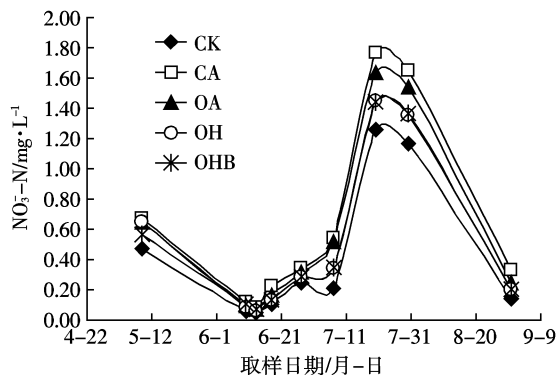


图 4 不同取样时间径流水 NO_3^- -N 浓度

Figure 4 NO_3^- -N concentration in runoff water of different sampling times

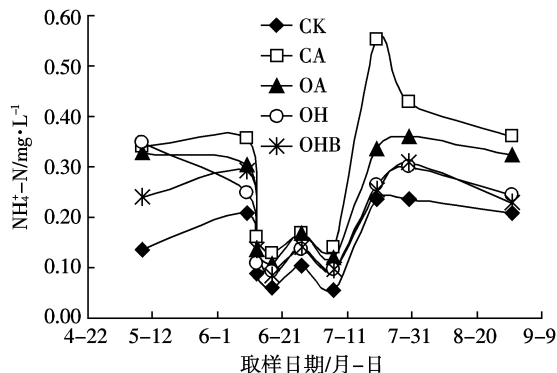


图 5 不同取样时间径流水 NH_4^+ -N 浓度

Figure 5 NH_4^+ -N concentration in runoff water of different sampling times

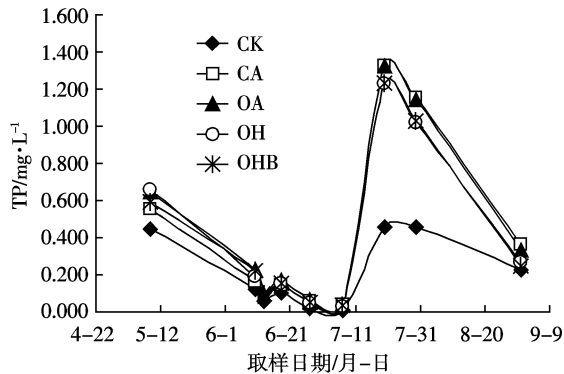


图6 不同取样时间径流水 TP 浓度

Figure 6 TP concentration in runoff water of different sampling times

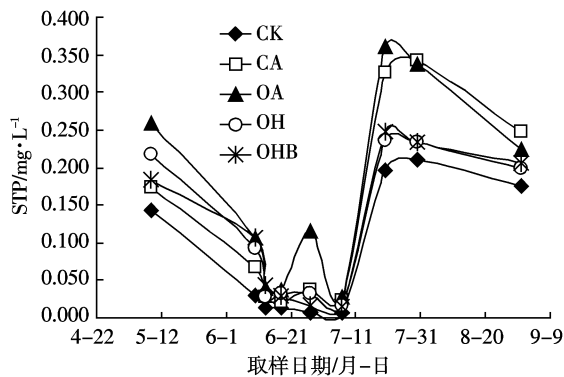


图7 不同取样时间径流水 STP 浓度

Figure 7 STP concentration in runoff water of different sampling times

处理(CK)径流水氮、磷养分浓度始终低于各施肥处理,表明施肥会增加径流水中氮磷养分浓度。

前期径流水中各处理(除CK外)养分浓度(除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 外)差异不大,后期径流水可溶性养分($\text{NO}_3^+\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和STP)浓度在顺坡耕作条件下,优化施肥(OA)与常规施肥(CA)差异较小,但在优化施肥基础上,横坡垄作(OH和OHB)较顺坡耕作(OA)有明显差异。这可能与前期花生植株较小,覆盖度低,对养分的吸收较少,垄作对减少养分流失效果不明显,而后期垄作提高作物对养分的吸收利用率,且作物以吸收可溶性无机养分为主,减少了可溶性养分流失有关。

