

滇中红壤丘陵区不同土地利用类型坡地氮磷流失特征

杨 昕, 王克勤, 宋娅丽, 张雨鉴, 李晓龙

(西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224)

摘 要:为揭示红壤丘陵区不同土地利用类型坡地径流及氮磷流失特征,以滇中仓房小流域 3 种土地利用类型(林地、灌草地、农地)为研究对象,通过测定 2018 年雨季自然降雨过程中不同土地利用类型径流量、氮磷流失形态、质量浓度及流失量,研究了红壤丘陵区径流及氮磷流失特征。结果表明:(1) 不同土地利用类型下径流量与降雨量和降雨强度均呈显著正相关,总径流量表现为:林地(20.12 L/m^2)<灌草地(23.80 L/m^2)<农地(34.34 L/m^2),各土地利用类型的变异系数为 $0.14 \sim 0.64$,差异较大;(2) 自然降雨条件下 TN, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度均值表现为林地($3.20, 2.08, 0.50 \text{ mg/L}$)<灌草地($4.09, 2.57, 0.58 \text{ mg/L}$)<农地($4.95, 3.16, 0.88 \text{ mg/L}$), TP 和 $\text{PO}_4^- \text{-P}$ 质量浓度均值表现为林地($3.43, 1.95 \text{ mg/L}$)<灌草地($4.33, 2.57 \text{ mg/L}$)<农地($5.82, 3.61 \text{ mg/L}$);(3) 溶解态氮磷是径流水体中氮磷污染的主要污染物,其中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^- \text{-P}$ 为径流氮磷流失的主要形态($56.81\% \sim 77.41\%$ 和 $50.12\% \sim 76.64\%$);(4) 不同土地利用类型下 TN 和 TP 流失总量表现为林地($59.96, 65.47 \text{ mg/m}^2$)<灌草地($98.92, 102.95 \text{ mg/m}^2$)<农地($170.28, 200.94 \text{ mg/m}^2$)。因此,通过在流域内增加林地和灌草面积,开展退耕还林还草工程,可减少该流域氮磷流失量,从而减缓和防治云南红壤丘陵区水土流失。

关键词:土地利用类型;氮磷流失;径流;红壤丘陵区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0023-07

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Types in Red Soil Hilly Area in Central Yunnan Province

YANG Xin, WANG Kegin, SONG Yali, ZHANG Yujian, LI Xiaolong

(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: Three land use types (forest, shrub and farmland) in Cangfang small watershed in central Yunnan Province were studied as the research sites to reveal the characteristics of runoff and nitrogen and phosphorus losses in slope lands with different land use types in red soil hilly area. Runoff, nitrogen and phosphorus loss forms, concentrations and loss amounts of different land use types were measured during natural rainfall in rainy season in 2018. Characteristics of runoff, nitrogen and phosphorus losses in red soil hilly region were studied. The results showed that: (1) there was a significant positive correlation between runoff and rainfall and rainfall intensity under different land use types; the total runoff increased in the order: forest land (20.12 L/m^2)<shrub land (23.80 L/m^2)<farmland (34.34 L/m^2); the variation coefficients of various land use types ranged from 0.14 to 0.64, and the difference was significant; (2) under natural rainfall conditions, the average concentrations of TN, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ increased in the order: forest land ($3.20, 2.08$ and 0.50 mg/L)<shrub land ($4.09, 2.57$ and 0.58 mg/L)< armland ($4.95, 3.16$ and 0.88 mg/L), TP and $\text{PO}_4^- \text{-P}$ increased in the order: forest land (3.43 and 1.95 mg/L)<shrub land (4.33 and 2.57 mg/L)<farmland (5.82 and 3.61 mg/L); (3) dissolved nitrogen and phosphorus were the main pollutants of nitrogen and phosphorus pollution in runoff, among which $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and $\text{PO}_4^- \text{-P}$ were the main forms in runoff ($56.81\% \sim 77.41\%$ and $50.12\% \sim 76.64\%$); (4) the total losses of TN and TP under different land use types increased in the order: forest land (59.96 and 65.47 mg/m^2)<shrub land (98.92 and 102.95 mg/m^2)<farmland (170.28 and 200.94 mg/m^2). Therefore, the nitrogen and phosphorus losses in the watershed can be reduced by increasing

