

模拟降雨条件下坡度对茶园红壤氮素流失影响

赵 越¹, 李泽利², 刘茂辉², 钱丽萍³, 孙 云³, 王 振³, 王玉秋^{2*}

(1.环境保护部环境规划院, 北京 100012; 2.南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 3.黄山学院生命与环境科学学院, 安徽 黄山 245041)

摘 要:以新安江流域茶园红壤为研究对象,采用人工模拟降雨方法,研究其在五种不同坡度(0°、5°、10°、15°、20°)下的产流和氮素流失的特征。结果显示,径流以壤中流为主,地表径流中的氮素在流失过程中表现出了很强的初期冲刷效应,壤中流的氮素流失量随着降雨的持续而逐渐增大;在各种坡度下,氮素均以壤中流流失为主;地表径流中总氮、硝态氮、氨氮的流失量 y 与坡度 x 的回归方程分别为 $y=1.03e^{0.06x}-0.88$ ($R^2=0.99^{**}$)、 $y=0.37e^{0.06x}-0.36$ ($R^2=0.98^{**}$)、 $y=0.002x+0.004$ ($R^2=0.94^{**}$),壤中流中总氮、硝态氮、氨氮的流失量 y 与坡度 x 的回归方程分别为 $y=-5.65e^{0.06x}+30.49$ ($R^2=0.91^{**}$)、 $y=-0.17e^{0.16x}+14.92$ ($R^2=0.98^{**}$)、 $y=0.77e^{-0.18x}+0.13$ ($R^2=0.92^{**}$)。随着坡度的增大,地表径流中氮素的流失呈增大趋势,壤中流中氮素的流失呈下降趋势。

关键词:新安江;茶园红壤;坡度;模拟降雨;氮素;流失特征

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)05-0992-07 doi:10.11654/jaes.2014.05.024

Impacts of Slope on Nitrogen Losses from Red Soil in Tea Garden Under Simulated Rainfall

ZHAO Yue¹, LI Ze-li², LIU Mao-hui², QIAN Li-ping³, SUN Yun³, WANG Zhen³, WANG Yu-qiu^{2*}

(1.Chinese Academy for Environment Planning, Beijing 100012, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3.College of Biology and Environmental Science, Huangshan University, Huangshan 245041, China)

Abstract: Slope plays important roles in nutrient losses from soils, especially under rainfall. A laboratory simulated rainfall experiment was conducted to investigate the characteristics of runoff and nitrogen losses from red soil in tea garden in Xin'anjiang River Basin under five slope gradients of 0°, 5°, 10°, 15° and 20°. Results showed that runoff occurred mainly as interflow. Nitrogen losses in surface runoff had initial flush effect after each raining event, whereas those in the interflow increased with raining time. Under all slope gradients, nitrogen losses were mainly through interflow. For the surface runoff, regression equation for nitrogen losses (y) and slopes (x) was $y=1.03e^{0.06x}-0.88$ with $R^2=0.99^{**}$ for total nitrogen, $y=0.37e^{0.06x}-0.36$ with $R^2=0.98^{**}$ for NO_3^- -N, and $y=0.002x+0.004$ with $R^2=0.94^{**}$ for NH_4^+ -N. For the interflow, that was $y=-5.65e^{0.06x}+30.49$ with $R^2=0.91^{**}$ for total N, $y=-0.17e^{0.16x}+14.92$ with $R^2=0.98^{**}$ for NO_3^- -N, and $y=0.77e^{-0.18x}+0.13$ with $R^2=0.92^{**}$ for NH_4^+ -N. These equations indicated that with increasing slopes nitrogen losses increased in the surface runoff, but decreased in the interflow.

Keywords: Xin'anjiang River; red soil in tea garden; slope; simulated rainfall; nitrogen; losses

新安江上游流域拥有大面积的茶园红壤区,红壤主要的肥力特性为黏、酸、瘦,其土层较为浅薄,坡地水分持水能力强,有效水分含量较低^[1],“暴雨时就易造成强烈的水土流失”^[2]。在茶园农业生产过程中,如

果耕作管理方式不合理,极易导致水土及氮磷等养分的大量流失,进而造成严重的农业面源污染^[3]。为了控制茶园导致的面源污染,众多学者开展了茶园水土及养分的流失规律研究,席运官等^[4]研究了太湖流域坡地茶园的径流流失规律,刘宗岸等^[5]研究了苕溪流域茶园的地表径流氮磷流失特征。从这些研究中可以看出降雨是茶园土壤养分流失的主要推动力。氮素是土壤肥力的重要组成部分,国内外已有众多的学者开展了降雨条件下各种类型土壤的氮素等营养元素迁移变化规律的研究^[6],由于坡度是降雨条件下养分流失

