

侵蚀性风化花岗岩坡地壤中流携氮磷流失动态模拟

张丽萍², 杨洁¹, 范晓娟², 邓龙洲², 邬燕虹²

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

2. 浙江大学 土水资源与环境研究所 浙江省农业资源与环境重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: [目的] 探究侵蚀环境下, 风化花岗岩残积坡地土壤氮磷流失特征以及坡面径流和壤中流携带氮磷流失的强度和贡献率, 为不同侵蚀环境及生态环境脆弱条件下, 坡地氮磷流失规律的试验研究及防治提供理论依据。[方法] 采用原状土搬运, 室内人工模拟降雨的方法, 设计 2 个坡度(8°和 25°), 5 个降雨强度(30, 60, 90, 120, 150 mm/min), 通过坡度与雨强的多重组合试验, 在测试浓度与径流量分析的基础上, 研究氮磷流失强度及在坡面径流和壤中流中的分配。[结果] ①在强烈侵蚀的坡地, 土壤结构性较差, 漏水漏肥现象严重, 壤中流随携带的氮磷流失比重很大, 壤中流携带的 TN 流失量均占到总流失量的 90% 以上, TP 稍次之; ②TN 随径流的流失量远大于 TP 的流失量, 径流中 TN 与 TP 总流失量的比值最高能达到 160 倍; ③雨强对氮磷流失量的影响大于坡度的影响, 径流量的影响大于浓度的影响。④雨强对氮磷流失的影响存在 2 个转折, 在 60 mm/min 附近存在一个蓄满产流和超渗产流的雨强分界, 在 90 mm/min 左右, 出现一个侵蚀性雨强的转折。[结论] 强烈的侵蚀影响土壤养分的流失方式及流失通道的配比, 壤中流所携带氮磷流失所占比重很大, 进而会影响到地下水的污染问题, 加强残积土母质坡地土壤的侵蚀防治, 是地表水和地下水面源污染控制及土壤养分流失减少的根本。

关键词: 强烈侵蚀; 红壤坡地; 模拟降雨; 流失浓度; 动态分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0156-06

中图分类号: S151.1

文献参数: 张丽萍, 杨洁, 范晓娟, 等. 侵蚀性风化花岗岩坡地壤中流携氮磷流失动态模拟[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 156-161. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.024. Zhang Liping, Yang Jie, Fan Xiaojuan, et al. Dynamic simulation of nitrogen and phosphorus losses in erosive weathered granite slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 156-161.

Dynamic Simulation of Nitrogen and Phosphorus Losses in Erosive Weathered Granite Slope

ZHANG Liping², YANG Jie¹, FAN Xiaojuan², DENG Longzhou², WU Yanhong²

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 2. Institute of Soil and Water and Environmental Sciences, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environment and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: [Objective] The objective is to investigate the losses of nitrogen and phosphorus in typical weathered granite parent material soil under erosive environment, and to discuss the contribution rates of nitrogen and phosphorus losses in slope runoff and interflow. [Methods] Slope gradients(8°, 25°) and rainfall intensities (30, 60, 90, 120, 150 mm/h) were selected as the variable factors for artificially simulated rainfall experiments, the study revealed the distributions of nitrogen and phosphorus losses in slope runoff and interflow based on mass concentration and runoff volume analyses. [Results] ① In the heavily eroded sloping fields, soil structure was instable; the soil was highly permeable, so the proportion of nitrogen and phosphorus loss in interflow was very large. The amount of TN loss in the interflow accounted for more than 90% of the total loss, and TP loss was slightly lower. ② The loss of TN with runoff was much greater than the loss of TP. TN in the slope runoff can reach 160 times higher than the total loss of TP. ③ The effect of rainfall intensities on the losses of nitrogen and phosphorus were greater than that of slope gradients; and the effect of runoff

收稿日期: 2018-06-12

修回日期: 2018-06-30

资助项目: 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室开放基金项目“红壤坡地不同降雨情况下壤中流水流动态及携氮磷流失特征研究”(JXSB201502); 国家自然科学基金项目“风化花岗岩侵蚀坡地表层流水流动态及携氮磷流失特征研究”(41471221)

第一作者: 张丽萍(1959—), 女(汉族), 山西省文水县人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持, 农业面源污染机理及控制方面的研究。E-mail: lpzhang@zju.edu.cn.

