

坡面氮素流失的坡度和雨强效应模拟研究

邬燕虹, 张丽萍, 邓龙洲, 范晓娟

(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, 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 为了研究坡面径流和壤中流中全氮(TN)的流失特征,探索坡度和雨强对 TN 流失的影响,以风化花岗岩母质发育的土壤为研究对象,选定坡度(5° , 8° , 15° , 25°)和降雨强度(60, 90, 120, 150 mm/h)作为可变量,采用原状土搬迁的方式,在室内设计的径流槽上进行人工模拟降雨试验,设计试验降雨时长为坡面径流产生后 90 min,壤中流水样收集延续直至无出流为止。结果表明:(1)坡面径流 TN 流失浓度在产流初期快速下降,随雨强的减小或坡度的增大而增大,产流后期浓度趋于稳定且差距不大。(2)壤中流 TN 流失浓度均明显高于坡面径流,其流失过程规律为“上升—下降—略有上升—平稳”,总体上随雨强的减小或坡度的增大而增大。(3)坡面径流和壤中流的 TN 流失量均随雨强或坡度的增大而增大。壤中流是坡面 TN 流失的主要途径,流失比例可达 91.26%~99.61%。坡面径流中 TN 流失量占坡面 TN 总流失量的比例随雨强的增大而增大。(4)雨强、流量与坡面径流、壤中流 TN 总流失量均呈极显著正相关,而坡度只与壤中流 TN 总流失量呈显著正相关。(5)在雨强 90 mm/h 与 120 mm/h 之间存在一个临界雨强,超过这个临界雨强,坡面径流 TN 流失量及其占总流失量的比例都会大幅上升。

关键词: 模拟降雨; 坡面径流; 壤中流; 坡度; 雨强; 风化花岗岩母质发育土壤

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)02-0027-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.004

Effects of Slope Gradient and Rainfall Intensity on Nitrogen Loss Under Artificial Simulated Rainfall

WU Yanhong, ZHANG Liping, DENG Longzhou, FAN Xiaojuan

(Institute of Soil and Water and Environmental Sciences, Zhejiang Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environment and Resource Science of Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: In order to investigate the effects of different slope gradients (5° , 8° , 15° and 25°) and rainfall intensities (60, 90, 120 and 150 mm/h) on TN (total nitrogen) loss in surface runoff and subsurface flow, an artificial simulated rainfall experiment was conducted, and decomposed granite soil was taken as the experiment object. As the test design, the rainfall duration was 90 min after the appearance of surface runoff, and the test ended up when the subsurface flow disappeared. The results showed that: (1) The loss concentrations of TN in surface runoff declined rapidly at the early stage, and increased with the reduction of rainfall intensity and the increasing of slope gradient, and then tended to be stable. (2) The loss concentrations of TN in subsurface flow were significantly higher than those in surface runoff, and the curves of TN loss concentration in subsurface flow all followed a law of “rising-falling-slightly rising-steady”. Generally, the loss concentrations increased with the reduction of rainfall intensity and the increasing of slope gradient. (3) The total losses of TN in surface runoff and subsurface flow were both increased with the increasing of rain intensity and slope gradient. Subsurface flow was the main approach of TN loss on slope, and its proportion could reach 91.26% to 99.61%. The proportion of TN loss in surface runoff increased with the enhancement of rainfall intensity. (4) Rainfall intensity and runoff volume were both extremely significantly positively related to the TN loss in surface runoff and subsurface flow, while slope gradient only significantly positively correlated with the TN loss in subsurface flow. (5) There was a critical rainfall intensity between 90 mm/h and 120 mm/h, over which, the TN loss in surface runoff and its proportion in total loss would sharply rise.

收稿日期: 2017-11-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471221)

第一作者: 邬燕虹(1993—), 女, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: about1993@163.com

通信作者: 张丽萍(1959—), 女, 博士, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水污染与水环境及环境地学研究。E-mail: lpzhang@zju.edu.cn

Keywords: artificial stimulated rainfall; surface runoff; subsurface flow; slope gradient; rainfall intensity; decomposed granite soil

风化花岗岩母质发育的土壤从地带性来看为红壤,广泛分布于我国的东南部,主要集中在广东、福建、浙江、江西、湖南、湖北等省^[1]。这些地区地处热带、亚热带,热量丰富,降水充沛,有利于从事农业活动^[2];但同时区内山地丘陵多,地形起伏大^[3],降雨主要集中在夏季,因此极易发生水土流失,从而引起土壤的养分流失和水体的富营养化污染^[4]。目前,对于风化花岗岩,土壤学领域的专家们着重讨论的是岩石风化与土壤形成的关系,也有学者研究了热带地区土壤剖面风化成土过程中的地球化学元素特征^[5-7],而较少有关于此类土壤内部养分迁移流失方面的研究。土壤氮素是衡量土壤养分水平的最重要的营养元素^[8],也是造成水体富营养化污染的主要因素^[9]。因此,研究风化花岗岩母质发育土壤坡面的氮素流失规律与影响因素对于控制我国东南部地区的土壤养分流失和水体富营养化具有重要意义。

