

丹江口库区土壤氮磷养分流失特征

姚娜¹, 余冰², 蔡崇法², 王天巍², 朱惠蓉³

(1. 湖北省电力勘测设计院, 湖北 武汉 430024; 2. 华中农业大学 水土保持研究中心, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 秭归县园林绿化管理所, 江西 秭归 443699)

摘要: [目的] 研究丹江口库区土壤的水土流失和非点源污染物氮磷流失的特点, 为农业非点源污染模型的建立提供理论依据。[方法] 通过室内人工模拟降雨试验, 研究了坡度和施肥等处理对产流产沙、氮磷养分(硝态氮、铵态氮、总氮、有效磷和总磷)流失特点的影响。[结果] (1) 随着坡度的增加, 平均入渗率和初始产流时间呈减小趋势, 而径流总量和泥沙总量呈增加趋势。(2) 相同施肥处理下, 随着坡度的增加, 泥沙中硝态氮、总氮、有效磷和总磷的流失浓度呈减小趋势, 铵态氮流失浓度在不施氮肥条件下呈减小趋势, 而在施氮肥处理下呈增加趋势。(3) 在相同坡度条件下, 随降雨时间推移, 总氮浓度呈先减小后趋于稳定的趋势; 铵态氮浓度随施肥处理的变化均呈现出波浪形变化; 在施氮肥时, 径流中硝态氮的浓度随着时间的推移, 呈逐渐减小并趋于平缓的趋势, 而在不施氮肥时几乎无变化。[结论] 在不同施肥措施和坡度条件下, 硝态氮主要随径流而流失, 为随泥沙流失的 8~11 倍; 铵态氮主要是随径流泥沙而流失, 为随径流流失的 1~17 倍; 总氮则是随径流和径流泥沙共同流失; 有效磷和总磷都是以泥沙结合态流失为主, 分别为随径流流失的 1 000~6 200 和 1~3 倍。

关键词: 紫色土; 产流产沙; 坡度; 施肥处理; 氮磷流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0097-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 姚娜, 余冰, 蔡崇法, 等. 丹江口库区土壤氮磷养分流失特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 097-103. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.018; Yao Na, Yu Bing, Cai Chongfa, et al. Characteristic of soil nitrogen and phosphorus loss in Danjiangkou reservoir area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 097-103. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.018

Characteristic of Soil Nitrogen and Phosphorus Loss in Danjiangkou Reservoir Area

YAO Na¹, YU Bing², CAI Chongfa², WANG Tianwei², ZHU Huirong³

(1. Hubei Electric Power Survey and Design Institute, Wuhan, Hubei 430024, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Soil and Water Conservation Research Centre, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 3. Zigui County Afforestation Management, Zigui, Jiangxi 443699, China)

Abstract: [Objective] We aimed to study the characteristics of soil erosion and non-point pollutants-nitrogen and phosphorus in Danjiangkou reservoir area, and to provide theoretical basis for the establishment of agricultural non point source pollution model. [Methods] Through rainfall simulation experiments, we analyzed factors affecting soil and water loss and soil nutrients, including total nitrogen(TN), NH₄-N, NO₃-N, total phosphorus(TP), available phosphorus(AP), from purple soil, such as slope gradient and fertilizer measures. [Results] (1) The average infiltration rate and the initial runoff time decreased, however the total amount of runoff and sediment increased with the creasing slope. (2) The concentration of TN, NO₃-N, TP and AP in sediments decreased with the increasing slope when they were under the same treatment. The concentration of NH₄-N in runoff decreased under the condition of no nitrogen, and increased under nitrogen treatment. (3) The loss of TN was stable after the first reducing trend, the loss of NH₄-N under various

收稿日期: 2016-06-29

修回日期: 2016-07-22

资助项目: 中央高校基本科研业务专项资金资助项目“侵蚀—沉积过程对土壤多样性分布格局的影响”(2662016PY050)

第一作者: 姚娜(1981—), 女(汉族), 浙江省舟山市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持工作。E-mail: yu20008bing@webmail.hzau.edu.cn.

fertilizer treatments showed a wave-like change, the loss of $\text{NO}_3\text{-N}$ gradually decreased and flatten out at last under nitrogen treatment, but had almost no change under the condition of no nitrogen along with the rainfall time under the condition of the same grade. [Conclusion] The $\text{NO}_3\text{-N}$ was mainly lost with runoff, which was 8 to 11 times of the loss with sediment. $\text{NH}_4\text{-N}$ loss was mainly caused by the sediment erosion, which was 1 to 17 of times the loss caused by runoff erosion. The total loss of nitrogen was summary of the loss in runoff and sediment. The main way of the loss of AP and TP were lost by sediment, which were 1 000 to 6 200 times and 1 to 3 times of that by runoff erosion, respectively.