通讯作者: 杨洁(1959—), 女(汉族), 福建省莆田市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持生态工程方面的研究。E-mail: zljy@126.com.

volume was greater than that of mass concentration. ④ There were two transitions in the effect of rainfall intensity on nitrogen and phosphorus loss, the first one was near 60 mm/h rainfall intensity, at which full-stored Horton runoff begin transitioned to one dunne, and the second was 90 mm/min, from that on, the rain intensity became erosive. [Conclusion] Strong erosion affects both the loss of soil nutrients and the ratio of loss pathways. The losses of nitrogen and phosphorus in the interflow contribute a large proportion to the total ones, which inevitably affects the quality of groundwater. Strengthening the prevention and control of soil erosion on sloping fields in rock formations soil is the basis for the control of non-point source pollution of surface water and groundwater, and it is essential to reduce soil nutrient loss.

Keywords: strong erosion; red soil slope; simulated rainfall; loss concentration; dynamic analysis

南方红壤丘陵区是我国主要的水力侵蚀区,其坡地土壤母质主要是岩石风化的残积物,在强烈的水力侵蚀作用下,坡地土壤表土层粗化严重,土层减薄,砂土层或碎屑层不同程度出露,对降水入渗、壤中流形成、及其携带的养分流失影响很大。粗粒化的坡面加大了降水入渗和土壤养分渗漏,促进了壤中流的形成和养分的溶解,使得随壤中流流失的养分比例在不断加大。因此,开展坡面径流、壤中流、及其携带养分流失的规律研究,揭示降雨特征、坡面径流、壤中流的相关性,认识养分流失载体(坡面径流和壤中流)的动态规律,起到从源头上控制坡耕地养分流失的目的,为农业面源污染的控制提供理论依据^[1]。

关于壤中流及其携带氮磷流失的研究在不同的相关领域展开了不同角度的研究,其中以影响因素分析和输出强度方面的研究居多。一些专家研究了不同土地利用类型,氮磷在壤中流及坡面径流中的流失量,认为壤中流发生概率为灌木林地和荒草地较高,裸地最低。表层壤中流氮含量为裸地最高,人工恢复林地最低,壤中流磷含量为弃耕地最高,尾矿裸地最低^[2-3]。烤烟坡耕地坡位对壤中流携氮磷流失的影响较大^[4]。草地壤中流产流量、峰值、产流历时均大于裸地^[5]。通过对紫色土坡地氮素流失的研究,认为地表径流量对硝态氮的流失量起决定性作用,而浓度对壤中流流失量起主导作用。小雨强下紫色土坡地径流硝态氮流失以壤中流为主,随雨强的增大,地表径流流失量的贡献率越发明显^[6],壤中流产流过程缓慢,滞后于坡面径流^[7]。含碎石坡面的入渗和径流侵蚀研究显示,有植被覆盖坡面的壤中流大于裸坡;入渗率服从对数函数规律,产流强度呈幂函数变化^[8]。红壤坡耕地壤中流携氮磷流失的比重份额较大^[9]。改变坡地微地貌形态,促进了土壤的入渗和饱和,改变了壤中流携氮磷流失的规律和强度^[10-11]。壤中流不仅影响河川径流的洪峰流量,而且影响所携带氮磷流失的浓度^[12-13]。经过对林地表土层壤中流特征对养分淋失的影响研究,认为优先流影响携养分在壤中流中的分布和集中过程^[14];据不同表土层结构随降