各处理氮磷养分浓度(除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 外)随时间推移都呈急剧降低后迅速增加又急剧下降的趋势。因为在监测前期,降雨首先带走土壤表层养分较高的细颗粒,随时间推移,降水开始搬运养分含量较低的大颗粒,又适逢5—6月为降雨集中且以高强度出现时期,

养分流失严重,所以径流水养分浓度随时间变化迅速降低,但在7月下旬径流水养分浓度都出现最大峰值,氮素浓度增加与后期追施氮肥有关,但磷肥作为基肥一次性施入,后期迅速增加,可能与氮肥施入有关,氮肥可以活化土壤中的闭蓄磷,增加磷素流失风险。此外,可能与降水中养分浓度有关,该时期正是南方对耕地进行翻耙以及大量施肥时期,对土壤扰动较大,再加上后期温度较高,养分随地表水蒸发严重,增加了降水中养分浓度^[7]。因此,我们要注意肥料的适量施用,采取最佳施用方式(如肥料深施等),并注意施肥时的天气状况,以减少蒸发损失。

径流水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度自始至终缓慢变化,且初期和末期径流水浓度相似,这与氮肥的转化有关,尿素施入土壤后迅速转化成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,所以初期遇强降水, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失较严重,又由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容易被土壤吸附,在径流水中含量很少,所以末期随时间变化径流水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化较小。

2.4 施肥与耕作对养分流失总量的影响

各处理养分流失总量(如表4)均以对照(CK)最少,这与对照处理土壤养分低且无外源养分输入有关。在顺坡耕作条件下,优化施肥(OA)与常规施肥(CA)各种养分流失总量均有显著差异,且与施肥量呈正比,TN流失减少 $0.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 流失减少 $0.029\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失减少 $0.023\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,TP流失增加 $0.033\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,STP流失增加 $0.028\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明减氮处理对于减少氮素流失作用明显。同时,增施磷肥也会增加TP和STP的流失总量,这与磷肥施入土壤后易被表层土壤固定,大多数磷肥在土壤表层产生富集作用有关,而该阶段降雨多以连续性高强度暴雨出现,表层土壤磷素很容易以泥沙形式流失,且该地区降雨酸性较大,泥沙中的磷素易于溶解进入水溶液中有关。

在优化施肥条件下,横坡垄作(OH和OHB)与顺

表4 各处理径流水养分流失总量

Table 4 Nutrients loss total amount in the runoff water of different treatments

处理	TN/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$\text{NO}_3^+\text{-N}/$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}/$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	TP/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	STP/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
CK	1.61a	0.170a	0.100a	0.126a	0.037a
CA	2.30e	0.287e	0.191e	0.173b	0.056b
OA	2.10d	0.258d	0.168d	0.206c	0.084c
OH	1.84c	0.207c	0.141c	0.179b	0.063b
OHB	1.69b	0.195b	0.132b	0.174b	0.059b

坡耕作(OA)比较,氮磷各种形态养分流失总量均有所减少,TN 流失减少 $0.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失减少 $0.051 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.063 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失减少 $0.027 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.036 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, TP 流失减少 $0.027 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.032 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, STP 流失减少 $0.021 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.025 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 这与垄作提高了花生养分利用率有关。在横坡垄作条件下,秸秆覆盖(OHB)与无覆盖(OH)相比,可以显著减少各形态氮素的流失量,TN 流失减少 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失减少 $0.012 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失减少 $0.009 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但不能显著减少磷素流失总量。由此可知,红壤坡耕地作物垄作和覆盖栽培是减少养分流失的重要农艺措施。