Keywords: purple soil; sediment and runoff; slope gradient; fertilizer measure; loss of nitrogen and phosphorus

1 材料与方 法

近年来,随着耕地利用强度加大、化肥施用量增加,导致大量养分在土壤中积累,因此由农业活动引起的面源污染问题逐渐受到关注^[1-2]。坡耕地土壤养分主要通过两种途径流失,一是溶解于地表径流和吸附、结合在土壤颗粒表面养分的横向迁移,二是随水分下渗形成的纵向迁移,即养分淋失。

近年来国内外对土壤养分淋失,尤其是氮、磷的淋失受到广泛关注。Cookson W R 等^[3]和 Bergström L F 等^[4]较多国内外研究者采用同位素示踪等技术对氮的淋失进行研究,对氮随地表径流及泥沙流失的研究较少。还有一些研究者针对中国旱地进行了降水条件和灌溉水对土壤氮素淋失的影响^[5-6]以及稻土的氮素淋失^[7-9]的研究,得出土壤的氮素在各条件下的淋失和随径流的流失,但通常并未把养分随泥沙流失考虑在内,是全面评估农田养分流失对面源污染的影响受到局限。

紫色土是发育于亚热带和热带气候条件下,由砂页岩风化形成的 A-C 型初育土,土体较薄,是一种侵蚀型的高生产力岩性土^[10],也是丹江口库区的主要

耕作土壤之一。目前,紫色土侵蚀面积之广和侵蚀强度之大,仅次于中国北方的黄土,强烈的水土流失不仅对区域土壤质量产生巨大的威胁,而且对库区水体环境造成了严重的影响。同时,伴随水土流失而携带的泥沙、氮磷、有机质等污染物使库区内的水质进一步恶化。因此,深入研究丹江口库区紫色土的土壤及养分流失规律,把土壤侵蚀及随之发生的养分流失控制在允许的范围内,是保护水库的水质,最终实现丹江口水库达到南水北调中线工程水源地水质要求的关键。

本试验拟利用人工降雨装置及可收集地表的模拟径流小区,研究不同坡度和施肥条件对土壤侵蚀和土壤养分流失途径的影响,其结果对完整认识紫色土养分损失途径及影响因素、农业面源污染治理技术创制具有重要科学价值与实践意义。

1.1 供试土壤

供试土壤采自湖北省丹江口市黑庙河流域,试验选择的是红砂岩发育的紫色土,土地利用方式为耕地,采集土壤为耕层土壤(0—10 cm),质地为粉黏土。土壤理化性质采用常规方法^[11],表 1 为供试土壤的基本性质。

表 1 供试土壤基本性质

项目	pH 值	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
含量	7.4	11.21	0.70	0.47	23.02	6.50	0.83	7.03	140.2

1.2 试验方法

为研究降雨条件下施肥方式和坡度对紫色土养分流失的影响,本研究在华中农业大学水土保持研究中心降雨大厅内进行了土槽坡面的人工模拟降雨试验。模拟降雨器采用美国 SPRAO 锥形喷头,喷头距地面垂直高度为 4.75 m,通过压力阀和喷头组合控制雨强和粒径分布,降雨雨滴达到的终点速度满足天然降雨特性,降雨均匀度为 95%。

试验所用土槽为自行设计的钢槽,其尺寸规格为:45 cm×30 cm×15 cm,坡度可在 0°~30°变化。

在土槽的径流出处安装了 V 形钢槽收集径流,其他 3 面额外则更加 8.5 cm 高钢板,以预防雨滴打击致使槽内的物质溅出槽外。土槽底板均匀打孔,便于土壤水自由渗透。

根据丹江口库区降雨情况及地形地貌状况,本研究设计雨强为 0.5 mm/min,降雨时长 90 min,设计坡度为 5°,10°,20°;分别对供试土壤进行 4 中不同的施肥处理(不施肥 N_0P_0 ;施氮肥 N_1P_0 :纯 $\text{N}150 \text{ kg}/\text{hm}^2$;施磷肥 N_0P_1 : P_2O_5 90 kg/hm^2 ;施氮磷肥 N_1P_1 :纯 $\text{N}150$ 和 P_2O_5 90 kg/hm^2),肥料为硝酸铵和过磷酸钙,施肥

方式是在槽中先铺 14 cm 深土将一定的肥料加水溶解至 1 L,均匀喷洒在 1 cm 深的土上,充分混合后铺在槽中,夯实并保持土面平整。每个处理做 3 场平行。降雨过程中,产流后每 10 min 收集 1 次径流,并测量采集的径流体积,收集的样品静置 3 h 后,取上清液用于测定径流水相中氮磷含量。同时收集径流泥沙,风干称重,测定径流泥沙中氮磷含量。径流水样中总氮和总磷采用碱性过硫酸钾—紫外分光光度法测定,硝态氮、铵态氮和有效磷采用流动注射分析仪测定;径流泥沙中的总氮、总磷、硝态氮和铵态氮采用流动注射分析仪测定,有效磷采用碳酸氢钠浸提法测定。