收稿日期:2019-07-05

修回日期:2019-07-23

资助项目:云南省重点研发计划(2018BC001);云南省科技厅“三区”人才支持计划;云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目;国家林业局生态学重点学科

第一作者:杨昕(1996—),女,云南武定人,硕士研究生,主要从事生态恢复研究。E-mail:1219174890@qq.com

通信作者:宋娅丽(1985—),女,山西长治人,博士,主要从事生态系统功能研究。E-mail:songyali19851205@sina.com

the areas of forestland and shrub land, and the conversion of farmland to forest and shrub land can be carried out, so as to slow down and prevent the soil erosion in the red soil hilly area of Yunnan Province.

Keywords:land-use types; nitrogen and phosphorus losses; runoff; red soil hilly area

水土流失是当今世界最严重的生态环境问题之一,不仅导致耕地肥力退化,加剧了江河湖库淤积和洪涝灾害,也对国民经济建设造成深远的影响^[1-2]。云南省属于我国水土流失二级敏感区,雨季(每年 5—10 月)雨量充沛,水土流失以水力侵蚀为主,水土流失面积为 1.05×10^5 km²,占土地总面积的 27.33%;年均土壤流失总量 4.81 万 t,年均侵蚀深 0.93 mm^[3]。由于降雨特征^[4]、植被覆盖类型^[5]以及经营措施^[6]的不同造成流域水土流失及面源污染程度不同,而降雨产生的径流氮磷流失特征则因土地利用类型不同而存在较大差异。武定县位于云南省红壤丘陵区,水土流失较为严重,被列为重点监督区和重点治理区。因此,关于红壤丘陵区坡耕地的径流氮磷流失特征的研究备受关注。近年来,国内外不少研究学者对径流氮磷流失特征进行了研究分析,但结果也不尽相同。常松果等^[7]在次降雨条件下研究不同土壤管理措施对径流及氮磷流失的影响中认为,紫色丘陵区地表施用聚丙烯酰胺或绿肥后,径流量低于施用腐殖酸或无任何管理措施,且施用聚丙烯酰胺、绿肥或腐殖酸可显著降低氮磷流失量;向速林等^[8]的研究表明,赣江下游不同土地利用类型间林地和蔬菜地径流量高于水田,而氮磷质量浓度则表现为蔬菜地>水田>林地;李吉平等^[9]在洪泽湖地区麦稻两熟农田和杨树林地氮磷径流流失特征的研究中,结果为杨树林地氮磷流失量小于农田,全年 TN,TP 流失量仅为农田的 22.61%和 0.81%,与农田相比,林地能够更好地控制径流养分流失。

以上研究区的研究较为广泛,然而,针对云南省红壤丘陵区氮磷流失的研究远远落后于其他地区,尤其是对该区域自然降雨条件下不同土地利用类型径流特征及氮磷流失差异的研究鲜有报道。因此,本文选择云南红壤丘陵区猛果河仓房小流域武定县为研究区,分别设置 3 种土地利用类型(林地、灌草地、农地)的样方,对自然降雨条件下样方的土壤理化性质、基本概况进行调查,定量监测 2018 年自然降雨条件下雨季(5—10 月)降雨过程中径流量、氮磷流失的形

态、质量浓度、流失量及动态变化特征,以期为云南省红壤丘陵地区土壤侵蚀状况改善及水土流失综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于滇中猛果河仓房小流域武定县高桥镇,地处北纬 25°20′—26°11′,东经 101°55′—102°29′。县域面积 3 322 km²,全镇面积 404.6 km²,海拔 1 920 m,属低纬高原季风气候区。最高气温在 7 月,月平均温度 20.7℃;最冷月在 1 月,月平均气温 7.4℃;年平均气温 15℃,年降雨量 800~1 200 mm,气候干湿季节明显,每年 5—10 月为雨季,降雨量占全年的 80%~90%;11 月至次年 5 月为旱季,立体气候明显。气温年较差小,日较差大;降水丰沛,干湿季分明;气候垂直变化显著,类型多样;雨热同季,大陆性强。研究区内耕地面积 174.52 km²^[10],占总面积的 5.25%;林地面积 1 814 km²,占总面积的 54.61%。