水和融雪水作用的氮磷淋失模拟试验显示氮磷淋失比重较大的主要发生在包含有一定腐化枯枝落叶层位^[15]。表土层氮累积程度和水流动特性的相互作用是流域氮流失的主要部分,其对水体污染的影响大于地表径流输入氮的影响^[16]。综上所述,关于养分随壤中流输移的研究结论并不一致,在不同的设计条件下,并受监测条件的限制,所得结论差异较大,进而说明,壤中流的实际发生条件、表现形式及氮磷随壤中流的输移过程很复杂,与坡面径流及携氮磷流失的规律差异较大。基于上述分析,吸纳上述研究结论和成果,本研究拟将壤中流水流动态与氮磷流失特征融为一体开展研究,通过坡度与多重降雨特征组合试验,开展红壤分布区特殊母质(风化花岗岩残积母质)土壤坡地氮磷随坡面径流和壤中流流失特征的试验研究,探讨侵蚀环境和不同土质条件下红壤坡地氮磷流失方式的分配贡献。为开展不同侵蚀环境及生态环境脆弱条件下,坡地氮磷流失规律的试验监测、分析及防治提供借鉴。

1 材料与方 法

试验于 2017 年 3—10 月在浙江大学农业科学试验站(浙江省长兴县)内的“浙江大学农业面源污染与水土流失控制人工模拟降雨试验基地”内进行。

1.1 试验装置

试验径流槽是根据人工降雨装置有效降雨面积自行设计,由钢板焊接组成的可移动液压变坡式径流槽,几何规格为长宽高分别为 200 cm×100 cm×60 cm,设置两个平行排列径流槽为两个平行试验。坡度在 0°~30°内可以灵活调节。槽底部的前侧和左右两侧设置延伸槽,高度 3 cm,内铺小孔径的金属细网,用于方便收集壤中流。表面径流通过土槽上部的前集流槽收集。降雨设备采用西安清远测控技术有限公司研发的 QYJY-502 型便携式全自动不锈钢模拟降雨系统,主要由降雨喷头、供水管路、压力表、回水阀、供水水泵、不锈钢支架、开关阀等部分组成,雨强由全自动降雨设备“控制器”控制,雨强连续变化范

围为 15~200 mm/h,误差精度控制在 99%,降雨高度为 6 m,降雨均匀系数在 80%以上。

1.2 供试土壤

径流槽试验填土取自浙江省安吉县典型的风化花岗岩母质上发育的土壤(按地带性土壤来讲,属于红壤)。但由于严重的土壤侵蚀,表层被侵蚀夷尽,土壤的粗化现象非常严重,砂土层暴露。为了保证试验

用土与实地土壤层的最大一致性,采用原状土搬运的方式,在原地从地表每 5 cm 分层采集装袋,共采集 12 层。对应测试每层的土壤物理特性(表 1),在室内径流槽中对应层位填充,控制填土过程土壤密度保持一致,采取分 12 层填土,边填边压实,每层 5 cm,保证其土壤的容重一致。然后搁置一段时间,使土体恢复自然特征后进行降雨试验。

表 1 供试土壤基本理化性质

容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH 值	机械组成/%			CEC/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TK/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
		黏粒	粉粒	砂砾					
1.55	6.22	8.24	12.25	79.52	7.54	2.71	0.90	0.37	6.99

注:60 cm 剖面平均。

1.3 试验过程

坡度设置根据《中华人民共和国水利行业标准(SL190-2007)》,坡面面蚀强度分级指标,结合当地的实际地形条件,试验设计 2 个坡度(8° 和 25°)。雨强设置是根据当地的年平均降雨的大概率、暴雨等级之间的差值等差平分来确定,共设计 5 个雨强,分别为 30,60,90,120,150 mm/h)。采用 2 个坡度和 5 个雨强的组合试验,共进行了有效降雨试验 10 场次。降雨时长设计为产流后 90 min,地表径流收集在产流后每隔 3 min 收集一个浑水径流样品,共收集 30 个坡面径流的浑水样品。壤中流收集为壤中流产流开始,每隔 3 min 收集壤中流浑水径流样品一个。壤中流的收集时长要延续到产流开始后的 180 min,共收集 60 个壤中流的浑水样品。径流样品测量体积后取适量样用于后续的分析,静置烘干测量产沙量。每次降雨试验前监测土壤含水率,保证每次试验的土壤初始含水量基本相同。于每场降雨试验的前 7 d 在径流槽表面进行均匀撒施 100 g 有机肥以及 20 g 复合肥(N:P₂O₅:K₂O为 15:15:15)。予以监测养分随坡面流和壤中流中流失强度。