收稿日期:2013-09-09

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07631-01-04);环境保护部环境规划院“水污染综合防治项目”(2013A009)

作者简介:赵 越(1978—),男,辽宁沈阳人,博士,主要研究方向为流域水环境管理与规划。E-mail:zhaoyue@caep.org.cn

* 通信作者:王玉秋 E-mail:yqwang@nankai.edu.cn

的重要影响因素之一^[7],得到了广泛的研究,如张赫斯等^[8]研究了红壤坡地中坡度对产流产沙的影响,孔刚等^[9]研究了模拟降雨下坡度对黄土坡面养分流失的影响,李俊波等^[10]研究了模拟降雨下坡度对密云地区农田褐土径流中七种阳离子流失量的影响。在这类科学研究中,模拟降雨以其经济性、时效性以及易获取丰富研究数据的特点,已经成为营养元素流失研究的重要技术方法^[11-13]。近年来,千岛湖的水质出现了加速富营养化的迹象^[14-15],如果听之任之,将会威胁到整个长三角地区的战略备用水源^[16]。为了控制千岛湖水质的恶化,势必要控制其上游茶园红壤区养分的输出。本文以新安江上游流域典型茶园红壤为研究对象,通过使用人工模拟降雨的方法来探索不同的坡度对茶园红壤径流中氮素流失的影响,以期揭示不同坡度下茶园红壤氮素的流失特征,进而可以为控制类似土壤区域所导致的富营养化提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省休宁县荣山茶厂有机茶生产基地(东经 118°10',北纬 29°39'),该基地现有茶园面积 367 hm²,具有当地普遍的耕作管理方式、茶树种类以及茶园坡度。该区域属于亚热带季风区气候,温热多雨,年均气温 15.5~16.4℃,降水量在 1395~1702 mm 之间,降水多集中在 5—7 月。地形地貌为低山丘陵,坡度多在 5°~20°之间,土壤类型为红壤。小区内种植多年生茶树,等高种植,垄间平均距离为 80 cm,茶树品种为休宁松萝,四季常青。该基地施用鸡粪、羊粪等有机肥料,一般每年施肥两次,分别在春季(追肥)和秋季(基肥),施肥量在 3000~6000 kg·hm⁻² 之间,施肥方式为穴施。

1.2 实验设计

实验所采用的人工模拟降雨系统来自南京林业大学模拟降雨实验室,该系统包含土槽系统、动力系统和降雨系统三部分。其中,土槽尺寸为 2 m×1.5 m×0.5 m(长×宽×高),并且 0~5 cm 处设导流槽以收集地表径流,底部每 20 cm² 开圆孔,孔径为 2 cm,以收集下渗的壤中流;动力系统为土槽提供动力,使土槽在

0~30°的坡度范围内可调;在降雨系统中,降雨高度为 3 m,降雨强度变化范围为 20~160 mm·h⁻¹,降雨均匀度大于 91%,雨滴大小的范围为 1.7~2.8 mm。

试验用土取自研究区春季追肥 1 个月之后,取土地点于茶园中随机选取,采用原样法分层取土,每层 10 cm,共取 5 层,取样体积同土槽体积。然后原样分层装入土槽中,同时把原地段的成年茶树移栽入土槽中,土槽自然放置两个月的时间,以便使土体尽可能地恢复到自然状态。依据研究区主要的坡度范围,试验设定五个水平的坡度,其大小分别为 0°、5°、10°、15°、20°;参照文献[7]和[9]以及该区域常见的产流雨强,试验过程中的降雨强度设定为 75 mm·h⁻¹;经摄像投影计算,土槽的茶树覆盖度为 45%,另外土槽中还含有自然生长的极少量杂草;依据水土保持试验规程(SL 419—2007),每次降雨过程重复一次。实验开始前,首先测定土槽中土壤的理化性质,测试结果见表 1。为保证降雨前土壤的含水量一致,在正式降雨前 24 h,使用小雨强降雨对土槽进行湿润,至土槽刚要产生径流为止。实验中所用雨水为实验室提供的自来水,自来水 pH 值为 6.8。