1.2 研究方法

1.2.1 样方的布设 选取具有代表性的 3 种土地利用类型林地、灌草地及农地,分别布设 3 组水平样方(面积为 1 m×1 m),各样方四周用铁皮隔开,相隔均大于 2 m,以防径流在各样方之间渗漏。在样方下部设置导管和塑料桶,雨季每一场自然降雨后的田面径流通过导管流入塑料桶中。每个样方径流入水口高度保持一致。每个处理 3 个重复,各样方随机排列。

于 2018 年 4 月对所有样方的地理位置、坡度、坡向、植被覆盖度等进行调查,并采集所有样方表层土壤,用于测定土壤背景值。试验区 0—20 cm 的土壤背景值分别为:全氮 1 370 mg/kg、碱解氮 55.63 mg/kg、全磷 1 110 mg/kg、有效磷 68 mg/kg。2018 年生长季,林地和灌草地为自然生长;农地中种植作物为玉米,根据当地农民农事习惯施基肥和追肥,基肥氮磷钾比例为 10:1:16,追肥氮磷钾比例为 22:0:9,施肥量折合纯氮为 180.7 kg/hm²,折合纯磷为 67.1 kg/hm²。各样方的基本情况见表 1。

表 1 不同土地利用类型样方基本概况

土地利用类型	土壤类型	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	林龄	植被 盖度%	树高/ m	胸径/ cm	主要植物种类
林地	红壤	1980	6	南	20	80	10~15	13.1~22.3	云南松、华山松、滇油杉、黄杉、榿栎等
灌草地	红壤	1971	5	南	—	70	2	—	紫茎泽兰、扭黄茅、鬼针草等
农地	红壤	1965	7	东南	—	30	—	—	玉米

1.2.2 样品的采集与测定 在 2018 年 5 月至 10 月的 4 场具有较大径流的自然降雨条件下,将样方内泥沙与水样混匀,进行不同深度多点采样,并将各水样转入干净的矿泉水瓶中,取 500 ml 径流样品,将样品 4℃ 保存,并在 24 h 内过滤后测定其中的总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、磷酸根(PO₄⁻-P)含量。各样方保持原有地貌。

降雨量采用自计雨量计进行观测(武定县气象局),径流量用体积法测定。参照《地表水环境质量标准》(GB3838—2002),水样中 TN 采用过硫酸钾(K₂S₂O₈)氧化—紫外分光光度法测定,NO₃⁻-N 采用酚二磺酸分光光度法测定,NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法测定,颗粒态氮(PN)使用差减法(即用测定出总氮与溶解态氮相减)得出;TP 和 PO₄⁻-P 采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法测定^[11]。以上测定各个指标均做 3 组平行试验,取平均值。

1.2.3 数据处理与分析 本文采用 Excel 2010 进行数据处理和图表绘制,数据采用 SPSS 22.0 进行方差分析,方差分析采用最小显著性差异(LSD)法,检验不同降雨量、降雨强度和不同土地利用类型下径流量和氮磷养分流失量的差异性。

表 2 试验地各样方 4 场降雨特征及径流特征

日期(月-日)		7-20	7-27	8-05	8-19
降雨量/mm		50.9	29.7	29.9	45.9
降雨强度/(mm·h ⁻¹)		8.5	13.2	10.4	8.7
径流量/(kg·m ⁻²)	林地	6.23±0.35cA	5.04±0.18bB	1.95±0.11cC	6.90±0.55bA
	灌草地	7.82±0.56bA	3.34±0.33cC	5.34±0.23bB	7.30±0.19bA
	农地	8.53±0.18aA	8.16±0.09aA	8.73±0.36aA	8.92±0.11aA

注:不同小写字母表示同一时间不同土地利用类型下径流量差异显著($p<0.05$),不同大写字母表示同一土地利用类型不同降雨时间径流量差异显著($p<0.05$)。