1.3 数据分析

采用 Excel, SPSS 13.0 软件进行数据分析,文中坡度与施肥处理对径流泥沙中氮磷流失的影响采用 SPSS 13.0 软件进行双因素方差分析,运用 LSD 方差检验,显著水平 $p < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同坡度和施肥条件下土壤的产流特征

坡度影响土壤侵蚀过程的主要切入点是降雨入渗有时间和径流速度。张小娜等^[12]的研究得出,在其他影响侵蚀的因子一致的情况下,坡度增大,重力在顺坡方向的分力增大,沿垂直坡面方向的分力减小,从而导致径流入渗总量减小、地面径流总量增加,同时也加快了径流的流速。

从表 2 可以看出,坡度是影响平均入渗率、初始产流时间、径流总量及泥沙总量的最主要因素。

表 2 不同坡度和施肥条件下土壤的产流特征

坡度/ (°)	施肥 处理	平均入渗率/ (mm · min ⁻¹)	初始产流 时间/min	径流总 量/ml	泥沙总 量/g
5	N ₀ P ₀	0.224	6.97	3 060	48.56
	N ₁ P ₀	0.245	8.43	2 780	51.89
	N ₀ P ₁	0.222	11.87	2 905	45.27
	N ₁ P ₁	0.263	7.67	2 605	46.95
10	N ₀ P ₀	0.185	6.78	3 405	59.87
	N ₁ P ₀	0.196	6.45	3 296	62.32
	N ₀ P ₁	0.204	8.88	3 115	52.67
	N ₁ P ₁	0.226	6.03	2 975	54.94
20	N ₀ P ₀	0.120	5.17	4 020	78.94
	N ₁ P ₀	0.126	5.82	3 920	81.42
	N ₀ P ₁	0.145	4.30	3 780	64.12
	N ₁ P ₁	0.178	4.60	3 400	64.85

注: N₀P₀ 为不施肥; N₁P₀ 为施氮肥; N₀P₁ 为施磷肥; N₁P₁ 为氮肥和磷肥同时施。下同。

随着坡度的增加,平均入渗率和初始产流时间呈减小趋势,径流总量和泥沙总量呈增加趋势,是因为在降雨强度、土壤母质、土壤前期含水量等要素一致时,坡度越大,降雨入渗机会越少,降雨入渗损失越小,雨滴在坡面迅速汇集,导致径流量增大,初始产流时间提前,同时径流沿坡面方向的运动速度加快,径流动能增强,是坡面径流侵蚀能力增强,因此坡面泥沙流失越多,此结果与耿晓东等^[13]的研究结论一致。由表也可看出不同的施肥处理对各指标的影响并不明显,这与 Bhatnagar 等^[14]的结论一致。这可能是因为施肥只是增加了土壤的养分含量,并不影响坡面的产流产沙过程。

2.2 坡度及施肥处理对泥沙中氮磷流失的影响

由表 3 可知,相同施肥处理下,随着坡度的增加,泥沙中硝态氮、总氮、有效磷和总磷的流失浓度呈减小趋势,铵态氮流失浓度在不施氮肥条件下也随坡度增加而呈现减小的趋势,这可能是因为坡度较小时,坡面径流量相对较小,表土流失量占总泥沙量比例较大,表土为细小颗粒,对土壤养分的吸附能力强,因此在坡度小时泥沙养分流失浓度大,随着坡度的增加,坡面径流量增加,泥沙流失量也随之增加,细颗粒含量明显减小,因此泥沙中养分含量减小;而在施氮肥处理下,铵态氮流失浓度随坡度是增加而增加,这可能是因为铵态氮主要易吸附在土壤颗粒表面,随着坡度的增加,泥沙流失量增加,铵态氮流失浓度也呈增加趋势。