1.3 样品采集与测试

实验于 2013 年 3—7 月开展,模拟降雨开始前,设定模拟降雨各参数。在各个坡度下分别进行降雨,每次降雨一次完成,完成之后立即进行氮素指标测定,测定完成后再进行下一场降雨,每次降雨时间间隔为一周。降雨过程中,记录模拟降雨开始时间,地表径流、壤中流产生时间,降雨结束时间,地表径流、壤中流停止时间,并且保持每场降雨的产流历时相同。径流产生时用 1 L 的广口聚乙烯瓶采集样品,采集体积约为 500 mL,参照文献[12],产流初期,氮素浓度变化较大,随后趋于平稳。因此,开始阶段每分钟的样品都采集,此后每隔 1~4 min 采集一次,并且每场降雨采集时间相同。降雨共进行 35 min 左右,具体降雨历时见表 2。样品收集后冷藏保存,并尽快测定。

测定时,采用容积法测定每次样品的体积,采用重量法测定泥沙的质量,采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮,采用紫外分光光度法测定硝态氮,采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮。测定总氮时

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

容重/g·cm ⁻³	密度/g·cm ⁻³	孔隙度/%	pH	颗粒组成/%			全氮/ mg·kg ⁻¹	有效氮/ mg·kg ⁻¹	全磷/ mg·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹
				<0.002 mm	0.002~0.05 mm	>0.05 mm				
1.30	2.62	50.21	4.50	26.9	32.1	41.0	1 457.8	165.9	847.3	15.4

表 2 模拟降雨条件下降雨、产流特征
Table 2 Runoff characteristics under simulated rainfall

径流形式	坡度/(°)	产流开始 时间/min	产流结束 时间/min	降雨总量/ mm	平均产流 量/L·min ⁻¹
地表	0	8.98	42.87	52.03	0.14
	5	2.55	35.42	42.40	0.24
	10	1.87	34.10	41.29	0.33
	15	1.27	34.38	41.38	0.45
	20	0.98	33.70	39.81	0.51
壤中	0	10.28	85.10	52.03	1.34
	5	7.32	74.27	42.40	1.33
	10	6.43	72.80	41.29	1.17
	15	6.47	77.87	41.38	1.17
	20	5.35	78.87	39.81	1.07

样品分两份:一份用 0.45 μm 滤膜过滤后,测定水样中溶解态氮;另一份不过滤,并搅拌均匀用于测定总氮。颗粒态氮的浓度等于总氮与溶解态氮的浓度之差。模拟降雨所用自来水中的各个指标同时测定,为消除自来水背景值对实验结果的影响,实验数据均减去模拟用水的背景值。分析数据取两次降雨过程的平均值。本文涉及的浓度或流失量的平均值为样品体积或采样历时加权平均,具体计算公式如下:

$$C=\frac{\sum_{i=1}^n C_i L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}, M=\frac{\sum_{i=1}^n M_i T_i}{\sum_{i=1}^n T_i}$$

式中: C 表示平均浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或者 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; C_i 表示第 i 个样品的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或者 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; n 表示样品个数; L_i 表示第 i 个样品的体积, L ; M 表示平均流失量, $\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 或者 $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$; M_i 表示第 i 个样品中的流失量, $\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 或者 $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$; T_i 表示第 i 个样品的采样历时, min 。

2 结果与讨论

2.1 产流特征

表 2 为每次实验降雨的降雨、产流特征。可以看出,随着坡度的增大地表径流和壤中流产生的时间都有逐渐缩小的趋势,与司登宇等^[17]研究苏南黄壤的情形相似;并且地表径流结束时间都随着坡度的增大而呈现逐渐变小的趋势,主要是在降雨强度相同的情况下,坡度越大,径流流速越大,径流持续时间越短。图 1 为不同降雨过程中产流的特征曲线图。可以看出,在径流产生的过程中,地表径流的产生较为平稳,而壤中流先有较大的增加,后趋于平稳,且在产流的初期以地表径流为主,随后以壤中流为主;从每次