1.4 样品测定

每场降雨收集到的坡面径流样品和壤中流样品,以最快速度带回实验室后,在室温 25 ℃下静置 4~5 h 进行沉淀,待沉淀后测量泥沙量,并取上清液立即进行养分含量测定。径流样品的主要测定指标有:坡面径流量(包括水样+所含泥沙)、壤中流量、坡面径流中的总氮(TN)和总(TP)、壤中流中的总氮(TN)和(TP)。(参照 GB11894-1989)TN 测定采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法,TP 测定采用钼酸铵分光光度法

2 结果分析

流失量过程曲线是浓度与径流流量的综合体现。

在样品测试流量和浓度数据的基础上,计算并绘制的坡面径流及壤中流携带 TN 和 TP 流失的过程曲线(图 1—2)。

2.1 坡面径流中 TN 和 TP 流失量动态过程

由图 1 可知,在坡度为 8° 的情况下,TN 和 TP 随径流的流失过程比较复杂,在雨强小于等于 60 mm/min 时,流失量随产流历时的延续呈递减的趋势,降雨为 90 mm/min 时,呈递增的趋势,但是在雨强为 120 和 150 mm/min 的情况下,总的变化趋势呈现为波动式递减。TN 的递减趋势明显。在 25° 的坡面上,TN 和 TP 都随着雨强和降雨历时呈现为递增的趋势,但在雨强为大于 90 mm/min 时,增大的幅度明显。TN 的流失过程规律较 TP 的要好。

2.2 壤中流中 TN 和 TP 流失量动态过程

由图 2 可知,不同雨强和坡度条件下 TN 和 TP 流失量随产流历时的延长呈现出先增加后减小的趋势,表现为正偏态分布。这一过程曲线的变化规律与壤中流的流量过程曲线很相似^[17],其浓度过程曲线在降雨产流后的 20 min 内基本上处于稳定状态,不会随降雨历时的延长而变化,但是随雨强的增大浓度略有增加^[18-19]。从图 2 的纵坐标值来看,TN 的纵坐标的值远大于 TP 的纵坐标值,即 TN 随壤中流的流失强度远大于 TP 的流失强度。但是就各自 TN 和 TP 在同一雨强 2 个坡度流失量的值变化不是很明显。

由此,可推得 TN 和 TP 流失量的过程曲线受雨强的变化影响强于坡度对其的影响。相较于 TP 流失量的变化,TN 流失量受雨强影响的变化规律更为明显。整体上看 TN 和 TP 流失量随着雨强的增加均体现为增加的趋势,但增加的幅度与雨强增大的幅度不同,雨强呈等差增大,而流失量则呈指数或幂函数在增加。