表 3 泥沙中氮磷流失特征 mg/kg

坡度/ (°)	施肥 措施	氮素流失浓度			磷素流失浓度	
		硝态氮	铵态氮	总氮	有效磷	总磷
5	N ₀ P ₀	12.05 ^{Ba}	2.99 ^{Ba}	1101.0 ^{Ba}	14.51 ^{Bb}	757.1 ^{Aa}
	N ₁ P ₀	42.72 ^{Aa}	19.85 ^{Aa}	1810.4 ^{Aa}	11.58 ^{Bc}	745.5 ^{Aa}
	N ₀ P ₁	11.28 ^{Ba}	2.58 ^{Ba}	1098.6 ^{Ba}	54.14 ^{Ac}	672.1 ^{Aa}
	N ₁ P ₁	41.35 ^{Aa}	20.96 ^{Ab}	1970.5 ^{Aa}	53.17 ^{Ab}	678.4 ^{Aa}
10	N ₀ P ₀	9.22 ^{Bb}	2.66 ^{Bb}	1069.9 ^{Bb}	11.55 ^{Bb}	641.6 ^{Ab}
	N ₁ P ₀	33.92 ^{Ab}	20.83 ^{Aa}	1740.8 ^{Ab}	11.26 ^{Bb}	682.1 ^{Ab}
	N ₀ P ₁	9.56 ^{Bb}	2.39 ^{Ba}	1093.2 ^{Ba}	44.95 ^{Ab}	615.4 ^{Ab}
	N ₁ P ₁	34.61 ^{Ab}	23.98 ^{Ab}	1710.1 ^{Ab}	43.93 ^{Ab}	663.1 ^{Ab}
20	N ₀ P ₀	7.82 ^{Bc}	2.45 ^{Bc}	975.4 ^{Bc}	10.43 ^{Ba}	508.0 ^{Ac}
	N ₁ P ₀	27.07 ^{Ac}	20.85 ^{Aa}	1570.1 ^{Ac}	10.38 ^{Ba}	518.4 ^{Ac}
	N ₀ P ₁	8.85 ^{Bc}	2.30 ^{Ba}	964.1 ^{Bb}	41.10 ^{Aa}	598.0 ^{Ac}
	N ₁ P ₁	28.57 ^{Ac}	25.84 ^{Aa}	1684.9 ^{Ab}	43.04 ^{Aa}	544.1 ^{Ac}

注:对试验结果采用 LSD 双因素方差分析检验,检验水平 $p < 0.05$; 不同大写字母代表相同坡度不同施肥处理间的差异显著;小写字母表示相同施肥处理不同坡度间的检验结果差异显著。

在相同坡度时,在施氮肥处理下,随泥沙流失的铵态氮、硝态氮和总氮流失浓度相应提高,尤其是铵

态氮流失浓度,为不施氮肥处理下的 10 倍,较不施氮肥处理下,磷素流失浓度相对减少;在施磷肥处理下,随泥沙流失的有效磷和总磷流失浓度较不施磷肥处理下的 4~5 倍,而对泥沙中氮素流失浓度的影响不太一致,较不施磷肥处理下,硝态氮流失浓度有小幅减少,铵态氮和总氮流失浓度则在不施氮肥时呈减小趋势,施氮肥时呈增加趋势,这种现象可能是因为硝态氮与磷之间存在竞争吸附的原因。

2.3 坡度及施肥处理对径流中氮磷流失的影响

径流既是土壤养分流失的动能,又是流失养分的载体,它既能悬浮有机质,又能溶解矿化的土壤养分。坡面土壤侵蚀过程中,雨滴和径流通过对表土的扰动表层使得土壤中的可溶性养分溶解于径流中,最终随径流迁移出土壤表层。

的径流量小,主要作用于土壤表层,而这一层的土壤养分含量较高,因此在产流初期径流中总氮浓度较高。而随着降雨的持续,径流量养分浓度增加,径流对土壤中养分的浸提能力提高,但流量的增加对产生了稀释的作用更明显,因此总氮的流失浓度减小,并趋于稳定。在相同坡度时, N_1P_0 处理下,径流中总氮流失浓度最高,其他处理间没有明显差别。从图 2 中可以看出铵态氮浓度随坡度和施肥处理的变化均呈现出波浪形变化,但总体上呈现出产流初期浓度高,并随着时间的推移而减小的趋势。这可能是因为铵态氮主要是吸附于土壤颗粒表明面,在解吸进入径流的过程中影响因素较多,因此变化比较复杂。

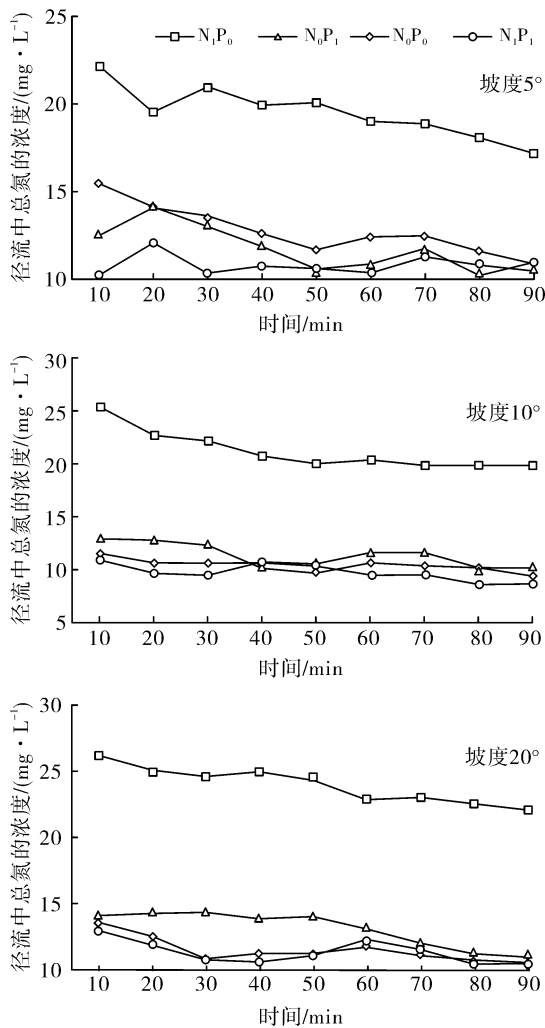


图 1 径流中总氮浓度随降雨时间变化

由图 1 可以看出,在相同施肥处理下,坡度对径流中总氮流失浓度的影响不大,产流初期径流中总氮浓度较高,随着时间的推移,径流中总氮流失浓度逐渐减小并趋于稳定,这可能是因为产流初期