土壤坡面产生径流的形式主要包括坡面径流和壤中流。综合分析现有研究成果发现,坡地氮素的迁移流失以壤中流氮素的流失为主要途径,其中壤中流流量又是主要的影响因素,因此控制氮素流失的关键是减少壤中流的产生^[10]。地形和降雨是引起土壤发生水土流失和养分流失的主要自然因素,前者可细分为坡度、坡长、微地形等因素^[11-13],后者可细分为降雨强度、降雨量、降雨历时、雨滴动能等因素^[14-17],其中坡度和降雨强度是近年来国内外研究的热点。坡度影响降雨入渗的时间和坡面径流的流速,一般来说,坡面径流氮素流失量随坡度的增大呈现峰值特征,峰值出现在坡度 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,而壤中流中氮素的流失量随坡度变化趋势不一^[18-19]。降雨强度对坡面径流的影响一般大于壤中流,当雨强较小时,降雨对地表产生的侵蚀作用小,养分随坡面径流流失也小,随雨强的增加,养分流失的量随之增大,并在初期流失风险最大;壤中流中氮素的流失随降雨强度的增大而增大,其中壤中流流量起主要作用^[20-21]。

基于上述研究成果可知,就坡地土壤氮素流失而言,对于风化花岗岩母质发育的土壤,其相关研究较少,且对于坡度和降雨强度这 2 个影响因素对于坡面径流和壤中流氮素流失的组合研究更少。鉴于此,本研究拟采用室内人工模拟降雨的方法在风化花岗岩母质发育的土壤坡面上对坡度和降雨强度这 2 个因子的组合影响展开试验研究,通过测定降雨过程中坡面径流和壤中流 TN 流失量,获得坡面径流和壤中流携带 TN 流失的动态曲线,进一步比较坡面径流和壤

中流 TN 流失的差异性,并深入探讨坡度和降雨强度对 TN 流失变化规律的影响机理,以期为区域维护土壤质量和水体富营养化污染控制提供数据支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

试验土壤取自浙江省安吉县典型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。在取土之前,使用环刀法分层测定土壤自然状态下原状土的容重,并以 5 cm 为一层分层取回土壤样品,进行土壤理化性质的测定分析。测得各项土壤理化性质的平均值为:土壤容重 1.55 g/cm^3 , pH 6.22, 土壤总氮(TN)、总磷(TP)含量分别为 0.90, 0.37 g/kg, 土壤硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量分别为 41.44, 5.37 mg/kg。同时,在取土区划定 1 个 6 m^2 的区域,以 5 cm 为分层标准,将土分层带回试验场地,除去明显的石块等备用。

1.2 试验设计

模拟降雨试验于 2017 年 3—7 月在浙江省湖州市的浙江大学长兴农业科学试验站内的“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,模拟降雨装置采用“QYJY—501(502)便携式全自动不锈钢模拟降雨器”,雨强由全自动降雨设备控制,误差精度控制 99%,降雨高度约 6 m,降雨强度控制在 $30\sim 200\text{ mm/h}$ 。试验采用 2 个钢制径流槽进行平行试验,每个槽长 2 m,宽 1 m,高 0.6 m,坡度可通过液压装置调整,范围为 $0\sim 30^{\circ}$,试验中控制坡度根据《中华人民共和国水利行业标准》SL 190—2007 坡面面蚀强度分级指标来确定,分别为 5° , 8° , 15° , 25° ,具体坡度通过安置在径流槽上的铅锤装置读取。装土前,在槽底垫 5 cm 厚的细沙,并铺上透水纱布,以保证土壤的透气透水接近天然状况;然后根据野外土壤含水量、填土体积和容重在纱布之上按照顺序逐层填入 55 cm 厚的试验土壤,每填一层都进行压实处理,同时特别将土槽的边缘用力压实,配合将土槽内壁粗糙化的方式来减小水分入渗的边际效益。土槽装填完成后静置 2 个月以上,用环刀法测定槽内土壤容重,以确定槽内土壤已沉实到接近自然状态,才可以进行人工模拟降雨试验。每次降雨前测定每层土壤的前期含水率和 TN 含量,保证每次试验的前期土壤含水量和氮素含量基本一致。每次降雨试验