2.2 不同土地利用类型径流中各形态氮素质量浓度特征

从图 1 可以看出,不同土地利用类型在各降雨条件下 TN,NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 质量浓度均值表现为林地(3.20,2.08,0.50 mg/L)<灌草地(4.09,2.57,0.58 mg/L)<农地(4.95,3.16,0.88 mg/L),3 种土地利用类型间差异显著($p<0.05$),农地分别为林地的 1.54,1.51,1.75 倍。不同降雨条件下,农地 TN,NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 质量浓度均高于其他土地利用类型,说明农地显著增加了径流中不同形态氮的质量浓度。随着时间的持续,不同土地利用方式下各形态氮素质量浓度并未表现出显著的降低趋势。3 种土地利用类型 TN 质量浓度持续高于 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中规定 TN 的Ⅴ类标准 2 mg/L。

地表径流中氮素的主要存在形式包括溶解态氮和颗粒态氮(PN),由于溶解态氮中亚硝态氮所占比

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型降雨及径流特征

表 2 为试验地 5 月至 10 月的 4 场典型降雨及径流特征。根据我国气象部门规定的降雨强度标准,大雨和暴雨分别为 12 h 雨量≥15~29.9,30 mm,或 24 h 雨量≥25~49.9,50 mm 的降雨。选取的 4 场降雨中,7 月 27 日和 8 月 5 日属于大雨,7 月 20 日和 8 月 19 日属于暴雨。总体来看,随着降雨量和降雨强度的增大,不同土地利用类型下各样方的径流量呈增大的趋势。对次降雨降雨量与径流量进行相关分析,相关系数依次为林地(0.649)、灌草地(0.848)、农地(0.528),降雨强度与径流量相关系数依次为林地(0.927)、灌草地(0.998)、农地(0.785)。不同土地利用类型下径流量平均值在 8 月 19 日达到峰值(7.71 L/m²),为 8 月 5 日的 1.44 倍,而此时降雨量达 45.9 mm。不同土地利用类型总径流量表现为:林地(20.12 L/m²)<灌草地(23.80 L/m²)<农地(34.34 L/m²),农地最高,分别为林地和灌草地的 1.71,1.44 倍;各土地利用类型的变异系数在 0.14~0.64,差异较大。

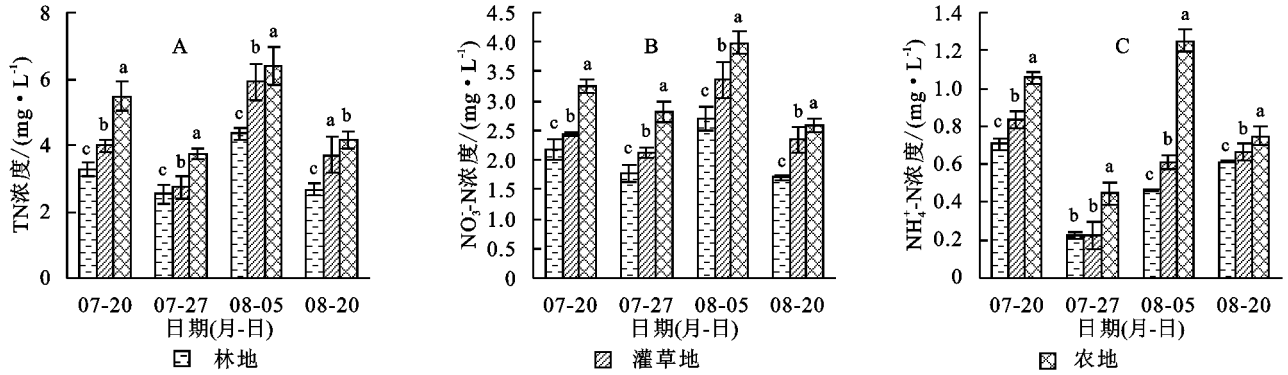
例很小,故用硝态氮和铵态氮之和表示溶解态氮,PN 由总氮减溶解态氮得到^[12]。由图 2A 可以看出,不同土地利用类型下 NO₃⁻-N 占 TN 质量浓度的比例为 56.81%~77.41%,对径流中氮素质量浓度有直接影响,为溶解态氮的主要组成部分,均值表现为灌草地<农地<林地。NH₄⁺-N 仅占 TN 质量浓度的 8.16%~22.95%(图 2B),均值表现为灌草地<林地<农地,不同土地利用类型下 NO₃⁻-N 的比例为 NH₄⁺-N 的 3.77~4.50 倍。而 PN 所占 TN 质量浓度的比例变化幅度为 11.65%~32.84%(图 2C)。综上说明溶解态氮是径流水体中氮素污染的主要污染物,其中 NO₃⁻-N 为径流氮素流失的主要形态。

