

浙江红壤区经济林坡地氮素径流流失特征研究

刘 俏¹, 张丽萍^{1*}, 聂国辉², 胡响明³, 钱 婧¹, 连琳琳¹

(1.浙江省亚热带土壤与植物营养重点研究实验室, 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2.浙江省水土保持监测中心, 杭州 310007; 3.永康市水土保持监督管理站, 浙江 永康 321300)

摘 要:以浙江省永康市方山柿经济林坡地为试验区, 依据不同地形条件及林下管理措施, 设置 7 个径流小区和沉砂池, 定期采集沉砂池水样, 测定径流中不同形态氮素浓度。通过为期一年的监测分析, 得到如下结论: (1) 试验区氮素流失与水文年内降水具有明显的同步性, 氮素流失多发生在降水集中的梅雨和台风季节。这两个季节的降水量占全年降水的 66.2%, TN、NO₃-N 和 NH₄⁺-N 流失量分别占全年总流失量的 80.3%、78.2% 和 83.0%。(2) 坡顶、凸坡和凹坡径流小区的氮素流失符合养分流失的“临界坡度”规律, 临界坡度在坡顶(10.22°)与凹坡(18.55°)之间。水文年内 TN 和 NO₃-N 流失量关系为坡顶>凹坡>凸坡, NH₄⁺-N 流失量关系为凹坡>坡顶>凸坡。三种地形径流小区的年内氮素累积流失量均呈幂函数型增加。(3) 对照林下管理措施不同的 6 号(林下除草)和 7 号(林下不除草)径流小区, 发现草被覆盖对减少经济林坡地氮素径流流失具有明显效果。保留草被覆盖的 7 号小区比除草的 6 号小区的 TN、NO₃-N 和 NH₄⁺-N 径流流失分别减少了 22.1%、36.2% 和 44.1%。

关键词:经济林; 氮素; 时空变化; 管理措施

中图分类号:S157.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)07-1388-06 doi:10.11654/jaes.2014.07.019

Characteristics of Nitrogen Runoff Losses from Economic Forest Lands in Hilly Red Soil Area of Zhejiang Province, China

LIU Qiao¹, ZHANG Li-ping^{1*}, NIE Guo-hui², HU Xiang-ming³, QIAN Jing¹, LIAN Lin-lin¹

(1.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition/Key Laboratory of Polluted Environment Remediation and Ecological Health, College of Environment and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2.Zhejiang Soil and Water Conservation Monitoring Center, Hangzhou 310007, China; 3.Yongkang Soil and Water Conservation Supervision and Management Station, Yongkang 321300, China)

Abstract: Nitrogen loss in sloping forest lands is not only an important source of non-point source pollution, but also reduces use efficiency of nitrogen fertilizer. An experiment was conducted to monitor nitrogen losses in persimmon economic forests in hilly red soil area in Yongkang, Zhejiang. Total 7 runoff plots were set up under different terrains and forest managements. Grit chambers were established to collect water samples monthly. Different forms of nitrogen in water samples were then measured. Nitrogen losses were obviously synchronous with precipitation in a hydrological year. Most of nitrogen losses occurred in rainy and typhoon seasons, which accounted for 66.2% of the annual precipitation. During these two seasons, TN, NO₃-N and NH₄⁺-N losses were 80.3%, 78.2% and 83.0% of the annual total N loss, respectively. In the hydrological year, the rates of TN and NO₃-N losses were crest>concave slope>convex slope, while the rate of NH₄⁺-N losses was concave slope>crest>convex slope. The cumulative nitrogen losses under three terrains had power function relationship with time. Grass coverage reduced runoff losses of TN, NO₃-N and NH₄⁺-N by 22.1%, 36.2% and 44.1%, respectively.