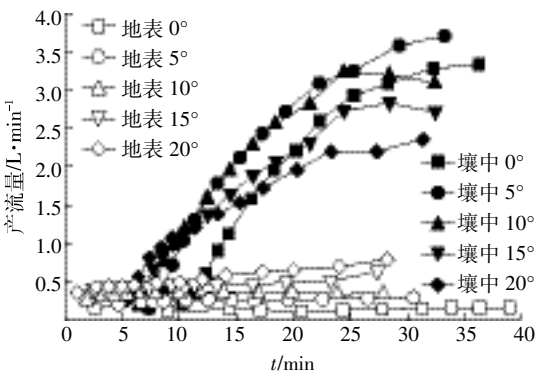


图 1 地表径流和壤中流的产流过程
Figure 1 Time courses of surface runoff and interflow

降雨的整体来看,随着坡度的增加,地表径流的产流量逐步增大,壤中流逐步减小,其中壤中流占整个径流的平均比依次为 0.91、0.85、0.78、0.72、0.68,由此可见,壤中流的产流量所占比例随着坡度的增大是逐步减小的,与丁文峰等^[18]研究紫色土坡面情况相一致;虽然壤中流所占比例逐渐减小,但是其数值均大于 0.68,因此壤中流是整个径流产生的主要形式,与周明华等^[19]研究紫色土坡耕地“壤中流占 73%以上”的描述相似。在降雨开始后,雨水开始浸润土壤,致使土壤含水率增大,达到饱和之后,继续下渗形成壤中流,而土壤含水率高也致使土壤孔隙中水分连通性较高,使得水分流动性增强,壤中流不断增大^[20],加之红壤孔隙度较大致使径流更容易以壤中流的形式流出。

2.2 氮素输出过程特征

2.2.1 氮素浓度变化过程

图 2 为氮素的流失过程。可以看出,地表径流中总氮、硝态氮、氨氮等氮素的流失浓度虽然在不同坡度下表现各有差异,但是总体趋势相同,基本都表现为初期数值较大,随着降雨的持续,氮素浓度逐渐降低,最终处于小范围内波动的稳定状态,也就是所谓的初期冲刷效应^[21]。原因可能是研究中的茶园红壤氮素养分含量较高(表 1),在降雨产流的初期,由于受到雨滴的击打、径流的冲刷,富含氮素的细小土壤颗粒以及易溶于水的氮素均随着径流流失,使得氮素浓度较高。随着降雨的持续进行,土壤表层易于流失的氮素逐渐减少,加之不断累积产生的雨水对氮素也起到了一定的稀释作用^[22],从而使得地表径流中氮素的浓度不断降低,当土壤表层与地表径流的氮素交换趋于平衡时,地表径流中氮素的流失也随着达到了稳定的状态^[23]。而壤中流中总氮、硝态氮、氨氮等氮素的流失浓度在不同的坡度下相对于地表径流来说变化波动