由表 5 可知,TN 流失系数各处理间均差异显著,优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖(OHB)流失系数最小,仅 0.05%;常规施肥+顺坡耕作(CA)流失系数最大,达 0.37%。总磷流失系数常规施肥+顺坡耕作(CA)与优化施肥+横坡垄作(OH 和 OHB)相当且较小,仅为 0.05%左右,优化施肥+顺坡耕作(OA)最大,达 0.076%,这与增施磷肥有关。氮素流失形态主要以泥沙结合态为主,可溶性无机氮只占 TN 的 20%左右,这与袁东海^[18]在浙江省兰溪市蒋家塘小流域监测可溶性氮占总氮比例相比略低,主要是因为我们只测定了可溶性无机氮,不包括可溶性有机氮部分。在可溶性无机养分中以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的形式流失为主,占 TN 的 10.53%~12.48%;其次是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 占 TN 的 6.19%~8.33%。较水田土壤而言, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在旱地土壤流失严重,这与旱地土壤通气良好,硝化作用较强有关。尿素施入土壤中很快经氨化作用转化成铵态氮,在通气良好的旱地农田中,经硝化细菌作用又很快转化成硝态氮,且 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 大多存在于土壤溶液中,遇强降水便造成损失。而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 易被土壤吸附,不易随径流流失。磷素的流失形态也主要以泥沙结合态流失,约占 TP 浓度的 60%,STP 占 TP 的 29.38%~33.38%。与袁

东海监测结果基本一致。

3 结论

(1)萝卜优化施肥(减氮增钾)和花生优化施肥(减氮增磷)均可以提高氮素利用率,对磷素利用率影响不大。因此,要杜绝盲目施肥,注意肥料适宜用量及平衡施肥,以取得更好的经济和环境效益。

(2)花生垄作可以明显提高花生荚果产量及养分利用率,但横坡垄作+秸秆覆盖与单纯垄作相比,减少养分径流量效果不明显,建议覆盖 C/N 较高不易腐烂的如玉米秸秆、水稻秸秆等,以取得较好的水土保持效果。

(3)养分流失总量与施肥量呈正比。花生优化施肥(减氮增磷)可以减少氮素流失总量但同时磷素流失总量增加,所以要慎重增施磷肥或注意深施,以减少养分损失。

(4)不同处理径流水中总氮、总磷浓度没有明显差异,但不同时期径流水中养分浓度变化很大,主要受施肥、农事活动以及降水中养分浓度影响。因此,要注意肥料深施,避免高温施肥,减少肥料损失。

(5)垄作可以显著减少径流量及养分流失总量。因此,在旱坡地土壤流失严重的地区应该推广作物起垄种植。

参考文献:

- [1] Parry R. Agricultural phosphorus and quality: An U. S. environmental protection agency perspective[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 258-261.
- [2] Sharpley A N, Charpa S C, Wedepohl R, et al. Managing agriculture phosphorus protection of surface waters: Issues and options[J]. *J Environ Qual*, 1994, 23: 437-451.
- [3] 马 琨, 陈 欣, 王兆骞, 等. 模拟暴雨下红壤坡面产流产沙及养分流失特征研究[J]. 宁夏农学院学报, 2004, 25(1): 1-4.
MA Kun, CHEN Xin, WANG Zhao-qian, et al. The research on characteristics of runoff and sediment yield and nutrient loss on red soil slope by simulated rainstorm[J]. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2004, 25(1): 1-4.
- [4] 黄河仙, 谢小立, 王凯荣, 等. 不同覆被下红壤坡地地表径流及其养分流失特征[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1645-1648.
HUANG He-xian, XIE Xiao-li, WANG Kai-rong, et al. Characteristics of runoff and nutrient loss on red soil slope with different cover[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2008, 17(4): 1645-1648.
- [5] 胡 实, 谢小立, 王凯荣, 等. 红壤坡地不同土地利用类型地表产流特征[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 24-28.
HU Shi, XIE Xiao-li, WANG Kai-rong, et al. Runoff characteristics on red soil slope by different land use type[J]. *Journal of Ecological and Rural Environment*, 2007, 23(4): 24-28.
- [6] 彭 娜, 王开峰, 谢小立, 等. 不同利用方式红壤坡地土壤水分分配