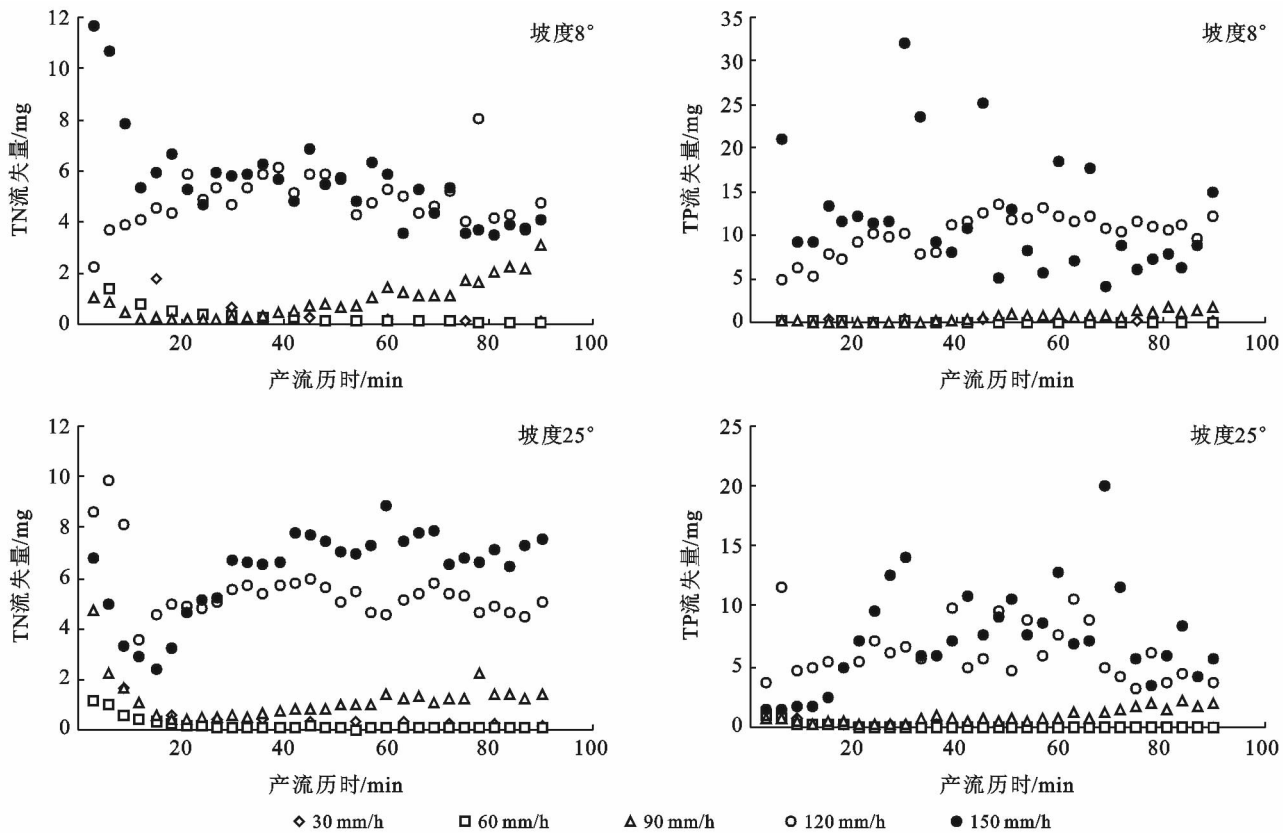


图 1 坡面径流携 TN 和 TP 流失的动态过程

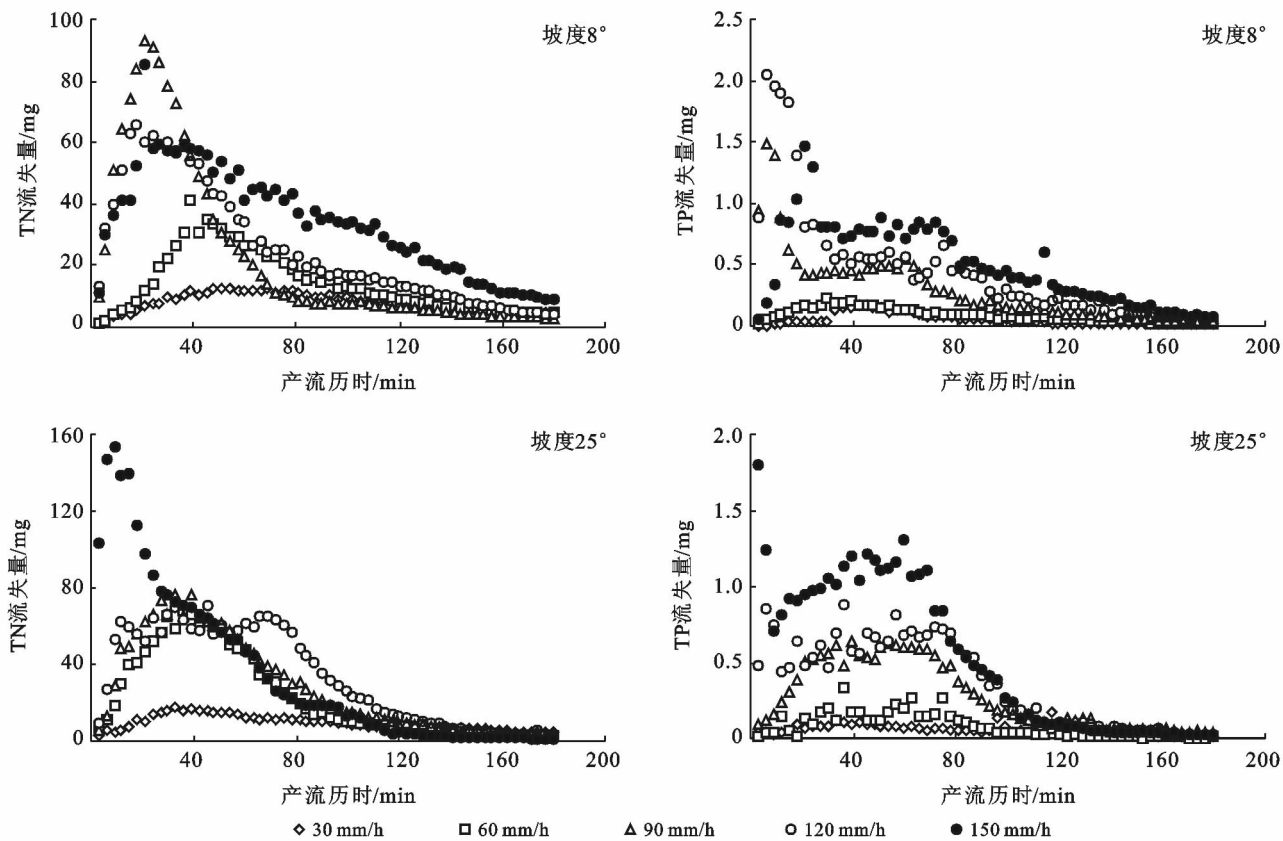


图 2 壤中流携 TN 和 TP 流失的动态过程

2.3 TN 和 TP 流失总量随的分配特征

将不同雨强和坡度次降雨 TN 和 TP 的总流失量进行汇总,并分别计算了坡面径流和壤中流所占百分比(表 2)。由表 2 数据可知,就次降雨 TN 和 TP 随径流流失的总量而言,TN 的流失量远大于 TP 的流失量。在 8°的坡面上,TN 总的流失量随雨强增大呈现为直线正相关,决定系数能达到 0.99;而 TP 总流失量随雨强的增大则为指数增长,决定系数为 0.92,雨强大于 90 mm/min 时表现为大幅增加。在 25°的坡面上,TN 的总流失量随雨强的增大呈现为幂函数增加,决定指数为 0.96;而 TP 总流失量随雨强则呈现为指数增大,决定系数为 0.95。从 TN/TP 的比值随雨强增大的倍数来讲,在 25°坡面上,TN/TP 的比值最大能达到 165 倍,但随着雨强的增大,比值在减小,呈现为指数递减,决定系数为 0.85。在 8°的坡面上,TN/TP 的比值较 25°的坡面要小,最大为 135,最小只有 5.2,比值随雨强的增大也呈现为指数递减,决定系数为 0.83。

表 2 设计坡度和雨强的次降雨坡面径流和壤中流携 TN,TP 流失统计

项目	雨强 30 mm/h		雨强 60 mm/h		雨强 90 mm/h		雨强 120 mm/h		雨强 150 mm/h		
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	