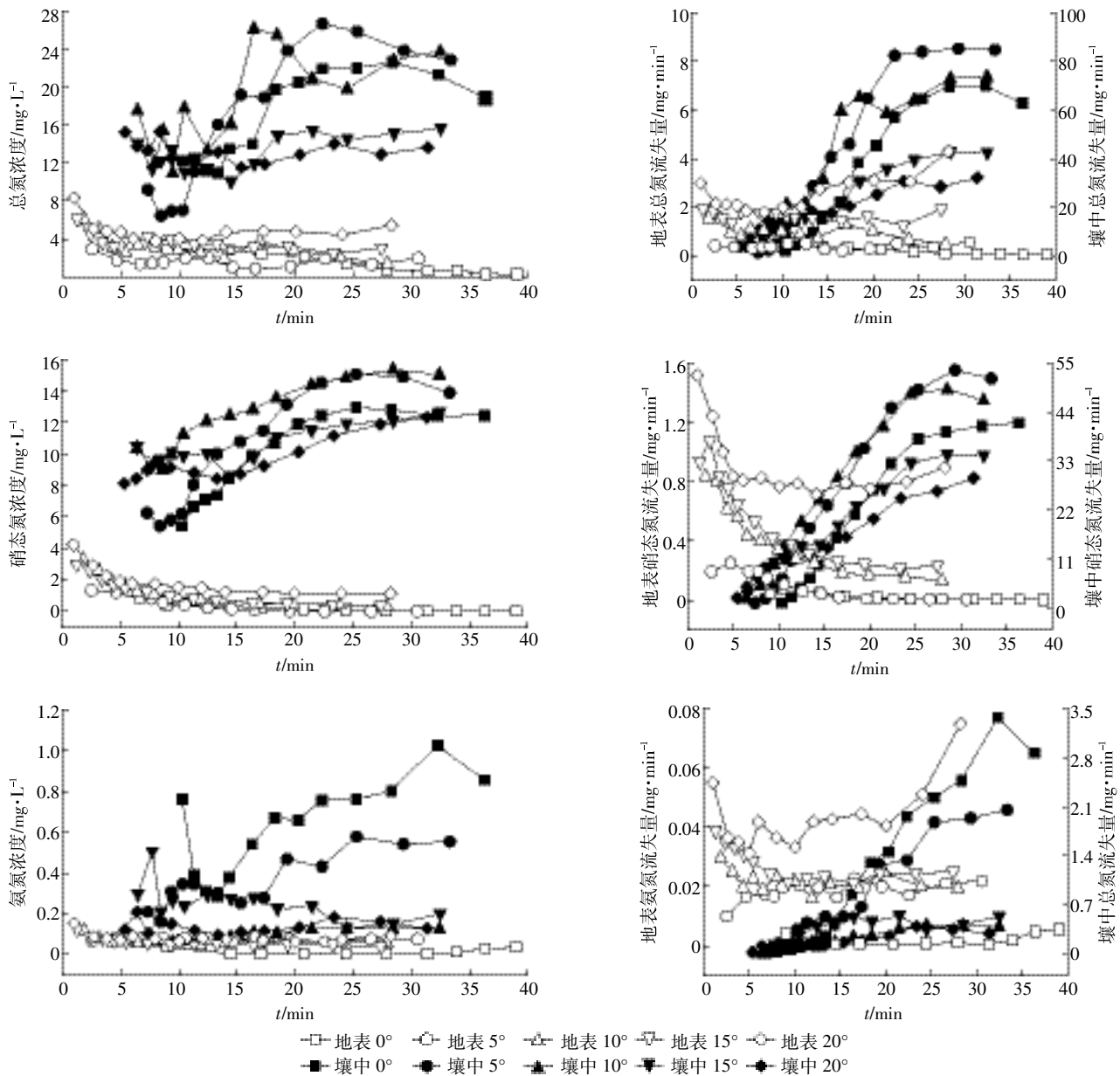


图2 地表径流和壤中流中氮素流失过程

Figure 2 Nitrogen losses in surface runoff and interflow

较大。对于壤中的总氮和氨氮而言,当坡度小于 10° 时,总氮、氨氮浓度逐渐增大并趋于平稳,当坡度大于 10° 时,其浓度降低或变化不大;相比而言,壤中硝态氮浓度则随着降雨的持续呈现了逐步增大并趋于稳定的趋势。原因可能是,壤中流中径流与土壤有较长的相互作用时间^[24],使得土壤中的氮素不断地溶入到径流中,并随着壤中流流失,径流在壤中流中充当了氮素流失的主要动力。当坡度较小时,较多的径流通过壤中流失,使得氮素流失逐渐增大;当坡度增大时,通过壤中流的径流量减小,使得流失的氮素并没有持续升高,甚至降低。而硝态氮由于自身携带着负电荷,不易于被同

样携带负电荷的土壤胶体吸附,从而易于发生淋溶^[25],因此并未出现上述现象,而是随着降雨的进行持续升高并达到一个稳定的状态。

2.2.2 氮素流失量变化过程

研究养分的流失量可以直观地反映茶园面源污染的输出负荷量。从氮素流失量的变化过程来看(图2),地表径流中总氮和氨氮的流失量在 20° 坡度时均出现了增大的趋势,其他四个坡度条件下,基于处于一种较为平稳的状态,而硝态氮的流失量在各种坡度下均随着降雨的持续而逐步减小。由此可见,虽然地表径流中氮素浓度逐渐降低,但由于地表径流量是逐

步增大的,使得地表氮素流失量并没有出现一致的逐步下降的情况,相反,当坡度在 20°时,受重力的影响,土壤表层更易于发生剥蚀,进而更多的氮素进入到径流中,氮素的流失也逐步增大;而硝态氮由于更易于流失^[26],所以其流失量便出现了与总氮、氨氮不同的逐步下降的趋势。壤中流中各氮素的流失量虽然在不同坡度下各有不同,但总体都呈现逐渐变大的趋势,这也进一步说明了径流是壤中氮素流失的主要推动力。

2.3 不同坡度间氮素流失特征

2.3.1 氮素流失形式

表 3 为地表径流和壤中流中不同坡度间氮素的流失特征。由表 3 可知,不管是从氮素的浓度还是流失量的角度看,在各种坡度下,氮素的流失均以壤中流为主。这与陈玲等^[27]对香溪河流域坡耕地的研究结论一致,原因在于研究区土壤内部氮素养分含量较高,当径流与土壤较长时间接触后,使得土壤内部的氮素溶入到壤中流中,进而以壤中流为主要流失载体。