Keywords: economic forest; nitrogen loss; terrain; management measures

收稿日期: 2014-01-06

基金项目: 永康市杨溪水源区方山柿基地水土流失面源污染监测项目(H20122709)

作者简介: 刘 俏(1989—), 男, 山东青岛人, 硕士, 从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: liuqiao19891127@163.com

* 通信作者: 张丽萍 E-mail: lpzhang@zju.edu.cn

农用坡地土壤氮素流失,特别是硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)的流失严重影响农业生产,会直接造成农作物氮素缺乏,对农作物的生长和发育产生抑制作用,降低农作物的生产效率,进而加剧化肥使用,导致土壤退化和生产成本的增加。不仅如此,流失的氮素对水体环境也会产生负面影响,造成水体富营养化,水质降低,最终危害人体健康。因此,切实控制农用坡地氮素流失,对于提高农业生产效率和控制环境污染都具有十分重大的意义^[1-6]。

有关坡地氮素径流流失的研究很多,大多数研究者认为,降雨和径流是土壤氮素流失的动力,土壤氮素与降雨、径流相互作用过程是土壤氮素流失产生的关键所在。研究表明,坡地土壤氮素主要通过径流携带进入水体,占总流失量的 81.9%~93.4%^[7]。

坡地氮素流失的影响因素研究表明,不同的水文特征、植物覆盖度、地形坡度以及施肥状况对坡地氮素流失均存在较大影响^[8]。降雨径流是坡地氮素流失的主要载体,土壤氮素通过径流的运移作用而流失。关于植被覆盖对土壤氮素流失的控制作用存在争议较多:Sharples^[9]认为草地覆盖可以减少土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失,但不能减少 $\text{NH}_4\text{-N}$ 流失;胡远安等^[10]认为,随着植被覆盖度的增加, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的流失浓度增大;张兴昌等^[11]认为,随植被覆盖度的增加,矿质氮流失加剧。多数的研究认为土壤氮素的地表流失量随着坡度的增加而增大^[12-13]。张亚丽等^[14]通过模拟降雨试验证明,坡度的变化对土壤矿物质氮素的流失存在“临界坡度”,当坡度超过临界值时,流失量会随坡度的增加呈下降趋势。施肥是影响土壤氮素流失的另一重要因素,不论何种施肥方式,其目的都在于提高农用坡地的速效氮素含量,因而最终导致农用坡地径流氮素流失的大量增加。

红壤丘陵坡地是我国南方地区重要的土地资源类型,占我国红壤地区总面积的 28%,该区域水热资源优越,生物物种丰富,具有巨大的生产潜力^[15-16]。选择该区域进行农用坡地氮素流失分析试验研究具有

很强的实践意义。本文为了探究红壤低山丘陵区经济林坡地的氮素径流流失时间分布规律、地形坡度差异情况以及经济林下不同管理措施对氮素流失的影响,选择浙江省永康市的方山柿经济林坡地为试验区,以降雨产流所导致的土壤氮素流失为研究对象,进行了为期一年的监测研究。

1 试验材料和方法

1.1 研究区域概况

试验区选在浙江省永康市的方山柿基地,方山柿基地位于杨溪水库(永康市区饮用水源地)水源区新楼溪流域。流域面积 36.30 km²,干流长 11.5 km,河道比降达 17.22%。属亚热带季风气候,年平均降雨量为 1483 mm,年平均气温为 17.5 ℃。土壤类型为红壤。流域内拥有经济林 533.3 hm²,多在坡地种植,以方山柿为主。

1.2 试验方法

径流小区与沉砂池布设:根据试验区的地形坡度差别,分别在试验区的 3 种地形部位(坡顶、凸坡、凹坡)上设置 2 个平行径流小区。同时,在凸坡平行径流小区旁边额外布设一个林下不除草的对照径流小区,共布设 7 个径流小区(表 1、表 2),在其出口处布设沉砂池,用于收集小区内产生的径流。径流小区在 2012 年 7 月建成,规格为 20 m×5 m 标准径流小区。

采样时间:从 2012 年 9 月到 2013 年 8 月,根据

表 1 试验径流小区植被情况
Table 1 Vegetation in runoff experimental plots

径流小区编号	树种	树龄/a	郁闭度	林下草被覆盖度
1	方山柿	5~10	65%	0%
2	方山柿	5~10	65%	0%
3	方山柿	5~10	66%	0%
4	方山柿	5~10	66%	0%
5	方山柿	5~10	68%	0%
6	方山柿	5~10	68%	0%
7	方山柿	5~10	68%	75%