坡度 25°	坡面径流/mg	4.55	1.92	5.54	3.55	35.22	26.96	164.39	183.58	189.48	222.33
	壤中流/mg	562.44	3.39	1 379.2	4.79	1 657.03	16.52	1 992.15	21.88	2 159.24	32.33
	总(坡面+壤中流)/mg	566.98	5.30	1 384.7	8.35	1 692.25	43.48	2 156.54	205.46	2 348.72	254.66
	坡面径流/总/%	0.80	36.17	0.40	42.57	2.08	62.01	7.62	89.35	8.07	87.30
	壤中流/总/%	99.20	63.83	99.60	57.43	97.92	37.99	92.38	10.65	91.93	12.70
坡度 8°	坡面径流/mg	3.18	1.99	4.85	1.12	28.49	18.37	145.85	298.45	177.48	364.42
	壤中流/mg	472.77	3.28	851.60	5.24	1 355.14	17.68	1 522.27	27.48	2 038.78	29.68
	总(坡面+壤中流)/mg	475.96	5.26	856.45	6.36	1 383.63	36.05	1 668.12	325.92	2 216.27	394.10
	坡面径流/总/%	0.67	37.78	0.57	17.65	2.06	50.95	8.74	91.57	8.01	92.47
	壤中流/总/%	99.33	62.22	99.43	82.35	97.94	49.05	91.26	8.43	91.99	7.53