在不同坡度下对氮素流失量和坡度进行了回归分析,经过比较,选取了精确度最好的回归方程,结果见图 3。由回归分析可知,地表径流中总氮、硝态氮、氨氮与坡度的关系分别为: $y=1.03e^{0.06x}-0.88$ ($R^2=0.99, P<0.01$), y 表示流失量, x 表示坡度,下同)、 $y=0.37e^{0.06x}-0.36$ ($R^2=0.98, P=0.01$)、 $y=0.002x+0.004$ ($R^2=0.94, P<0.01$);壤中流中总氮、硝态氮、氨氮与坡度的关系分别为: $y=-5.65e^{0.06x}+30.49$ ($R^2=0.91, P<0.01$)、 $y=-0.17e^{0.16x}+14.92$ ($R^2=0.98, P<0.05$)、 $y=0.77e^{-0.18x}+0.13$ ($R^2=0.92, P<0.05$)。由此可见,随着坡度的增大,地表径流中的氮素流失量逐渐增大,相反,壤中流中氮素流失量逐渐

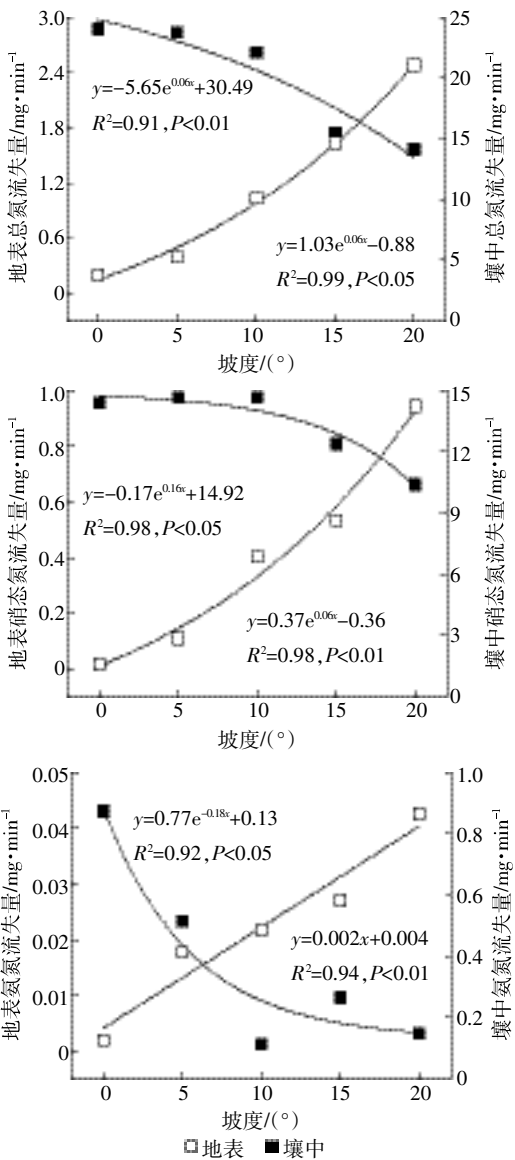


图 3 地表径流和壤中流中氮素流失量与坡度的关系
Figure 3 Relationship between nitrogen losses in surface runoff and interflow and slopes

表 3 地表径流和壤中流中氮素流失特征

Table 3 Characteristics of nitrogen losses in surface runoff and interflow

径流形式	坡度/(°)	总氮浓度/ mg·L ⁻¹	总氮流失量/ mg·min ⁻¹	颗粒态氮/总氮	硝氮浓度/ mg·L ⁻¹	硝氮流失量/ mg·min ⁻¹	氨氮浓度/ mg·L ⁻¹	氨氮流失量/ mg·min ⁻¹
地表	0	1.45	0.20	0.86	0.12	0.02	0.014	0.002
	5	1.67	0.40	0.59	0.46	0.11	0.075	0.018
	10	3.11	1.04	0.47	1.21	0.40	0.065	0.022
	15	3.65	1.64	0.57	1.19	0.54	0.060	0.027
	20	4.81	2.49	0.58	1.74	0.94	0.082	0.043
壤中	0	17.89	24.06	0.15	10.70	14.39	0.65	0.87
	5	17.84	23.79	0.28	10.99	14.65	0.39	0.51
	10	18.96	22.10	0.27	12.57	14.66	0.10	0.11
	15	13.17	15.43	0.13	10.56	12.38	0.23	0.27
	20	13.17	14.12	0.20	9.70	10.40	0.14	0.15

减小。这主要是因为,随着坡度的变化,土壤入渗能力、水流特性、水体和物质的平衡状态均发生了变化^[9],当坡度增大时,地表径流增大,而壤中流减小,使得氮素的流失呈现了上述变化。在这些氮素与坡度的关系中,除地表径流中氨氮是线性关系外,其他均为指数形式,而在王全九等^[28]建立的土壤溶质与径流相互作用的混合模型以及 Wallach 等^[29]建立的土壤氮素在径流中释放和传输模型中,其函数关系也均为指数形式。这主要是因为氮素的流失量受到了产流量、产沙量、坡度等多重因素的影响,加之氮素本身的物质特性(例如氨氮的挥发性、硝态氮的负电荷性),使得其与坡度的变化关系较为复杂^[9,27,30]。