后,更换径流槽表层 5 cm 的土样,同样进行压实处理并静置 1 周以上,以进一步保证坡面表层氮素的相对一致。每次试验前 1 周,在每个土槽表面撒施 20 g 无机复合肥(N:P:K 为 15:15:15)和 100 g 有机肥(N=2.5%,有机质 $\geq 45\%$)。试验土壤表面不进行植被覆盖,并且在试验进行过程中随时除去土表零星杂草,以避免植物生长对试验的影响。径流槽下端顶部设置有边缘高 5 cm 的“V”形集水槽便于收集坡面径流及泥沙;在径流槽下端底部开长 1 m,宽 3 cm 的缺口,并设置高 5 cm 的集水槽用以收集壤中流。本次试验共计进行 22 场降雨,排除仪器故障、试验操作失误等的影响,共计获得有效降雨 16 场。根据浙江省杭州市气象局资料显示,杭州市的多年平均降雨量为 1 435 mm,而在每年 6—9 月受梅雨季节和强台风的影响,最大降雨量可达 214.4 mm/h,根据年平均降雨的大概率与暴雨等级之间的差值等差平分,共设计 4 个雨强,分别为 60, 90, 120, 150 mm/h。每次降雨试验正式开始前,在土槽周边安置 20 个直径 85 mm,高 200 mm 的降雨标定桶,并在径流槽上方覆盖挡水布,开启自动控制降雨装置后,确定降雨强度达到设计雨强范围内、降雨均匀度均达到 85% 以上后再撤去挡水布,正式开始试验并开始计时。

1.3 试验处理

每次降雨试验过程中,记录 2 个槽的坡面径流和壤中流的初始产流时刻,坡面径流产流后每隔 3 min 采集 1 次坡面径流泥沙样,降雨时长为自坡面径流产流开始持续 90 min,因此次降雨试验中每个径流槽采集可得 30 个坡面径流泥沙样;壤中流产流后每隔 3 min 采集 1 次壤中流样品,共计接取 60 个壤中流样品,时长 3 h。每场降雨收集的坡面径流和壤中流样品,带回实验室后在室温 25 °C 下静置 4~5 h 进行沉淀,待沉淀后测其泥沙量,并取上清液立即进行养分含量测定,主要测定指标为总氮(TN)(参照 GB 11894—1989 的碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法),并保证所有试验在 48 h 内完成。

2 结果与分析

2.1 不同雨强、不同坡度下坡面径流和壤中流的 TN 浓度输出特征

2.1.1 不同雨强下坡面径流和壤中流的 TN 浓度输出特征 目前,室内模拟降雨试验存在代表性、重复性差等问题,单一试验得出的结果代表性差,无法较好地运用于实际的生产生活中。基于这一事实,本文在进行数据分析时考虑了大数据原则,在对比单一影响因子的时候,考虑规避掉副影响因子,取几场试验的平均值进行分析,以获得适用性更强的规律运用于实际。

为综合研究雨强因子对坡面径流和壤中流 TN 流失浓度的影响,取各坡度坡面径流 TN 总流失量、壤中流 TN 总流失量,结合坡面径流量、壤中流量,计算得到不同雨强下每 3 min 坡面径流、壤中流中 TN 的流失浓度随时间的平均流失浓度(图 1 和图 2)。

从图 1 可以看出,不同雨强下坡面径流 TN 流失浓度均随时间的变化先剧烈下降而后平稳保持较低浓度,大概在坡面径流产流开始 30 min 后趋于稳定,说明降雨初期是坡面径流携氮素流失的关键时期。产生这一规律的内在原因是坡面径流首先带走的是土体表面本身存在的可溶态氮素和部分易被冲刷带走的颗粒态氮素,所以径流中 TN 浓度初期会比较高,且呈剧烈下降趋势,之后径流冲刷将土体表面的氮素溶解出来而带走,因此不同雨强下坡面径流中的 TN 最终均趋于平稳。在前 30 min 内不同雨强下 TN 浓度表现为 60 mm/h>90 mm/h $\approx$ 120 mm/h>150 mm/h,即雨强越小,坡面径流 TN 浓度越大。这一方面是因为坡面径流量随雨强增大而增大,对坡面径流中的氮素产生稀释效应;另一方面较大的坡面径流量意味着较快的流速,使径流与土壤间的接触时间较短,因此坡面径流中的 TN 浓度会比较低。综合两方面的原因,可知坡面径流 TN 浓度主要受坡面径流量的影响。降雨后期,坡面径流 TN 流失浓度在 60 mm/h 下略高于其他 3 个雨强,这可能是因为在这一时期除 60 mm/h 外,降雨强度对径流量和土体氮素溶解量两者的影响差别较小,因此从浓度上来看,不同雨强间的差距不明显。