3 结果讨论

TN 和 TP 的流失量取决于流失浓度及径流,然而,浓度的大小与氮和磷素的溶解性有关,径流特征还受到雨强和坡度的影响。在相同雨强不同坡度和相同坡度不同雨强条件下,径流的产流方式、产流过程和坡面径流与壤中流的分配明显不同^[17],TN 和 TP 浓度的变化过程差别也很大^[18-19]。

在大雨强(150 mm/h)和陡坡(25°)组合的试验中,坡面径流以超渗产流为主,坡面径流和壤中流在总径流量中的比重分别为 37%和 73%。TN 的平均浓度在坡面径流中主要围绕 1.5 mg/L 上下波动,而在壤中流中则是在 9 mg/L 左右波动。TP 的浓度与

从流失量在坡面径流和壤中流的携带强度来讲,在任何雨强和坡度情况下,TN 随坡面径流的流失量都小于壤中流携带的流失量,随壤中流流失的 TN 占总流失量的比例都大于 90%。坡面径流中 TN 流失量随雨强的增大而呈指数增加,其决定系数 8°时为 0.94,25°时为 0.92。从增大的幅度来看,90 mm/min 雨强是一个分界,当雨强小于等于 90 mm/min 时增幅都很小,大于 90 mm/min 雨强时流失量陡增。TP 随径流流失的情况与 TN 不同,在坡度为 25°和 8°的坡面上,其变化规律相似,当雨强小于 90 mm/min 时,壤中流携带的 TP 流失量大于坡面径流,而当雨强大于等于 90 mm/min 时,坡面径流中的流失量大幅增加。在坡面径流中,TP 随雨强的增大而呈现出指数的增加趋势,决定系数能达到 0.95(25°的坡面)和 0.87(8°的坡面),并以不同数量级来增加,随壤中流的流失则以直线形式增加,虽然其决定系数能达到 0.96(25°的坡面)和 0.94(8°的坡面),但其斜率截距很小,以个位数在增加。

TN 的浓度不同,TP 的平均浓度在坡面径流中主要围绕 1.7 mg/L 上下波动,而在壤中流中则仅有 0.15 mg/L 左右。在缓坡(8°)和小雨强(30 mm/h)的组合试验中,坡面径流和壤中流在总径流量中的比重分别为 2.7%和 97.3%。TN 的平均浓度在坡面径流中主要围绕 2.4 mg/L 上下波动,而在壤中流中则是在 9.9 mg/L 左右波动。TP 的平均浓度在坡面径流中主要围绕 1.5 mg/L 上下波动,而在壤中流中则经有 0.07 mg/L 左右。将浓度和径流综合考虑,TN 随坡面径流的流失浓度和径流量的影响明显,随壤中流的流失浓度所起的作用较大。TP 随坡面径流的流失浓度起的作用较大,随壤中流的流失以径流量的大小为主。

由于土壤中氮的含量高于磷,同时,氮素的溶解性远大于磷素,而磷素的溶解性和有效性较氮素差,容易与土壤中的铁、钙等矿物结合形成不溶性的结合物,所以,在总径流中 TN 的流失量远高于 TP 的流失量。

4 结论

(1) 地表物质的机械组成以砂粒为主,孔隙结构以大孔隙所占比例居多^[20],漏水漏肥现象严重,所以 TN 和 TP 的流失方式大部分随壤中流而流失,其所占比例最大为 99%。