2.3 不同土地利用类型径流中各形态磷素质量浓度特征

由图 3A 和 3B 可以看出,4 场降雨不同土地利用类型下 TP 和 PO₄⁻-P 质量浓度分别在 2.09~7.69,1.28~

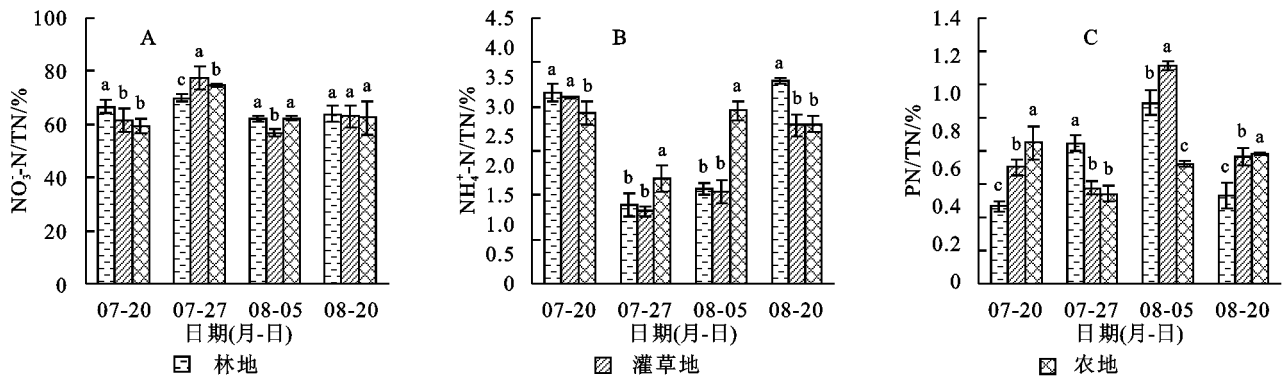
4.43 mg/L 之间,TP 质量浓度均值表现为林地(3.43, 1.95 mg/L)<灌草地(4.33,2.57 mg/L)<农地(5.82,3.61 mg/L),农地 TP 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 质量浓度最高,为林地的 1.70,1.85 倍。不同降雨条件下,农地 TP 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 质量浓度均高于其他土地利用类型,说明农地显著增加了径流中不同形态磷的质量浓度。随着时间的持续,不同土地利用方式下各形态磷素质量浓度逐渐增加,不同时间

下 TP 质量浓度均高于 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中规定 TP 的 V 类标准 0.4 mg/L。由图 3C 可以看出,不同土地利用类型下 $\text{PO}_4\text{-P}$ 占 TP 质量浓度的比例为 50.12%~76.64%,说明径流 TP 输出主要以溶解态磷为主。随着时间的持续, $\text{PO}_4\text{-P}$ 占 TP 比例呈波动式下降的趋势,且时间越长,下降幅度越高; $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$ 均值表现为林地<灌草地<农地。



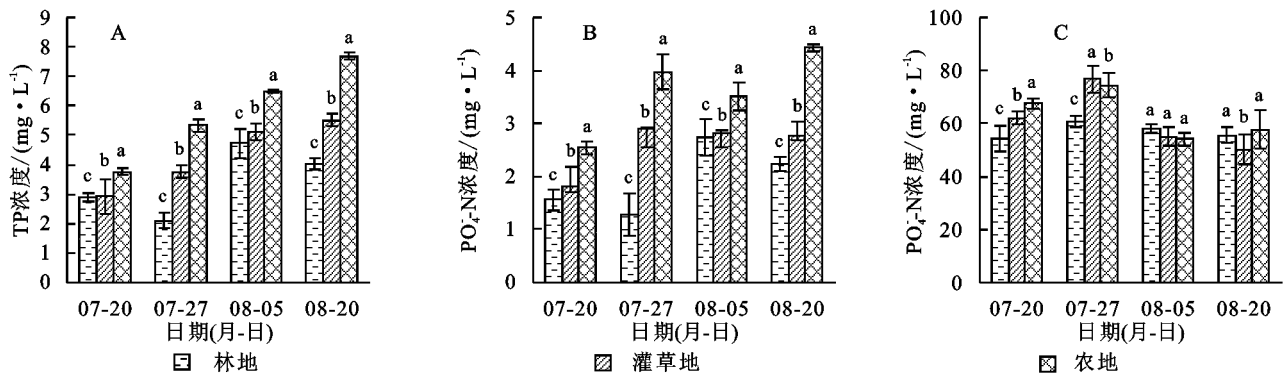
注:图中 TN, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分别表示径流中总氮质量浓度、硝态氮质量浓度和铵态氮质量浓度;图中不同小写字母表示同一时间不同土地利用类型下差异显著($p < 0.05$),下同。