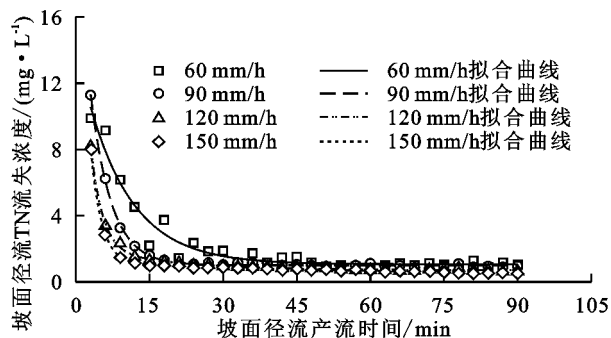


图 1 不同雨强下坡面径流中 TN 平均流失浓度随时间的变化曲线

从图 2 可以看出,不同雨强下壤中流 TN 流失浓度随时间的变化表现为壤中流产流前期,TN 浓度先略有上升而后下降,这是因为产流初期壤中流量小,且土壤中游离态 TN 的浓度较高;到壤中流产流中期各曲线又呈上升趋势,直至产流后期,各曲线趋于稳定。不同雨强的差异在于 150 mm/h 的降雨强度下,壤中流产流初期 TN 流失浓度明显高于其他雨强,且随时间的变化下降明显;到降雨中后期,不同雨强间壤中流 TN 流失浓度大致为随雨强的增大而减小。

这是因为雨强越大,壤中流产流量越多,产生稀释效应使壤中流中 TN 浓度随雨强的增大而下降。此外,从图 2 还可看出,不同雨强下壤中流 TN 流失浓度曲线的起伏间存在一个时间差现象,如壤中流产流中期各曲线的上升趋势先后顺序为 150,120,90,60 mm/h,这一现象的产生原因为:(1)产流前期,壤中流量起主导作用,雨强越大壤中流量越多,土体中氮素被带走的速度越快,越早开始对土体中非游离态氮的溶解移动,因此雨强越大,壤中流 TN 流失浓度曲线起伏变化越早;(2)壤中流产流一段时间后,出现坡面径流产流时长已经到 90 min 而应该停止降雨的情况,一旦停止降雨,壤中流上方的补给会被截断,壤中流的流量会随之下降,相对的壤中流中 TN 流失浓度会上升,而壤中流的产流时刻相对于坡面径流的产流时刻的先后顺序是 150 mm/h>120 mm/h>90 mm/h>60 mm/h,因此会产生时间差现象。

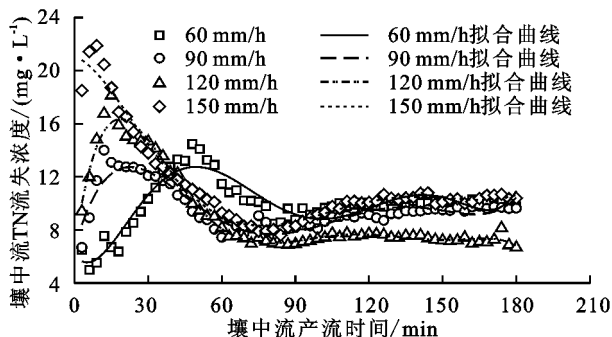


图 2 不同雨强下壤中流 TN 平均流失浓度随时间的变化曲线

综合来看,不同雨强下壤中流 TN 流失浓度远高于坡面径流 TN 流失浓度,两者之间存在最高可达 1 个数量级的差别。

2.1.2 不同坡度下坡面径流和壤中流的 TN 浓度输出特征 为综合研究坡度因子对坡面径流和壤中流中 TN 流失浓度的影响,取各雨强下坡面径流 TN 总流失量、壤中流 TN 总流失量数据,结合坡面径流量、壤中流量数据,计算得到不同坡度下每 3 min 坡面径流、壤中流中 TN 的流失浓度随时间的平均流失浓度,点绘得图 3 和图 4。

从图 3 可以看出,不同坡度下坡面径流中 TN 的流失浓度均随时间的变化呈先下降后平稳的规律,大概在 15 min 后保持稳定,这是因为降雨初期土体表面的氮素含量高,易被坡面径流带走,降雨后期坡面径流 TN 流失基本是径流溶解土壤固持的氮素,因此流失浓度比较低,且比较稳定。不同坡度间,产流前期坡面径流 TN 流失浓度为 $25^{\circ}>15^{\circ}>8^{\circ}>5^{\circ}$,产流中后期保持稳定后为 $25^{\circ}>15^{\circ}>8^{\circ}>5^{\circ}$,这是因为坡度越大,坡面径流量越大,流速越快,坡面径流对坡面的侵蚀越强,越容易将土壤表面的氮素带走,使 TN