表 2 试验区基础数据
Table 2 Basic properties of soils in experimental plots

径流小区编号	地形位置	小区坡度/(°)	林下管理措施	土壤容重/ g·cm ⁻³	土壤 pH	土壤 TN/ g·kg ⁻¹	土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ / mg·kg ⁻¹	土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ / mg·kg ⁻¹	土壤 CEC/ cmol·kg ⁻¹
1、2	坡顶	10.22	定期除草	1.47	5.35	1.25	5.07	16.90	15.81
3、4	凹坡	18.55	定期除草	1.40	5.25	1.30	5.52	17.08	15.52
5、6	凸坡	23.47	定期除草	1.51	5.20	1.21	6.65	14.43	14.77
7	凸坡	23.47	不除草	1.51	5.20	1.21	6.65	14.43	14.77

降雨情况以及沉砂池中径流汇集情况对沉砂池中的径流进行采集,每两次取样时间间隔在一个月左右。

样品保存与测定:采集水样立即运回实验室进行冰箱冷藏保鲜,氮素指标测定均在当天进行。总氮(TN)浓度测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法:吸取定量水样于比色管,加入定量5%碱性过硫酸钾溶液,封口后用高压灭菌锅123℃消煮40 min,降温后加入定量HCl(1:9),定容,最后用石英比色皿进行双波长(220、275 nm)吸光度测定。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度测定采用靛酚蓝分光光度法:取定量过0.45 μm 滤膜的水样于比色皿中,加入定量苯酚溶液,而后加入定量次氯酸钠溶液,摇匀显色60 min,加入掩蔽剂,定容后用玻璃比色皿在625 nm波长处比色。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度测定采用紫外分光光度法:取定量过0.45 μm 滤膜的水样于比色皿中,定容后用石英比色皿进行双波长(220、275 nm)吸光度测定。

数据处理软件:试验区地形坡度计算采用CAD软件,数据处理采用Excel和DPS软件。

数据处理:本文采用的数据是2012年9月到2013年8月,12次采集水样的监测结果。由于试验区径流含沙量偏低,本文所统计的氮素流失量以径流为主,未涉及泥沙所吸附的氮素。根据监测数据,对试验区内径流氮素的时间流失规律和坡度地形流失规律进行了分析,同时对林下不同管理措施对氮素流失的影响进行了对比研究。为了时空分析的时序直观性,在水文年内氮素流失分析中,对试验区1~6号径流小区2012年9月到2013年8月的氮素流失量数据,采取了时间位移处理,按照1月到12月的顺序进行排列分析。在地形流失规律分析中,氮素累积流失量是各地形径流小区氮素流失从水文年1月开始累加计算求得的。不同林下管理措施氮素流失分析时,采用6号小区和7号小区的径流氮素浓度监测结果。

2 结果与分析

2.1 水文年内降水与氮素流失规律分析

2.1.1 水文年内降水情况

试验区位于南方红壤丘陵区,梅雨季节和台风季节是年内降水最集中的时段。根据当地2012年及2013年的降水统计,试验区水文年内2012年9月到2013年8月的降水总量为1431.5 mm,降水量的最大值出现在6月为303.0 mm,其次是8月为244.5 mm。梅雨季节(4—6月)降水总量为511.0 mm,台风季节(8—10月)降水总量为436.0 mm,两个时段降水

分别占全年降水总量的35.7%和30.5%。

2.1.2 氮素流失时间分布规律

根据水文年内连续监测的TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 月流失量(图1),发现水文年内氮素径流流失呈双峰型,从1月到6月呈上升趋势,并在6月达到峰值,6月到7月呈下降态势,7月到9月又上升,9月达到峰值,自后至年末氮素流失下降。试验区氮素(TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)流失与降雨呈明显的相关性(决定系数 $R^2>0.95$),在降雨集中的4—6月和8—10月最容易造成氮素的流失。