表 5 各处理养分流失系数与流失形态

Table 5 Nutrient loss coefficients and forms of different treatments

处理	流失率/%		流失形态/%		
	TN	TP	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$	STP/TP
CK	-	-	10.53	6.19	29.38
CA	0.372d	0.049a	12.48	8.33	32.15
OA	0.299c	0.076b	12.32	7.99	40.74
OH	0.140b	0.050a	11.28	7.66	35.03
OHB	0.050a	0.045a	11.55	7.82	33.88

- 及水肥流失研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1):53-58.
- PENG Na, WANG Kai-feng, XIE Xiao-li, et al. The research on soil water distribution and water and nutrient loss on red soil slope by different farmland use type[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2008, 15(1):53-58.
- [7] Flanagan D C, Foster G R. Storm pattern effect on nitrogen and phosphorus losses in surface runoff[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(2): 535-544.
- [8] Sharpley A N, Smith S J, et al. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff[J]. *Journal Environment Quality*, 1992, 21:30-35.
- [9] 张丽, 刘玲花, 程东升, 等. 不同农艺措施对坡耕地水土及氮磷流失的控制[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5):21-25.
- ZHANG Li, LIU Ling-hua, CHENG Dong-sheng, et al. The loss control of soil and water and nitrogen and phosphorus with different agricultural measures[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5):21-25.
- [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, 40(10):2242-2245.
- LIN Chao-wen, CHEN Yi-bing, HUANG Jing-jing, et al. The effect of nutrient loss with different tillage methods and different rainfall intensity on purple soil[J]. *Agricultural Science of China*, 2007, 40(10): 2242-2245.
- [11] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- XIE Xian-qun, WANG Li-jun. Observation and analysis of water environmental factors[M]. Beijing: Standards Publishing House of China, 1998.
- [12] 周萍, 范先鹏, 何丙辉, 等. 江汉平原地区潮土水稻田面水磷素流失风险研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4):47-51.
- ZHOU Ping, FAN Xian-peng, HE Bing-hui, et al. The research on phosphorus loss risk of alluvial soil paddy field floodwater in the Changjiang River and Hanjiang River areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4):47-51.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:245-271.
- BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Agricultural Publishing House of China, 2000:245-271.
- [14] 冯涛, 杨京平, 施宏鑫, 等. 高肥力稻田不同施氮水平下的氮肥效应和几种氮肥利用率的研究[J]. 浙江大学学报, 2006, 32(1):60-64.
- FENG Tao, YANG Jing-ping, SHI Hong-xin, et al. The research on nitrogen fertilizer effect and utilization with different nitrogen fertilizer levels in the high fertility paddy field[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2006, 32(1):60-64.
- [15] 王介元, 王昌全. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997:222-223.
- WANG Jie-yuan, WANG Chang-quan. Soil fertilizer science[M]. Beijing: Agricultural Technology Publishing House of China, 1997:222-223.
- [16] 李东广, 余辉. 花生垄作增产机理及配套栽培技术[J]. 经济作物, 2008, 2:103-104.
- LI Dong-guang, YU Hui. The mechanism of peanut yield increase by ridge culture and matching cultivation technique [J]. *Economic Crops*, 2008, 2:103-104.
- [17] 郅瑞卿, 孙彦君, 王继红, 等. 自然降雨对黑土地表氮素养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5):69-72.
- RUI Qing, SUN Yan-jun, WANG Ji-hong, et al. Effect of rainfall to black land surface nitrogen loss[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5):69-72.
- [18] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 等. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报, 2003, 23(1):188-193.
- YUAN Dong-hai, WANG Zhao-qian, CHEN Xin, et al. The research on characteristics of runoff and nutrient loss on red soil watershed by different farmland use type[J]. *Journal of Ecology*, 2003, 23(1):188-193.