流失浓度越大。

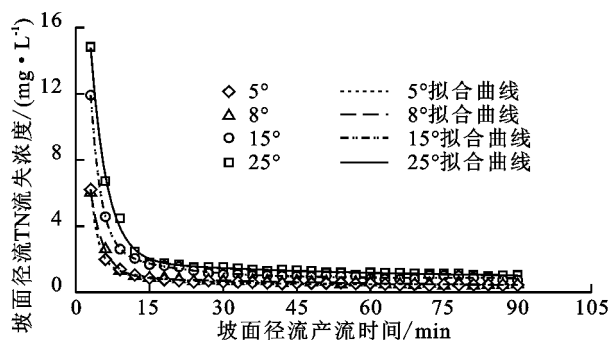


图 3 不同坡度下坡面径流 TN 平均流失浓度随时间的变化曲线

从图 4 可知,不同坡度下壤中流 TN 流失浓度随时间的变化为壤中流产流初期呈先上升后下降的趋势,中后期又略有上升而后平稳,与不同雨强下壤中流 TN 流失的规律类似。不同坡度间壤中流 TN 流失浓度在产流初期为 $25^{\circ}>15^{\circ}>5^{\circ}>8^{\circ}$,然后 25° 和 15° 下的壤中流 TN 流失浓度迅速下降,低于 8° 和 5° ,这是因为此刻壤中流携带的主要是土壤本身存在的游离态氮素,容易流失但总量有限,因此大坡度下的初始流失浓度大,下降较快;产流中后期表现为 $8^{\circ}>15^{\circ}>5^{\circ}>25^{\circ}$,此时影响壤中流 TN 流失浓度的因素有壤中流量和壤中流对土壤固持氮素的溶解两方面,一方面坡度越大,壤中流量越大,对壤中流 TN 有稀释作用;另一方面,坡度越大,土体内水分容易移动,与土壤颗粒的接触越充分,越容易将固持在土壤颗粒表面的氮素溶解出来,随水流的运动而流失,因此使壤中流中 TN 浓度较高。另外,与不同雨强下一样,不同坡度下壤中流 TN 流失浓度曲线的起伏间也存在一个时间差现象,其产生原因为坡度越大,壤中流产流时刻越提前,流量越大,从而影响 TN 流失浓度曲线。

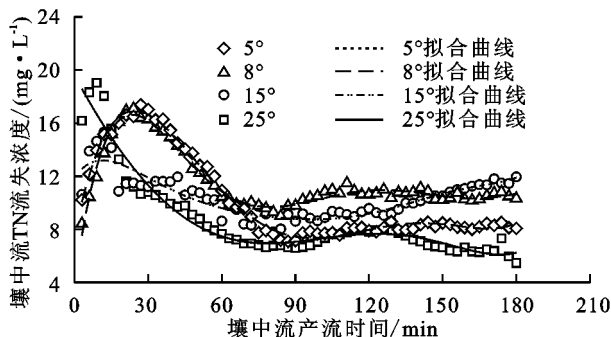


图 4 不同坡度下壤中流 TN 平均流失浓度随时间的变化曲线

与不同雨强下结果一致,不同坡度下壤中流 TN 流失浓度也远高于坡面径流中的 TN 流失浓度,两者相差 1 个数量级。

2.2 不同雨强、不同坡度下坡面径流和壤中流的 TN 总量输出特征

取不同雨强、不同坡度下坡面径流和壤中流 TN 的总流失量数据绘制图 5 和图 6,以分析雨强、坡度因子对坡面径流、壤中流 TN 总流失量的影响。同时

计算不同雨强、不同坡度条件下,坡面径流 TN 总流失量和壤中流 TN 总流失量占坡面径流 TN 总流失量的比值(表 1),分析雨强、坡度因子对坡面氮素流失量分配的影响。

由图 5 可知,不同雨强下坡面径流的 TN 流失量均随雨强的增大而增大,且不同坡度间差异明显,表现为 $25^{\circ}>15^{\circ}>8^{\circ}>5^{\circ}$,这主要是由坡面径流量决定的; 5° 和 8° 间明显存在较大跃升,可知 $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 间存在临界坡度。另外分析可得 $90\sim 120\text{ mm/h}$ 间存在临界雨强,临界雨强以下,不同坡度坡面径流中 TN 流失量很小且十分接近;超过 90 mm/h ,坡面径流的 TN 流失量大幅上升,且雨强越大,坡面径流 TN 流失量增大越明显,这是因为大雨强大坡度条件下,坡面容易形成沟蚀或片蚀现象,会大大提高坡面氮素的流失量。说明在风化花岗岩发育而来的土壤坡地上,从坡面径流 TN 流失量来看,小雨强条件下不需要控制坡面坡度,但当雨强增至 90 mm/h 后,应将雨强和坡度因素同时纳入考虑范围,根据实际情况控制其中的 1 个或 2 个因素,从而大幅降低坡面径流的 TN 流失量。