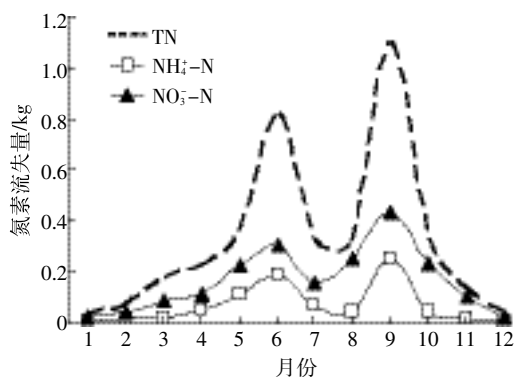


图1 水文年内氮素流失量月变化

Figure 1 Monthly changes in nitrogen losses in a hydrological year

径流小区氮素流失的两个高峰期与当地的梅雨季节和台风季节恰好对应。计算求得台风和梅雨季节TN流失量分别占全年流失的44.6%和35.8%,合计TN流失占试验区水文年内的80.4%。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的流失高峰也主要集中在梅雨季节和台风季节,其中梅雨季节 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失量分别占全年流失总量的32.2%和43.2%,台风季节的流失情况分别占全年的45.9%和39.8%。

2.2 地形坡度与氮素径流流失分析

根据试验区各地形径流小区氮素累积流失量(图2)和小区面积,求得各地形径流小区水文年内的氮素流失模数。坡顶径流小区的氮素年内流失模数最大,其次是凹坡小区,最小的是凸坡小区。坡顶小区的水文年内TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 流失模数分别为12.649、2.589、7.417 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;凹坡小区的流失模数分别为9.844、2.678、5.647 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;凸坡小区的流失模数分别为7.484、1.928、2.306 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

用Excel软件对水文年内不同地形径流小区的氮素累积流失量与时间(月份)进行不同类型方程的拟合,进而从中找出最符合水文年内实际氮素累积流失量与时间变化关系的方程类型及其决定系数 R^2 。

结果(表3)显示,试验区坡顶、凸坡和凹坡径流小区 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的年内流失量均呈幂函数增长,且决定系数 $R^2>0.967$,试验区不同氮素的径流流

失均与时间存在较强的相关关系。

2.3 林下管理措施对氮素流失的影响

为了探究林下草被覆盖对于控制坡林地径流氮素流失的效果,在试验区的凸坡处相邻位置设置了6号和7号两个对照径流小区,7号径流小区采取林下不除草的管理措施,6号小区定期除草。

根据水文年内径流氮素浓度的监测数据(表4),运用 DPS 软件对两个小区径流氮素浓度情况进行配对 t 检验,结果表明6号和7号径流小区的 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 径流浓度均达到了极显著的差异水平($P<0.01$)。根据两个小区水文年内的径流氮素浓度、径流分布及面积情况计算求得:水文年内6号小区的 TN 径流流失模数为 $8.061 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,7号为 $6.281 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;6号小区的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 年径流流失模数为 $2.886 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,7号为 $1.840 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;6号小区的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 年径流流失模数为 $2.366 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,7号为 $1.322 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。7号小区年内 TN 径流流失比6号小区减少了 22.1%;7号小区的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 径流流失比6号小区减少了 36.2%;7号小区的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流流失比6号小区减少了 44.1%。

3 讨论

3.1 红壤丘陵区氮素流失的时间分布规律分析

试验区的降水主要集中在梅雨季节和台风季节,这两个时段同时也是氮素流失的主体时间段,水文年内的绝大部分氮素流失都发生在这两个时段。这一特点符合南方红壤丘陵区经济林坡地氮素流失的一般规律,这也是南方红壤丘陵区的特有流失规律。

梅雨季节是南方红壤丘陵区的特有雨季,此时正值春夏之交,就落叶的经济林树种而言,林下草被和林分并没有形成完备的覆盖;土壤翻耕和施肥等农作活动也往往集中于这个时间,土壤处于松散状态,速效氮素含量偏高;加之这个时期的降水特性,往往容易导致土壤氮素的大量径流损失。因此,梅雨季节是南方红壤丘陵水文年内氮素流失防治的重点时期。台