(2) TN 的流失量较 TP 的流失量大,尤其在壤中流中表现的更为明显。TN 与 TP 流失量的比值最高能达到 160 倍。即氮以溶解相氮流失为主,而磷的流失则以侵蚀相流失为主^[18]。

(3) 在地表物质粗化严重及土壤渗漏较为严重的坡地土壤,降雨强度存在两个相对转折,在 60 mm/min 附近存在一个蓄满产流和超渗产流的雨强分界,在 90 mm/min 左右,出现一个侵蚀性雨强的转折。

总之,在本试验设计条件下,所得研究结论表明,在侵蚀性风化花岗岩残积母质发育的坡地土壤,壤中流所携带氮磷流失所占比重很大,它既造成了养分的严重流失,也会导致接纳水体的污染,再甚者会渗入地下水造成地下水的亚硝酸盐超标。这一研究结论可为其他的岩成土坡地土壤养分流失的控制提供借鉴。

[参 考 文 献]

- [1] 郑海金,王辉文,杨洁,等. 地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J]. 中国水土保持,2015(2):36-40.
- [2] 常龙飞,王晓龙,李恒鹏. 巢湖典型低山丘陵区不同土地利用类型壤中流养分流失特征[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(5):511-517.
- [3] 李恒鹏,金洋,李燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较[J]. 水土保持学报,2008,22(2):6-9.
- [4] 褚利平,王克勤,宋泽芬,等. 考烟坡耕地壤中流氮、磷浓度的动态特征[J]. 农业环境科学学报,2010,29(7):1346-1354.
- [5] 谢颂华,涂安国,莫明浩. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. 水科学进展,2015,26(4):526-534.
- [6] 石德坤. 模拟降雨条件下坡地氮流失特征研究[J]. 水土保持通报,2009,29(5):98-101.
- [7] 徐佩,王玉宽,傅斌,等. 紫色土坡耕地壤中产流特征及分析[J]. 水土保持通报,2006,26(6):14-18.
- [8] 夏振尧,梁永哲,牛鹏辉,等. 植被对含碎石土壤坡面降雨入渗和径流侵蚀的影响[J]. 水土保持通报,2016,36(3):88-93.
- [9] 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.
- [10] 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):118-123.
- [11] 马琳琳,安娟,刘前进. 横坡垄作壤中流条件下垄高对径流态氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(6):56-60.
- [12] Oliveira Leite J D. Interflow, overland flow and leaching of natural nutrients on an Alfisol slope of Southern Bahia, Brazil[J]. Journal of Hydrology,1985,80(1/2):77-92.
- [13] Guillermo H R, Sylvie M B, Matthew D, et al. Nitrate, and ammonium loads at subsurface drains: agroecosystems and nitrogen management[J]. Journal of Environmental Quality, 2011,40(4):1229-1240.
- [14] Dale W. Johnson, Watkins W. Miller, Benjamin M. Rau, et. al. The nature and potential causes of nutrient hotspots in a sierra nevada forest soil[J]. Soil Science, 2011,176(11):596-610.
- [15] Loupe T M, Miller W W, Johnson D W, et al. Inorganic nitrogen and phosphorus in sierranforizon leachate [J]. Journal of Environmental Quality, 2007,36(2):498-507.
- [16] Christian B, Georgia D. Estimating subsurface nitrogen accumulation-depletion in catchments input-output flow analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2006,31,(17):1030-1037.
- [17] 邓龙洲,张丽萍,鄢燕虹,等. 侵蚀性风化花岗岩坡地降雨产流及水文过程研究[J]. 水土保持学报,2018,32(2):67-73.
- [18] 范晓娟,张丽萍,邓龙洲,等. 我国东南典型侵蚀区坡地磷素流失机制模拟研究[J]. 环境科学学报,2018,38(6):2409-2417.
- [19] 鄢燕虹,张丽萍,邓龙洲,等. 坡面氮素流失的坡度和雨强效应模拟研究[J]. 水土保持学报,2018,32(2):27-33.
- [20] 张丽萍,陈儒章,鄢燕虹,等. 风化花岗岩坡地土壤剖面大孔隙特性的空间分布[J]. 土壤学报,2018,55(3):621-633.