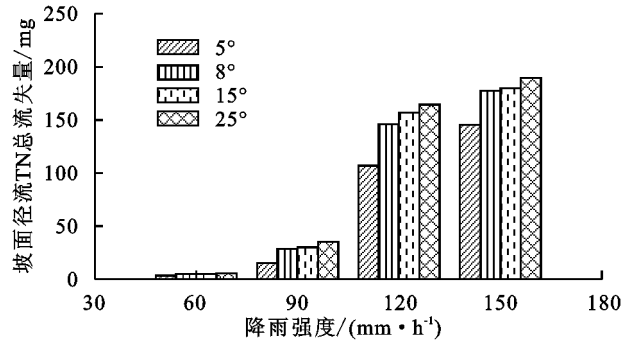


图 5 不同雨强、不同坡度下坡面径流中 TN 总流失量

从图 6 可以看出,与坡面径流一样,壤中流 TN 流失量也随雨强的增大而增大,且不同坡度间表现为 $25^{\circ}>15^{\circ}>8^{\circ}>5^{\circ}$,这主要是由壤中流量所决定。结合表 1,壤中流 TN 流失量随雨强增大而增大的趋势小于壤中流量的变化趋势,这是由土壤固持氮素溶解效率的限制引起的。小雨强下临界坡度在 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$,随着雨强增大临界坡度有增大的趋势。

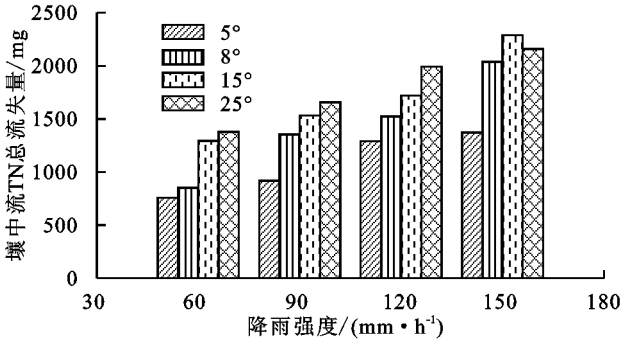


图 6 不同雨强、不同坡度下壤中流 TN 总流失量

从表 1 可知,坡面 TN 流失以壤中流为主,在不同雨强、不同坡度下,其流失量占径流 TN 总流失量

的比例可达 $91.26\%\sim 99.61\%$,这是径流量和径流接触土壤面积双重影响的作用,相对应的坡面径流 TN 流失量占比仅为 $0.39\%\sim 8.74\%$,由此可知在实际进行风化花岗岩发育土壤的农业面源污染防治活动时,控制壤中流的发生从而控制壤中流氮素总流失量对风化花岗岩土壤坡面氮素流失的减少具有十分重要的作用。不同坡度下,坡面径流 TN 流失量占径流 TN 总流失量的比例随雨强的增大呈上升趋势,在 150 mm/h 时比例达最大,这是因为雨强增大对坡面径流量的影响大于壤中流量,随着雨强增大,坡面径流流速快,对坡面表层土壤的冲刷作用大,从而使更多的氮素被坡面径流带走。不同雨强下,坡度因子对坡面径流 TN 流失量占径流 TN 总流失量比例的影响没有明显规律。

表 1 不同雨强、不同坡度下坡面径流和壤中流 TN 流失量占径流 TN 总流失量的比例 单位: %

径流形态	坡度/(°)	降雨强度/(mm·h ⁻¹)			
		60	90	120	150
坡面径流	5	0.56	0.45	1.66	7.67
	8	0.67	0.57	2.06	8.74
	15	0.83	0.39	1.92	8.35
	25	0.80	0.40	2.08	7.62
壤中流	5	99.44	99.55	98.34	92.33
	8	99.33	99.43	97.94	91.26
	15	99.17	99.61	98.08	91.65
	25	99.20	99.60	97.92	92.38

2.3 坡度、雨强、流量对坡面径流、壤中流 TN 流失的综合影响

为了进一步分析坡度、雨强、流量综合影响下坡面径流和壤中流的流失特征,采用 SPSS 20.0 进行相关分析(表 2),研究坡度、雨强及流量与坡面径流、壤中流 TN、总流失量之间的相关性。

从表 2 可以看出,坡度与壤中流 TN 总流失量在 0.05 水平上呈显著正相关,相关系数为 0.559,而与坡面径流 TN 总流失量间无明显相关性,说明对于风化花岗岩发育的土壤坡面而言,坡度因子主要影响壤中流 TN 总流失量,而对坡面径流 TN 总流失量影响不大。雨强因子的影响与坡度因子不同,它与坡面径流中 TN 总流失量和壤中流 TN 总流失量都在 0.01 水平上呈极显著正相关,其相关系数分别为 0.942 和 0.747,说明对于风化花岗岩的土壤坡面而言,雨强因子同时影响坡面径流 TN 总流失量和壤中流 TN 流失量,且对坡面径流 TN 流失量的影响较大。流量与坡面径流 TN 总流失量和壤中流 TN 总流失量都在 0.01 水平上呈极显著正相关,相关系数分别为 0.858 和 0.889。从坡面径流 TN 总流失量上来看,3 个因子的相关性依次为雨强>流量>坡度;而从壤中流 TN 总流失量上来看,3 个因子的相