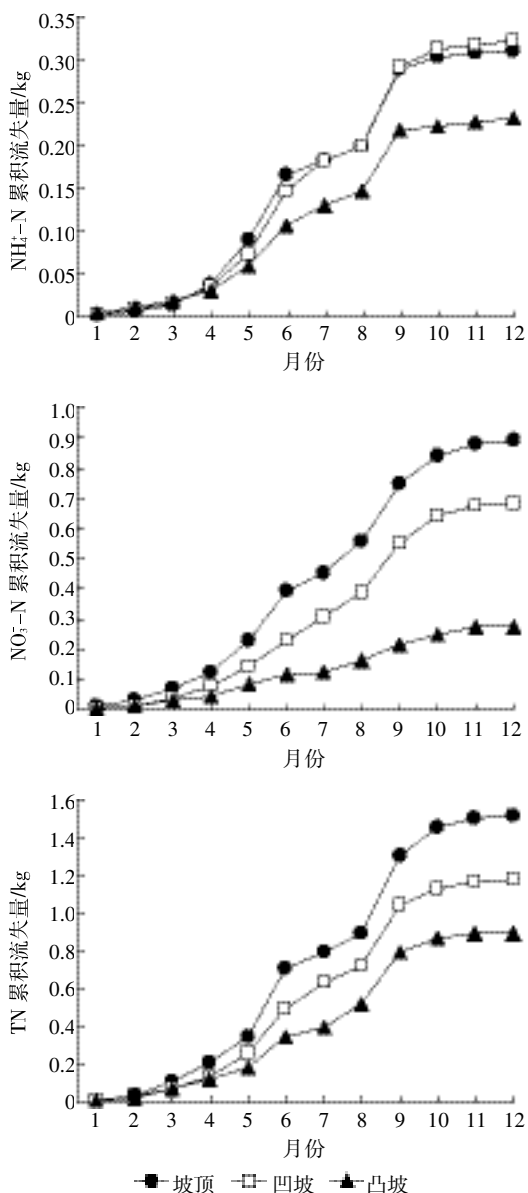


图2 一个水文年内不同地形条件氮素累积流失量

Figure 2 Cumulative losses of nitrogen in a hydrological year under different terrain conditions

表3 水文年内不同地形条件径流小区氮素累积流失量拟合方程和决定系数

Table 3 Fitting equations of nitrogen cumulative losses(Y) and time(x , month) in a hydrological year under different terrain conditions and their determination coefficients(R^2)

径流小区	TN 流失拟合方程	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 拟合方程	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 拟合方程
坡顶小区	$Y=0.011\ 3x^{2.098\ 6}, R^2=0.985$	$Y=0.011\ 3x^{1.845\ 6}, R^2=0.990$	$Y=0.002\ 3x^{2.126\ 7}, R^2=0.967$
凹坡小区	$Y=0.011\ 4x^{1.966\ 3}, R^2=0.984$	$Y=0.003\ 8x^{2.187\ 2}, R^2=0.989$	$Y=0.002\ 4x^{2.083\ 1}, R^2=0.978$
凸坡小区	$Y=0.007\ 6x^{2.02}, R^2=0.991$	$Y=0.003\ 5x^{1.844\ 1}, R^2=0.990$	$Y=0.003\ 5x^{1.780\ 6}, R^2=0.983$

注: Y 代表氮素累积流失量, x 代表时间(月份)。

风季节也是东南沿海地区降水比较集中的时段,这个季节多大雨、暴雨,十分容易导致可溶性养分的径流损失。

3.2 坡度地形对于经济林坡地氮素流失分布的影响

在相同的降水条件下,地形坡度对于土壤氮素流失的影响作用很大。坡度通过对坡面的承雨面积、降雨雨滴对地面的打击角度、坡面径流所具有的冲刷能量的影响,对土壤氮素流失有着复杂的影响。张亚丽等^[11]通过室内模拟降雨试验证明,坡面氮素流失存在“临界坡度”,其范围在 15~20°之间。但至今为止,对于临界值的判定依然存在较多争议。

本研究中,土壤 TN 流失模数关系为坡顶(10.22°)>凹坡(18.55°)>凸坡(23.47°); NO_3^- -N 流失模数关系为坡顶>凹坡>凸坡; NH_4^+ -N 流失模数关系为凹坡>坡顶>凸坡。根据 TN 和 NO_3^- -N 的年内流失模数关系,可以确定临界坡度应小于 18.55°,但不能判定临界坡度与 10.22°(坡顶)之间的关系,通过 NH_4^+ -N 流失模数关系可以判断临界值应位于 10.22°和 18.55°之间。