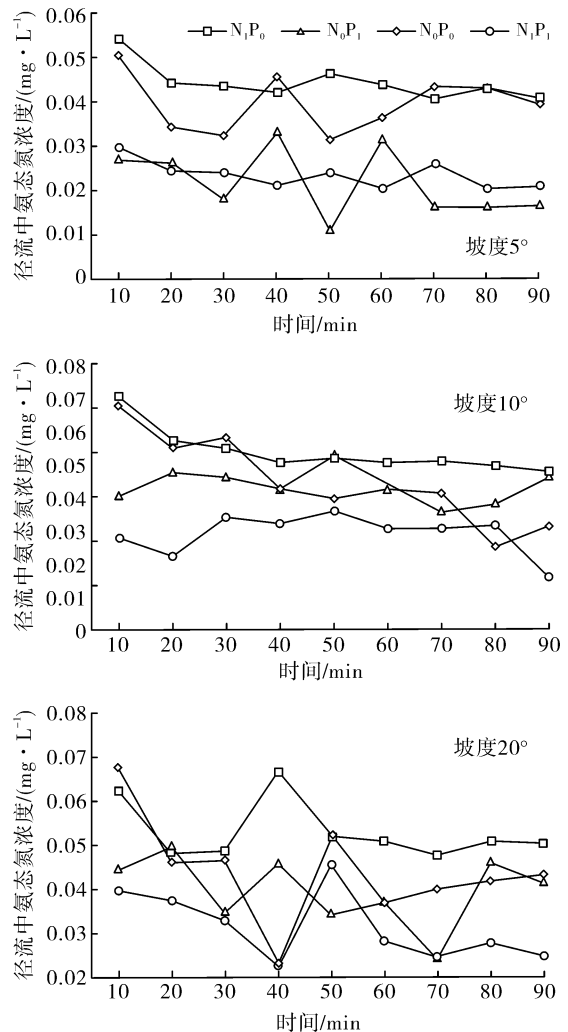


图 2 径流中铵态氮浓度随降雨时间变化

由图 3 可以看出,径流中硝态氮浓度随坡度的变化不明显,而随施肥处理的变化,在施氮肥时,径流中硝态氮的浓度在初期较高,随着时间的推移,逐渐减小并趋于平缓,其中原因可能是与径流中总氮浓度变

化的原因一样;在不施氮肥时,径流中硝态氮浓度随时间的推移几乎无变化;4种施肥处理条件下径流中硝态氮浓度大小顺序为: $N_1P_1 > N_1P_0 > N_0P_1 > N_0P_0$ 。