图 1 不同土地利用类型对径流中各形态氮素质量浓度的影响



注:图中 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{TN}$, $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 和 PN/TN 分别表示径流中硝态氮与总氮比值、铵态氮与总氮比值以及颗粒态氮与总氮比值。

图 2 不同土地利用类型对径流 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{TN}$, $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ 及 PN/TN 的影响



注:图中 TP, $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$ 分别表示径流中总磷质量浓度、磷酸根质量浓度及磷酸根与总磷质量浓度比值。

图 3 不同土地利用类型对径流各形态磷素质量浓度及 $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$ 的影响

2.4 不同土地利用类型氮磷流失量特征

图 4 为不同土地利用类型对径流 TN(图 4A)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (图 4B)和 $\text{NH}_4\text{-N}$ (图 4C)流失量的影响。7 月 20 日、7 月 27 日、8 月 5 日和 8 月 20 日不同土地

利用类型下 TN 流失量分别为 20.32~46.71, 9.16~30.72, 8.49~55.79, 18.40~37.05 mg/m^2 ; $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量分别为 13.56~27.75, 7.09~22.94, 5.27~34.79, 11.74~23.11 mg/m^2 ; $\text{NH}_4\text{-N}$ 流失量分别为

4.39~9.02, 0.75~3.63, 0.91~10.92, 4.22~6.68 mg/m^2 。4 场降雨不同土地利用类型下 TN 流失总量表现为:林地($59.96 \text{ mg}/\text{m}^2$)<灌草地($98.92 \text{ mg}/\text{m}^2$)<农地($170.28 \text{ mg}/\text{m}^2$),各土地利用类型的变异系数为 0.56,差异性显著($p<0.05$)。NO₃⁻-N 流失

量占 TN 的比例为 56.81%~77.41%,总量表现为林地($39.50 \text{ mg}/\text{m}^2$)<灌草地($61.21 \text{ mg}/\text{m}^2$)<农地($108.59 \text{ mg}/\text{m}^2$);NH₄⁺-N 流失量占 TN 的 8.16%~22.95%,总量表现为林地($10.65 \text{ mg}/\text{m}^2$)<灌草地($15.41 \text{ mg}/\text{m}^2$)<农地($30.25 \text{ mg}/\text{m}^2$)。