3.3 林下不同管理措施对于经济林坡地氮素流失的削减作用

如表 4 所示,保留林下草被的 7 号径流小区的 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 径流浓度明显小于定期林下除草的 6 号径流小区,保留草被覆盖对于经济林坡地径流小区的径流氮素浓度有着明显的削减效应。林下草被对于坡林地的氮素保持具有十分重要的价值:一方面,林下草被覆盖可以有效减少降雨对于坡面土壤的

打击,拦蓄径流,减少径流的氮素浓度,降低氮素流失量;另一方面,草被可以有效吸收林地土壤中多余的可溶性氮素,减少流失。这与李恩尧等^[17]对红壤泡桐林林下草被与氮素流失试验的研究结论一致,林下保留草被的坡林地径流小区氮素径流流失量低于除草的径流小区,林下草被可以有效减少坡林地的氮素流失。

4 结论

试验区内的氮素流失呈明显的季节性特征,其流失量与降水的年内分布关系密切,降水集中的梅雨和台风季节是氮素流失最突出的时期,两个季节 TN 流失量占一个水文年内的 80.3%, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 流失量也分别占到全年的 78.2%和 83.0%。这对于经济林固持土壤养分具有很大的借鉴价值。选择合理的施肥时间不仅可以有效补充土壤的氮素含量,还可以有效地减少氮素流失所造成的面源污染问题。

坡顶、凸坡和凹坡径流小区的氮素流失符合养分流失的“临界坡度”规律,临界坡度在坡顶(10.22°)与凹坡(18.55°)之间。坡顶小区的径流 TN 流失模数最大为 $12.649 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其次是凹坡小区为 $9.844 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,流失模数最小的是凸坡小区 $7.484 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; NH_4^+ -N 流失模数为坡顶 $2.589 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凹坡 $2.678 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凸坡为 $1.928 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; NO_3^- -N 的流失模数为坡顶 $7.417 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凹坡为 $5.647 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,凸坡为 $2.306 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。TN、 NH_4^+ -N 和

表 4 林下不同管理措施径流小区径流氮素浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 4 Nitrogen concentrations in runoff under different forest managements($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

采样时间/月	6 号小区(林下除草)			7 号小区(林下不除草)		
	TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N
1	0.940	0.335	0.243	0.791	0.220	0.156
2	0.947	0.408	0.261	0.572	0.247	0.146
3	0.481	0.239	0.147	0.453	0.126	0.108
4	0.508	0.256	0.152	0.475	0.238	0.123
5	0.307	0.151	0.086	0.282	0.089	0.056
6	0.376	0.163	0.109	0.234	0.124	0.087
7	0.695	0.361	0.247	0.596	0.325	0.145
8	0.678	0.395	0.209	0.665	0.267	0.132
9	1.760	0.813	0.579	1.453	0.615	0.432
10	0.895	0.325	0.426	0.604	0.163	0.317
11	0.957	0.419	0.364	0.735	0.256	0.221
12	0.608	0.363	0.185	0.566	0.251	0.134
算数平均	0.762	0.352	0.251	0.618	0.243	0.171
标准差	0.388	0.171	0.143	0.310	0.136	0.106

NO_3^- -N 的年内流失趋势均呈幂函数型增长。

有草被覆盖的 7 号径流小区和没有草被覆盖的 6 号径流小区的 TN 、 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 流失存在明显差异,7 号小区的 TN 、 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 的径流浓度均小于 6 号小区。7 号小区水文年内 TN 径流流失比 6 号减少了 22.1%; NO_3^- -N 径流流失比 6 号减少了 36.2%; NH_4^+ -N 的径流流失比 6 号减少了 44.1%。草被覆盖对于经济林坡地在减少氮素的径流流失上具有明显效果。

参考文献:

- [1] 杜 军, 杨培岭, 李云开, 等. 不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 66-74.
DU Jun, YANG Pei-Ling, LI Yun-kai, et al. Effect of different irrigation seasons on the transport of N in different types' farmlands and the agricultural non-point pollution production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 66-74.
- [2] 于 冲, 陈淑峰, 吴文良, 等. 农业驱动的地下水硝态氮污染研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(29): 264-270.
YU Chong, CHEN Shu-feng, WU Wen-liang, et al. Research advancement in nitric nitrogen pollution of ground water by agricultural activities[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(29): 264-270.
- [3] 李正兆, 高海鹰, 张 奇. 抚仙湖流域典型农田区地下水硝态氮污染及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 286-290.
LI Zheng-zhao, GAO Hai-ying, ZHANG Qi, et al. Nitrate pollution of groundwater and the affecting factors in farmlands of Fuxianhu Lake catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 286-290.
- [4] 侯彦林, 周永娟, 李红英, 等. 中国农田氮面源污染研究: I 污染类型区划和分省污染现状分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1271-1276.
HOU Yan-lin, ZHOU Yong-juan, LI Hong-ying, et al. Nitrogen non-point field pollution in China: I Regionalization of pollution types and pollution analysis in different provinces[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1271-1276.
- [5] 侯彦林, 李红英, 周永娟, 等. 中国农田氮面源污染研究: II 污染评价指标体系的初步制定[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1277-1282.
HOU Yan-lin, LI Hong-ying, ZHOU Yong-juan, et al. Nitrogen non-point field pollution in China: II Establishment of index system for evaluation of pollution degree[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1277-1282.
- [6] 唐 浩, 邱卫国, 周 翊, 等. 稻麦轮作条件下氮素流失特性及控制对策研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(6): 64-68.
TANG Hao, QIU Wei-guo, ZHOU Xuan. Nitrogen loss characteristics and its control measures under the conditions of rice-wheat rotation[J]. *Yellow River*, 2010, 32(6): 64-68.
- [7] 袁东海, 王兆寿, 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.
YUAN Dong-hai, WANG Zhao-qian, CHEN Xin, et al. Characteristics of nitrogen loss from sloping field in red soil area under different cultivation practices[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 863-866.
- [8] 詹 议. 降雨对农业面源污染氮素去向的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 4.
ZHAN Yi. Nitrogen loss in the rainfall of source pollution[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 4.
- [9] Sharpley A N. Environmental impact of agricultural nitrogen and phosphorus use[J]. *Agric Food Chem*, 1987, 35: 812-817.
- [10] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 108-112.
HU Yuan-an, CHENG Sheng-tong, JIA Hai-feng. Regular pattern of non-point source pollutants losses in Luxi Watershed[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2004, 25(6): 108-112.
- [11] 张兴昌, 邵明安. 水蚀条件下不同土壤氮素和有机质流失规律[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 231-234.
ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an. Soil nitrogen and organic matter losses under water erosion[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 231-234.
- [12] 高 扬, 朱 波, 周 培, 等. 紫色土坡地氮素和磷素非点源输出的人工模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1371-1376.
GAO Yang, ZHU Bo, ZHOU Pei, et al. Non-point source export of nitrogen and phosphorus from slope crop of purple soil with simulated rainfall method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1371-1376.
- [13] 刘 泉, 李占斌, 李 鹏, 等. 模拟降雨条件下坡地氮素流失特征试验分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 6-10.
LIU Quan, LI Zhan-bin, LI Peng, et al. Analysis of the nitrogen loss character on the slopes under simulating rainfall condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 6-10.
- [14] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 等. 坡度对坡面土壤矿质氮素水蚀流失负荷的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 14-17.
ZHANG Ya-li, LI Huai-en, ZHANG Xing-chang, et al. Soil mineral nitrogen loss in surface runoff and sediment as affected by slope gradient on loess slope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 14-17.
- [15] 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): 1645-1649.
HUANG He-xian, XIE Xiao-li, WANG Kai-rong, et al. Surface runoff and nutrient loss from red-soil slope-lands under different land use types[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1645-1649.
- [16] 鲁向晖. 红壤坡地开展保护性耕作的前景及对策分析[J]. 农机化研究, 2013, 35(5): 232-236.
LU Xiang-hui. Prospects and countermeasures for conservation tillage in red soil slopes[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(5): 232-236.
- [17] 李恩尧, 彭佩钦, 吴建平, 等. 红壤坡地泡桐林地地表径流和养分流失研究[J]. 湖南林业科技, 2011, 38(2): 21-25.
LI En-yao, PENG Pei-qin, WU Jian-ping, et al. Study on surface runoff and nutrient loss in paulownia forest on red soil slope-land[J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2011, 38(2): 21-25.