关性依次为流量>雨强>坡度。

表 2 坡面径流、壤中流 TN 总流失量与坡度、雨强及流量的相关性分析

项目	坡面径流 TN 总流失量	壤中流 TN 总流失量
坡度	0.130	0.559*
雨强	0.942**	0.747**
坡面径流量	0.858**	—
壤中流量	—	0.889**

注: ** 表示 0.01 水平上极显著相关; * 表示 0.05 水平上显著相关。

将各场次降雨实测的数据采用 SPSS 20.0 进行回归分析,得出回归模型(1)和(2):

$$S_1 = 1.934G + 1.441I + 0.248V_1 - 114.043 \\ (R = 0.960, F = 47.499) \quad (1)$$

$$S_2 = 4.513G + 5.871I + 5.590V_2 - 36.158 \\ (R = 0.956, F = 42.184) \quad (2)$$

式中: S_1 为坡面径流 TN 总流失量(mg); S_2 为壤中流 TN 总流失量(mg); G 为坡度($^{\circ}$); I 为雨强(mm/min); V_1 为坡面径流量(L); V_2 为壤中流量(L)。

坡度、雨强及流量与坡面径流 TN 总流失量、壤中流 TN 总流失量的综合影响可以用线性相关方程准确地进行描述, R 值分别为 0.960 和 0.956, 模型的拟合度较好, 坡面径流 TN 总流失量模型的拟合度略高于壤中流 TN 总流失量。

3 结论与讨论

降雨是坡面产生坡面径流和壤中流并导致土壤氮素流失的根本动力。坡度会影响坡面受雨量、径流流速和径流切应力,从而影响土壤氮素流失。本文以室内模拟降雨的方法,研究了风化花岗岩母质发育土壤坡地坡面径流和壤中流中 TN 流失特征受坡度和雨强的影响,主要结论为:

(1) 壤中流 TN 流失浓度远高于坡面径流 TN 流失浓度。坡面径流中 TN 的流失浓度曲线在产流初期剧烈下降,且随雨强的减小或坡度的增大而增大。壤中流 TN 流失浓度曲线为“略有上升—下降—上升—稳定”,大致也随雨强的减小或坡度的增大而增大。这说明在风化花岗岩母质发育的土壤坡面上一旦发生降雨,坡面径流携氮素流失主要发生在坡面径流产流开始时间内,而壤中流的产流全程浓度均较高,与郑海金等^[22]在红壤坡面上获得的结论较为一致。

(2) 坡面径流和壤中流的 TN 流失量均随雨强或坡度的增大而增大。壤中流是坡面 TN 流失的主要途径,比例可达 91.26%~99.61%,且其占比随雨强的增大而增大,与坡度无明显相关性。这与周林飞

等^[23]、李恒鹏等^[24]的结论不一致,究其原因主要是风化花岗岩母质发育土壤与棕壤土、黄泥土等土壤相比,土质更疏松且水分更易下渗,极易产生壤中流,对土壤氮素产生冲刷。因而在这种土壤分布的地区,壤中流的发育对氮素流失往往起到决定性作用。在实际应用中,应防止或减少壤中流的发生,如可以通过培肥来增大土壤持水能力来减少壤中流。

(3) 坡面径流或壤中流 TN 总流失量与雨强、流量呈极显著正相关;坡度只与壤中流 TN 总流失量呈显著正相关。可用线性相关方程准确地描述坡度、雨强及流量对坡面径流 TN 总流失量、壤中流 TN 总流失量的影响,说明雨强对坡地氮素流失的影响比坡度大,且其影响力主要通过影响坡面径流量或壤中流量来实现。考虑到天然降雨的雨强不可控制,可以通过植树植草等方式增大冠层截留和地表截留来减少雨强对坡面径流量和壤中流量的影响,从而降低土壤氮素流失。

(4) 在雨强 90 mm/h 与 120 mm/h 之间存在一个临界雨强,超过这个临界雨强,坡面径流 TN 流失量及其占总流失量的比例会大幅上升,且坡度越大这一现象越明显。这说明在 90~120 mm/h 间存在侵蚀性雨强的下限,一旦雨强超过这个值,坡面径流对表层土壤的侵蚀能力会大大增加,从而增大颗粒态氮的流失量。因此,应重点监测与防控风化花岗岩母质发育土壤地区的大坡度坡地在雨强较大时坡面径流对土壤的侵蚀现象。

参考文献:

- [1] 王学强,蔡强国,和继军,等. 花岗岩风化壳的层次特性对土壤侵蚀及其防治措施的影响[J]. 亚热带水土保持, 2008, 20(2): 20-24.
- [2] 张运英. 广东省花岗岩区侵蚀土壤类型及其防治对策[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 49-53.
- [3] 齐岩辛,万治义,陈美君,等. 浙江大明山花岗岩地貌景观特征与演化[J]. 科技通报, 2016, 32(2): 66-70.
- [4] 苏付安,松同清,王文丽,等. 模拟降雨对亚热带阔叶林土壤坡面产沙产流及养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 25-32.
- [5] Guicharnaud R, Paton G I. An evaluation of acid deposition on cation leaching and weathering rates of an Andosol and a Cambisol[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 88(1/3): 279-283.
- [6] 张瑾,李德成,张甘霖,等. 热带地区玄武岩发育时间序列土壤中石英颗粒微形态特征[J]. 土壤, 2012, 44(1): 111-117.
- [7] 杨金玲,张甘霖,黄来明. 典型亚热带花岗岩地区森林流域岩石风化和土壤形成速率研究[J]. 土壤学报, 2013,

- 50(2):253-259.
- [8] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- [9] 罗永霞, 高波, 颜晓元, 等. 太湖地区农业源对水体氮污染的贡献: 以宜溧河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2318-2326.
- [10] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 香溪河流域坡耕地人工降雨条件下土壤氮素流失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 616-621.
- [11] 张佳琪, 王红, 代肖, 等. 坡度对片麻岩坡面土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 1-5.
- [12] 赵光旭, 王全九, 张鹏宇, 等. 短坡坡长变化对坡地风沙土产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 13-18.
- [13] 郑子成, 秦凤, 李廷轩. 不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 168-175.
- [14] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.
- [15] 艾宁, 魏天兴, 朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 26-30, 35.
- [16] 沈奕彤, 郭成久, 李海强, 等. 降雨历时对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 97-101.
- [17] 王辉, 平李娜, 沈紫燕, 等. 雨滴动能对红壤地表溶质迁移特性影响试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 165-170, 223.
- [18] 冯勇. 不同坡度和雨强条件下紫色土壤中流氮磷养分流失特征研究[J]. 水土保持应用技术, 2014(4): 4-6.
- [19] 王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 69-75.
- [20] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2151-2158.
- [21] 丁文峰, 张平仓. 紫色土坡面壤中流养分输出特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 15-19, 53.
- [22] 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.
- [23] 周林飞, 郝利朋, 孙中华. 辽宁浑河流域不同土地类型地表径流和壤中流氮、磷流失特征[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 737-742.
- [24] 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, 46.
- (上接第18页)
- [67] 邓岚, 丁富平, 徐敬华, 等. 生产建设项目水土保持成果快速评价体系[J]. 南昌工程学院学报, 2016, 35(6): 81-84.
- [68] 钟云飞, 巴丽敏. 东北黑土区水土保持治理效益评价体系的构建[J]. 东北水利水电, 2011, 29(8): 32-34.
- [69] 高昊旻. 中小河道生态水土保持指标评价体系[J]. 中国农村水利水电, 2006(6): 47-50.
- [70] 吴晓瑞, 信永达, 钟云飞. 吉兴小流域水土保持综合治理效益评价体系[J]. 东北水利水电, 2013, 31(9): 30-33.
- [71] 康绍忠, 蔡焕杰, 刘晓明, 等. 农田“五水”相互转化的动力学模式级其应用[J]. 西北农业大学学报, 1995, 23(2): 1-7.
- [72] McCaskill M R, Kariada I K. Comparison of five water stress predictors for the tropics[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 58(1/2): 19-34.
- [73] 张平仓, 程冬兵. 南方坡耕地水土流失过程与调控研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 24(3): 35-40.
- [74] 裴源生, 赵勇, 张金萍, 等. 广义水资源高效利用理论与实践[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 442-448.
- [75] 侯新, 刘玉邦, 梁川, 等. 农业水资源高效利用评价指标体系构建及其应用[J]. 中国农村水利水电, 2011(9): 8-11.
- [76] 刘玉邦, 梁川. 川中丘陵区农业水资源高效利用综合分区[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5): 42-46.
- [77] 杨庆宪, 王亚静. 城市水资源高效利用的机制研究[J]. 陕西理工学院学报(社会科学版), 2010, 28(2): 22-25.
- [78] 郭红艳, 周金星. 石漠化地区水土流失治理[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 71-76.
- [79] 李渊, 刘子琦, 吕小溪, 等. 石漠化地区地下漏失水土理化性质特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 111-117.
- [80] 魏兴萍, 袁道先, 谢世友. 运用¹³⁷Cs与土壤营养元素探讨重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失和漏失[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 16-23.
- [81] 王克林, 岳跃民, 马祖陆, 等. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7098-7102.
- [82] 王浩, 褚俊英. 我国节水产业的发展对策[J]. 中国水利, 2005(13): 59-62.
- [83] 单飞飞, 郑文刚, 周平, 等. 农业管理节水技术应用分析[J]. 农机化研究, 2010, 32(8): 7-10.