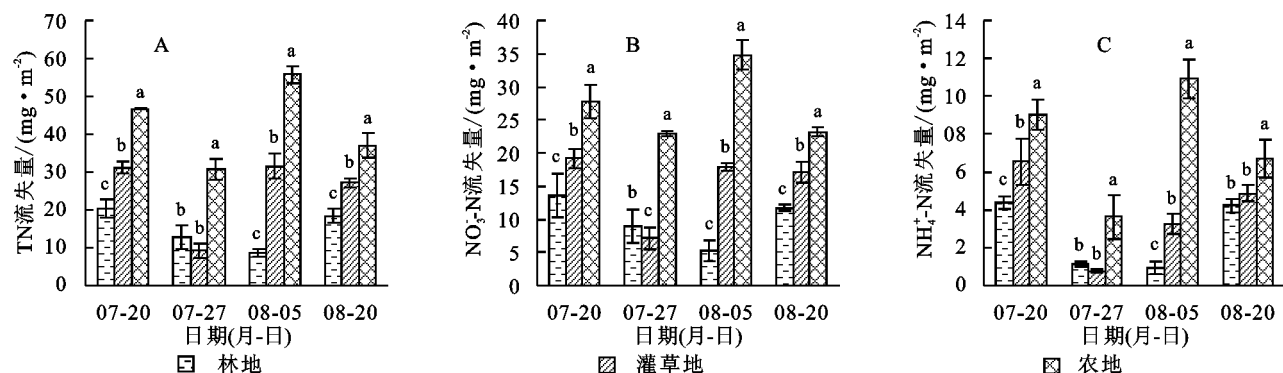


图 4 不同土地利用类型对不同形态氮素流失量的影响

由图 5 可以看出,7 月 20 日、7 月 27 日、8 月 5 日和 8 月 20 日各处理下 TP 流失量分别为 17.93~22.85, 10.55~43.55, 9.22~56.70, 27.77~68.58 mg/m^2 ;PO₄⁻-P 流失量分别为 9.74~21.69, 6.44~32.42, 5.33~30.66, 15.42~39.53 mg/m^2 。4 场降雨不同土地利用类型 TP

流失总量表现为:林地($65.47 \text{ mg}/\text{m}^2$)<灌草地($102.95 \text{ mg}/\text{m}^2$)<农地($200.94 \text{ mg}/\text{m}^2$),各土地利用类型的变异系数为 0.59,差异性显著($p<0.05$);PO₄⁻-P 流失量占 TP 的比例为 56.41%~61.86%,总量表现为林地($36.93 \text{ mg}/\text{m}^2$)<灌草地($58.98 \text{ mg}/\text{m}^2$)<农地($124.30 \text{ mg}/\text{m}^2$)。

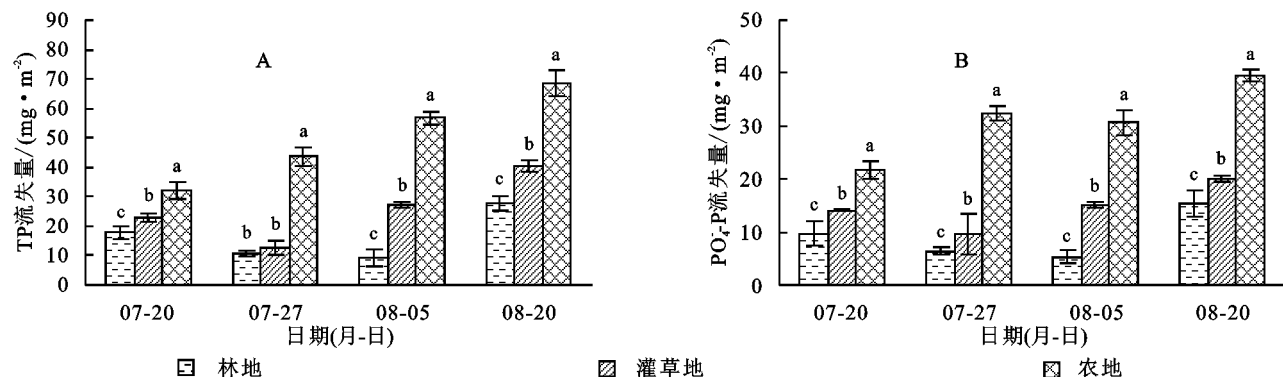


图 5 不同土地利用类型对不同形态磷素流失量的影响

3 讨论

降雨是流域产流的先决条件,地表径流是面源污染物流失的主要途径,径流量的多少取决于降雨、土地利用方式和植被特征^[5,13]。以往在降雨特征对地表径流影响的研究中,不同地区、不同试验条件下的降雨量、降雨强度对地表径流的影响程度差异较大。林锦阔等^[14]对自然荒坡、种植荞麦、野生牧草和种植花生 4 类不同土地利用类型次降雨因子和径流量相关分析得出,各径流小区的径流量与降雨量具有很好的相关性($p<0.01$);樊登星等^[15]认为灌草坡面径流小区的径流量与最大 30 分钟雨强相关性显著。本研究中,不同土地利用类型下径流量与降雨量、降雨强度均呈正相关,径流量因不同土地利用类型分异规律明显,表现为林地($20.12 \text{ L}/\text{m}^2$)<灌草地($23.80 \text{ L}/$