2.3.2 氮素流失形态

对于颗粒态氮而言,从单次降雨的整体来看(表3),不同坡度下,颗粒态氮与总氮的平均比随着坡度并没有明显的变化,其中地表径流中颗粒态氮与总氮的比值范围是0.47~0.86,壤中流中颗粒态氮与总氮的比值范围是0.13~0.28,也就是说氮素的流失在地表以颗粒态为主,在壤中以溶解态为主。这一点与李恒鹏等^[31]在太湖流域平原河网地区的试验结论相一致,主要原因在于,土壤的滤过作用使得径流中大部分的土壤颗粒截留在土壤中,而地表由于受到径流和雨水的冲刷,使得富含氮素的土壤颗粒易于随着地表径流流失。

3 结论

(1)在氮素的流失过程中,地表径流中氮素表现了很强的冲刷效应,即初期浓度很高,随后逐渐减小并趋于稳定。因此,在新安江上游流域茶园区的降雨初期有必要加强对边坡的防护,以期最大限度地减少氮素对水体造成的污染。

(2)从各场降雨的整体来看,氮素均以壤中流失为主;随着坡度的增大,地表中的氮素流失呈增大趋势,壤中氮素流失呈减小的趋势。由此可见,新安江上游流域茶园的富营养化防护治理,应以壤中流治理为主,并且坡度越小,越应加强治理;同时,在坡度较大的地方,还应加强对地表氮素流失的防护。

参考文献:

- [1] 王峰, 沈阿林, 陈洪松, 等. 红壤丘陵区坡地降雨壤中流产流过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 15-17, 29.
WANG Feng, SHEN A-lin, CHEN Hong-song, et al. Experimental study of rainfall-interflow processes on sloping land in red soil hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 15-17, 29.
- [2] 廖承彬, 魏天儒. 红壤坡地不同树种林下水土流失特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 198-202.
LIAO Cheng-bin, WEI Tian-ru. Characteristics of soil and water loss on red soil slope land under forest with different tree species[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(2): 198-202.
- [3] 马军福, 谢小立. 坡地不同垫面产流及物质联动研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 78-81.
MA Jun-fu, XIE Xiao-li. The study of runoff and matter linkage in different slope land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 78-81.
- [4] 席廷官, 陈瑞冰, 李国平, 等. 太湖流域坡地茶园径流流失规律[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 381-385.
XI Yun-guan, CHEN Rui-bing, LI Guo-ping, et al. Surface runoff in tea gardens on slope land in Taihu Lake region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4): 381-385.
- [5] 刘宗岸, 杨京平, 杨正超, 等. 茗溪流域茶园不同种植模式下地表径流氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 29-32, 44.
LIU Zong-an, YANG Jing-ping, YANG Zheng-chao, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses with surface runoff in tea field of Tiaoxi Watershed under different planting patterns[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 29-32, 44.
- [6] Chen Y H, Wang M K, Wang G, et al. Nitrogen runoff under simulated rainfall from a sewage-amended lateritic red soil in Fujian, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 123: 35-42.
- [7] Pan C Z, Shangguan Z P, Lei T W. Influences of grass and moss on runoff and sediment yield on sloped loess surfaces under simulated rainfall[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20: 3815-3824.
- [8] 张赫斯, 张丽萍, 朱晓梅, 等. 红壤坡地降雨产流产沙动态过程模拟试验研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1210-1214.
ZHANG He-si, ZHANG Li-ping, ZHU Xiao-mei, et al. Research on the processes of rainfall, surface runoff and sediment on sloping field with red loam by simulated rainfall experiment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(5): 1210-1214.
- [9] 孔刚, 王全九, 樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 14-18.
KONG Gang, WANG Quan-jiu, FAN Jun. Research on nutrient loss from loessial soil under different slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 14-18.
- [10] 李俊波, 华璐, 蔡典雄, 等. 降雨强度与坡度对径流中七种阳离子流失量的影响[J]. 土壤, 2005, 37(4): 426-432.
LI Jun-bo, HUA Luo, CAI Dian-xiong, et al. Effects of rainfall intensity and slope on losses of cations with runoff[J]. *Soils*, 2005, 37(4): 426-432.
- [11] Jones M G, Vervoort R W, Cattle J. Nutrient losses under simulated rainfall from pasture plots in the Great Lakes District, New South Wales[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47: 555-564.
- [12] Xu P, Fu B. The runoff characteristics under simulated rainfall on purple soil sloping cropland[J]. *Chin J Geochem*, 2011, 30: 317-322.
- [13] 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 49-55.