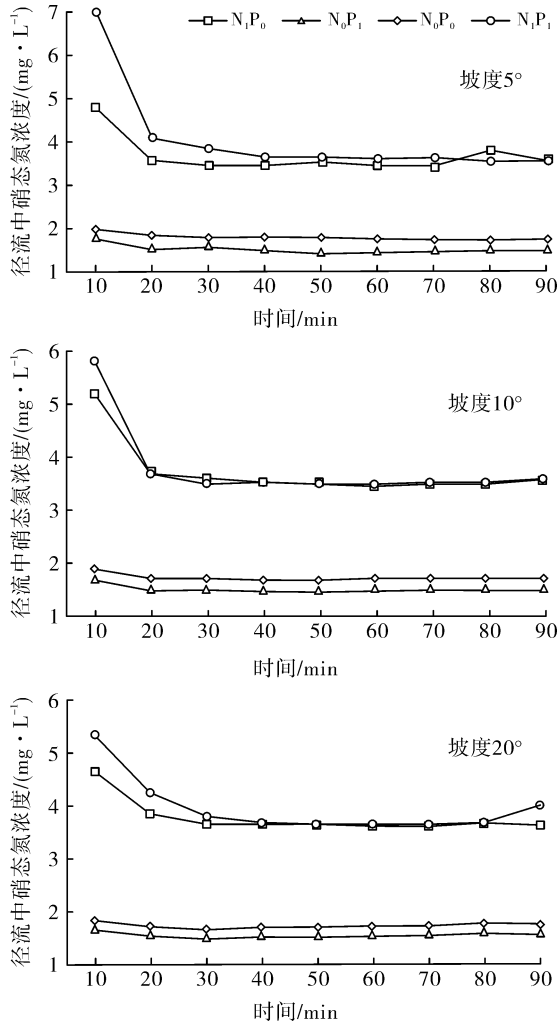


图 3 径流中硝态氮浓度随降雨时间变化

由图 4 可以看出,在不同坡度下,径流中的有效磷浓度变化的规律相似。在不施肥和单施氮肥措施下,土壤中的有效磷的浓度有限,径流产生后,将土壤中的有效磷浸提释放,随径流而流失,所以径流中有效磷的浓度较低且曲线波动较大。但总体上看,径流中的有效磷的浓度随时间的推移逐渐减少。在单施氮肥措施下,径流中有效磷的浓度大于不施肥措施下的浓度。单施磷肥和氮磷混施措施下的径流中有效磷的浓度随时间推移的规律一致,即降雨初期,径流中有效磷的浓度较大,然后逐渐减少,在开始 40 min 时,浓度减小的幅度较大,然后逐渐趋于稳定。这是因为降雨初期,因施用磷肥土壤表面的有效磷的浓度较大,径流解吸出来的有效磷较多,随着降雨的持续,表层土壤的有效磷浓度逐渐降低,被浸提出的量也逐

渐降低。单施磷肥措施下的径流中有效磷的浓度大于氮磷混施下的浓度。

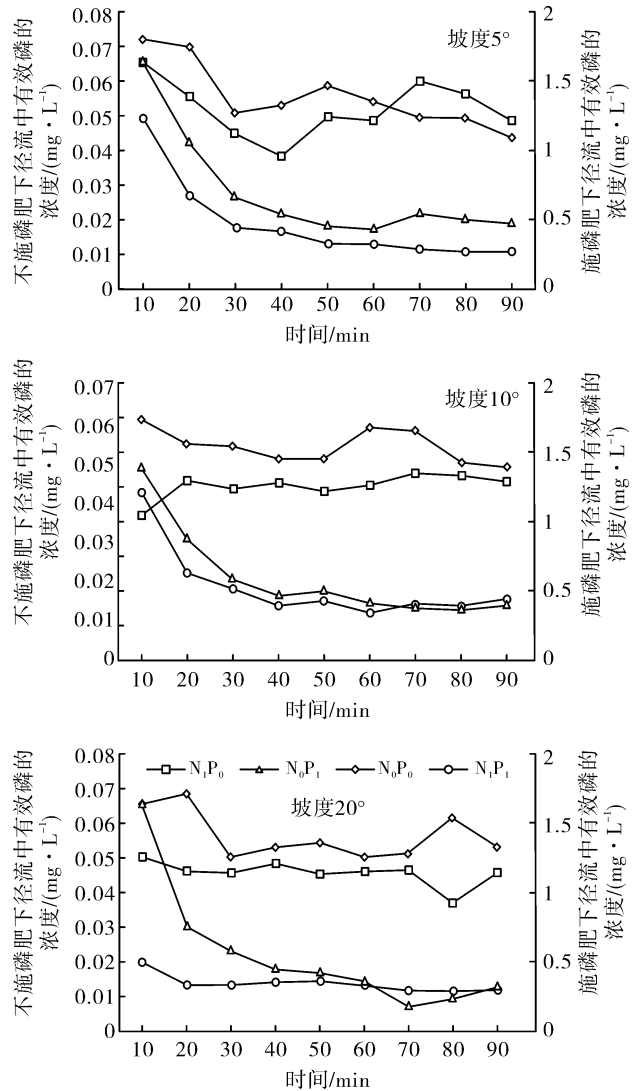


图 4 径流中有效磷浓度随降雨时间变化

由图 5 可知,在不同坡度下,径流中总磷的浓度在降雨过程中的迁移规律一致,而且不同的施肥措施间的规律也相近,即在降雨初期总磷的浓度较高,随着降雨时间的推移,浓度逐渐减小,在 30~40 min 后,变化趋于稳定,直至降雨结束。

在降雨开始时,4种施肥措施下的径流中的总磷的浓度有所不同,浓度大小顺序为:单施磷肥>氮磷混施>单施氮肥和不施肥。4者在降雨持续 40 min 后,浓度趋于一致。这说明施肥措施对径流中总磷浓度的影响,只在降雨的初期,但是这段时间有是总磷流失的主要时段。