- CHEN Ling, SONG Lin-xu, CUI Yu-jie, et al. Characteristics of phosphorus loss in sloping arable land of yellow-brown soil under artificial rainfall test[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 49-55.
- [14] 吴志旭, 刘明亮, 兰 佳, 等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 460-465.
- WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, LAN Jia, et al. Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir(Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3): 460-465.
- [15] 李培培, 史 文, 刘其根, 等. 千岛湖叶绿素 a 的时空分布及其与影响因子的相关分析[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(4): 568-574.
- LI Pei-pe, SHI Wen, LIU Qi-gen, et al. Spatial and temporal distribution patterns of chlorophyll-a and the correlation analysis with environmental factors in Lake Qiandao[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(4): 568-574.
- [16] Liu J W, Lü H J. Economic value of water resources of the upper reaches of the Xin'an River Basin, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 87-92.
- [17] 司登宇, 张金池, 闵俊杰, 等. 模拟降雨条件下苏南黄壤产流起始时间及影响因素研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(5): 184-189.
- SI Deng-yu, ZHANG Jin-chi, MIN Jun-jie, et al. The factors affecting the starting time of slope runoff based on the rainfall simulation for the yellow soil in South Jiangsu[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(5): 184-189.
- [18] 丁文峰, 张平仓, 王一峰. 紫色土坡面壤中流形成与坡面侵蚀产沙关系试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2008, 25(3): 14-17.
- DING Wen-feng, ZHANG Ping-cang, WANG Yi-feng. Experimental study on runoff and sediment yield characteristics on purple soil slope[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(3): 14-17.
- [19] 周明华, 朱 波, 汪 涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. *水利学报*, 2010, 41(11): 1374-1381.
- ZHOU Ming-hua, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Phosphorus losses and effects of fertilization on sloping cropland of purple soil[J]. *Shuili Xuebao*, 2010, 41(11): 1374-1381.
- [20] Moret D, Arrue J L. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1/2): 103-113.
- [21] 曹杰君, 高 扬, 黄海波, 等. 长三角典型村域次降雨条件下氮素非点源输出特征[J]. *环境科学*, 2010, 31(11): 2587-2593.
- CAO Jie-jun, GAO Yang, HUANG Hai-bo, et al. Output characteristics of non-point nitrogen from a typical village region in Yangtze Delta under an individual rainfall event[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11): 2587-2593.
- [22] 彭圆圆, 李占斌, 李 鹏. 模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流氮素流失特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 1-5.
- PENG Yuan-yuan, LI Zhan-bin, LI Peng. Slope of nitrogen loss in the rocky mountain area of Parrot Ditch under the condition of rainfall simulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 1-5.
- [23] 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.
- SHI De-kun. Characteristics of nitrogen loss on slope under simulated rainfall[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5): 98-101.
- [24] 罗春燕, 涂仕华, 庞良玉, 等. 降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 24-27.
- LUO Chun-yan, TU Shi-hua, PANG Liang-yu, et al. Effect of rain intensity on nutrient losses from sloping land of purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 24-27.
- [25] 刘 泉, 李占斌, 李 鹏, 等. 模拟降雨条件下坡度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.
- [26] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(3): 55-58.
- ZHANG Ya-li, ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an, et al. Impact of rainfall intensity on soil mineral nitrogen loss by runoff on loess slope[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(3): 55-58.
- [27] 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.
- CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, et al. Soil nitrogen loss from sloping farmland under artificial rainfall in Xiangxi River Valley[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(6): 616-621.
- [28] 王全九, 王文焰, 沈 冰. 降雨-地表径流-土壤溶质相互作用深度[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(2): 41-46.
- WANG Quan-jiu, WANG Wen-yan, SHEN Bing. Interacting depth of rainfall-runoff-soil solute[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(2): 41-46.
- [29] Ahuja L R, Lehman O R. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12(1): 34-40.
- [30] 张兴昌, 邵明安. 坡地土壤氮素与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. *地理科学进展*, 2000, 19(2): 128-135.
- ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an. The interacting models and mechanisms of soil nitrogen with rainfall and runoff[J]. *Progress in Geography*, 2000, 19(2): 128-135.
- [31] 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.
- LI Heng-peng, JIN Yang, LI Yan. Comparative study of nitrogen losses between surface flow and interflow of farm land under artificial rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 6-9, 46.