2.4 泥沙与径流中氮磷含量的比较

由表 4 可以看出,在 4 种施肥措施下,3 种形态的氮素的主要流失方式不变,即硝态氮主要随径流而

流失,铵态氮主要是随径流泥沙而流失,总氮则是径流和径流泥沙共同流失。

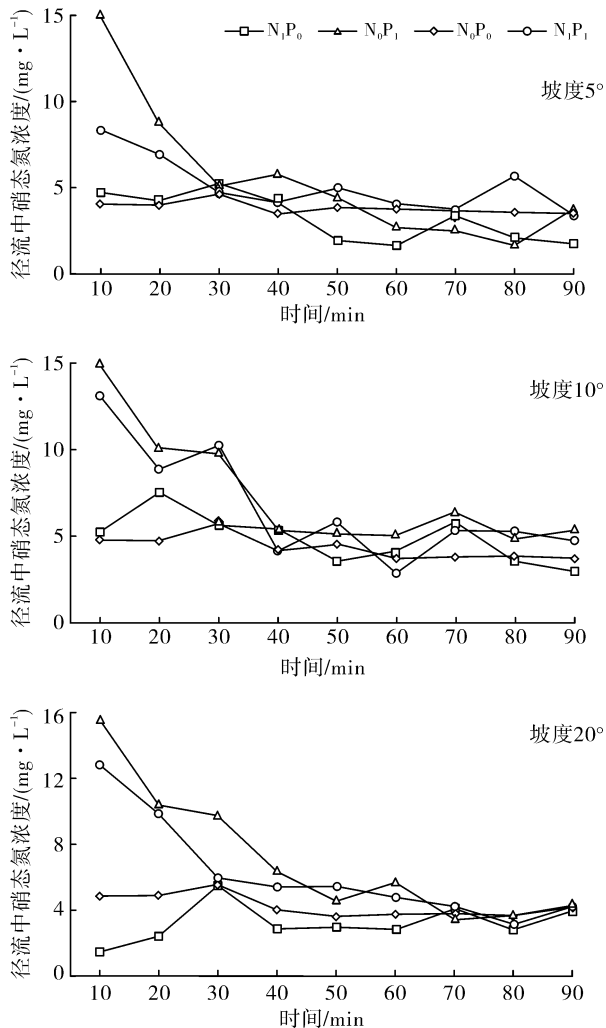


图 5 径流中总磷浓度随降雨时间变化

不同的施肥措施下,3者在泥沙和径流中的流失量比值有所不同。施氮肥(单施氮肥和氮磷混施)与

不施氮肥(不施肥和单施磷肥)相比,总氮在泥沙与径流中流失量的比值变化不大,而硝态氮和铵态氮均有增大,其中硝态氮增大了76%,铵态氮增大了5~14倍。施磷肥(单施磷肥和氮磷混施)与不施磷肥(不施肥和单施氮肥)相比,硝态氮和总氮在泥沙和径流中的流失量的比值几乎不变,铵态氮无规律。由此可知,施肥对总氮在径流和泥沙中流失的量的比例无影响。而施氮肥使硝态氮和铵态氮随径流流失的量所占的比例减小,即施肥对径流氮素流失量的影响小于其对泥沙中氮素流失量的影响。施磷肥对硝态氮在径流和泥沙中的流失量的影响效果相同,而对铵态氮的影响较复杂,有待进一步研究。

由表5得出,4种施肥措施对2种形态的磷素的主要流失方式不变,即有效磷和总磷都是以泥沙结合态流失为主。但是不同的施肥措施对两种磷素在泥沙和径流中的流失量的比值有一定的影响。施磷肥(单施磷肥和氮磷混施)和不施磷肥(不施肥和单施氮肥)相比,有效磷和总磷在泥沙和径流中的流失量的比值都减小,两者都减小为原来的1/2。说明施磷肥对2种形态的磷素的流失量在径流和泥沙中均有增大,但对径流流失量的影响要大于泥沙中流失量的影响。施氮肥(单施氮肥和氮磷混施)与不施氮肥(不施肥和单施磷肥)相比,有效磷和总磷在泥沙与径流中流失量的比值均有增大,即施氮肥更有效得提高了径流泥沙中的有效磷和总磷的流失。

3 结论

(1) 坡度是影响平均入渗率、初始产流时间、径流总量及泥沙总量的最主要因素。随着坡度的增加,平均入渗率和初始产流时间呈减小趋势,径流总量和泥沙总量呈增加趋势。

表 4 丹江上库区径流与泥沙氮含量比较

坡度/(°)	施肥措施	径流中氮素含量/(mg·m ⁻²)			泥沙中氮素含量/(mg·m ⁻²)			泥沙与径流中氮素比值		
		NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	TN	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	TN	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	TN
5	N ₀ P ₀	36.81	0.79	259.7	4.33	1.08	396.0	0.12	1.88	1.53
	N ₁ P ₀	75.88	0.97	453.3	16.42	7.69	695.9	0.22	11.68	1.54
	N ₀ P ₁	34.69	0.80	269.9	3.78	0.86	400.4	0.11	1.48	1.48
	N ₁ P ₁	62.75	0.58	346.7	14.38	7.29	585.3	0.23	17.11	1.69
10	N ₀ P ₀	41.09	1.03	276.6	4.09	1.18	474.5	0.10	2.01	1.72
	N ₁ P ₀	93.05	1.25	460.7	15.66	9.62	803.6	0.17	13.26	1.74
	N ₀ P ₁	37.66	1.06	279.5	3.73	0.93	487.5	0.09	1.52	1.74
	N ₁ P ₁	86.45	0.71	361.9	14.07	9.76	615.9	0.16	20.59	1.70
20	N ₀ P ₀	50.77	1.25	295.4	4.57	1.43	570.4	0.09	2.21	1.93
	N ₁ P ₀	109.38	1.45	520.4	16.32	12.57	946.9	0.15	15.41	1.82
	N ₀ P ₁	45.14	1.26	309.5	4.27	1.20	516.8	0.09	1.56	1.67
	N ₁ P ₁	97.77	0.83	401.6	13.73	12.41	709.4	0.14	24.29	1.77

表 5 丹江口库区径流与泥沙磷含量比较

坡度/(°)	施肥措施	径流中氮素含量/(mg·m ⁻²)		泥沙中氮素含量/(mg·m ⁻²)		泥沙与径流中磷素比值	
		AP	TP	AP	TP	AP	TP
5	N ₀ P ₀	0.001	95.4	5.22	272.3	1 305.2	2.85
	N ₁ P ₀	0.001	87.7	4.45	286.5	1 112.5	3.27
	N ₀ P ₁	0.021	173.1	18.15	225.4	1 815.4	1.30
	N ₁ P ₁	0.012	136.7	18.49	235.9	2 054.4	1.73
10	N ₀ P ₀	0.001	117.5	5.12	284.5	5 121.0	2.42
	N ₁ P ₀	0.001	117.3	5.20	314.9	5 198.0	2.68
	N ₀ P ₁	0.019	205.2	17.54	240.1	922.9	1.17
	N ₁ P ₁	0.015	176.3	17.88	269.9	1 191.9	1.53
20	N ₀ P ₀	0.002	142.6	6.09	297.1	3 048.5	2.08
	N ₁ P ₀	0.001	130.7	6.26	312.7	6 260.0	2.39
	N ₀ P ₁	0.020	238.4	19.82	288.5	991.2	1.21
	N ₁ P ₁	0.016	219.1	20.68	261.4	1 292.2	1.19

(2) 相同施肥处理下,随着坡度的增加,泥沙中硝态氮、总氮、有效磷和总磷的流失浓度呈减小趋势,铵态氮流失浓度在不施氮肥条件下也随坡度增加而呈现减小的趋势,而在施氮肥处理下,铵态氮流失浓度随坡度是增加而增加。

(3) 在相同坡度时,在施氮肥处理下,随泥沙流失的铵态氮、硝态氮和总氮流失浓度相应提高,较不施氮肥处理下,磷素流失浓度相对减少;在施磷肥处理下,随泥沙流失的有效磷和总磷流失浓度是不施磷肥处理下的 4~5 倍,而泥沙中氮素流失浓度较不施磷肥处理下,硝态氮流失浓度有小幅减少,铵态氮和总氮流失浓度则在不施氮肥时呈减小趋势,施氮肥时呈增加趋势。

(4) 在相同施肥处理下,径流中总氮流失浓度随坡度的增加无明显变化,随降雨时间推移,总氮浓度呈先减小后趋于稳定的趋势。在相同坡度时,N₁P₀处理下,径流中总氮流失浓度最高,其他处理间没有明显差别。

(5) 在不同施肥措施和坡度条件下,硝态氮主要随径流而流失,铵态氮主要是随径流泥沙而流失,总氮则是径流和径流泥沙共同流失,有效磷和总磷都是以泥沙结合态流失为主。

[参 考 文 献]

- [1] Quan Wenmin, Yan Lijiao. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 291-299.
- [2] 朱兆良,孙波,杨林章,等. 我国农业面源污染的控制政策和措施[J]. *科技导报*, 2005, 23(4): 47-51.
- [3] Cookson W R, Rowarth J S, Cameron K C. The effect of autumn applied 15N-labelled fertilizer on nitrate leaching in a cultivated soil during winter[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 56(2): 99-107.
- [4] Bergström L F, Kirchmann H. Leaching of total nitrogen from nitrogen-15-labeled poultry manure and inorganic nitrogen fertilizer [J]. *Journal of Environment Quality*, 1999, 28: 1283-1290.
- [5] 王朝辉,李生秀,王西娜,等. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 676-681.
- [6] 王辉,王全九,邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 61-64.
- [7] 余贵芬,吴泓涛,魏永胜,等. 氮在紫色土中的移动和水稻氮素利用率的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(4): 316-320.
- [8] 王家玉,王胜佳,陈义,等. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. *土壤学报*, 1996, 33(1): 28-36.
- [9] 王德建,林静慧,夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1): 16-18.
- [10] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土: 上篇[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1-10.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 466-532.
- [12] 张小娜,冯杰,高永波,等. 不同雨强条件下坡度对坡地径流及溶质运移的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 119-123.
- [13] 耿晓东,郑粉莉,张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 40-43.
- [14] Bhatnagar V K, Miller M H, Kercheson J W. Reaction of fertilizer and liquid manure phosphorus with soil aggregates and sediment phosphorus enrichment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14(2): 246-251