m^2)<农地($34.34 \text{ L}/\text{m}^2$)。林地和灌草地径流量低于农地,说明林地和灌草地比农地具有更好的拦蓄降雨的能力。这是由于林地和灌草地土壤的渗透性较好,活地被物能够增加地表水入渗,减小地表径流;而农地受人为和自然因素双重影响,土壤结构稳定性差,持水能力较小,径流量相对较大。王国重等^[16]在丹江口水库水源区不同土地利用类型径流量的研究中,认为 6 种雨强的平均径流量均为坡耕地>梯田>荒草地>乔木林>灌草地,同样说明林地和灌草地土壤具有良好的保水保土效果,其径流量小于其他土地利用类型。除此之外,植被盖度也为影响径流量的重要因素之一,研究表明,径流量与植被盖度之间表现出显著的负相关关系,即植被盖度越高,径流量越小^[17]。本研究中,林地的植被多为乔木,地表植被结构较为复杂,覆盖度达 80%,林冠截留效果较好;灌草地也

由低矮灌木和草本植物覆盖,秸秆密集、可有效覆盖地表,覆盖度为 70%,可有效减小地表径流;而农地盖度仅为 30%,且耕作较为频繁,土壤经常受到扰动,其降雨径流量相对较高。

不同土地利用类型在次降雨条件下的氮磷质量浓度差异变化明显。本研究中,不同土地利用类型下 TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TP 和 PO_4^- -P 质量浓度均值均表现为林地<灌草地<农地,农地分别为林地的 1.54、1.51、1.75、1.70、1.85 倍。不同降雨条件下,农地氮磷质量浓度均高于其他土地利用类型,原因是农地常年施用大量的氮磷肥,径流氮磷质量浓度较高,加之施肥频繁,翻耕及灌溉等农事活动加速了土壤侵蚀及表土氮磷流失,对周边水体造成富营养化的风险较高。而林地和灌木林的外部养分输入较低,受到的人工干扰较小,其径流氮磷质量浓度也较低。本研究中,滇中猛果河仓房小流域不同土地利用类型地表径流中不同形态氮磷质量浓度并未随时间的持续表现出下降的趋势,在研究期间溶解态氮是径流水体中氮素污染的主要污染物,其中 NO_3^- -N 为径流氮素流失的主要形态(56.81%~77.41%), NH_4^+ -N 占比较低,仅占 TN 质量浓度的 8.16%~22.95%,这主要是由于在一定坡度下,雨季径流流量、流速大,氮的硝化作用加强^[18]。这与陈安强等^[19]和金春玲等^[1]的研究结果一致。但李国栋等^[20]认为 NH_4^+ -N 占可溶态氮的 50%,是太湖地区菜地径流输出的主要形式, NO_3^- -N 仅占 30%,这可能是由于太湖地区为平原河网区,沟渠径流水流不畅,造成的厌氧环境不利于氮的硝化。本研究中,不同土地利用类型下径流 TP 输出主要以溶解态磷为主(PO_4^- -P/TP 为 50.12%~76.64%),为径流中主要的磷形态。这与 Yang 等^[21]和金春玲等^[1]的研究结果一致。但不同土地利用类型下 TP 质量浓度均远超出了水体富营养化的磷素阈值(0.02 mg/L),对周边水体富营养化的威胁不容忽视。

不同土地利用类型径流中氮磷流失量差异明显,土地利用方式不同,产生的径流量和氮磷质量浓度不同,导致径流中氮磷输出量差异明显。本研究中,不同土地利用类型下 TN 和 TP 流失总量表现为:林地(59.96 和 65.47 mg/m²)<灌草地(98.92, 102.95 mg/m²)<农地(170.28, 200.94 mg/m²)。农地氮磷流失量高于林地和灌草地,这是由于农地施肥量相对较高,从而使得土壤表层残留的氮磷质量浓度相对较高,加之耕作、播种、除草和收割对于土壤结构具有破坏性的影响^[22],有利于径流冲刷,径流量较高,大量

氮磷随土壤进入水体,故而农地降雨地表径流中流失的氮磷质量浓度也较高;而林地和灌草地具有减缓氮磷流失作用,水土保持功能较好,特别是林地氮磷流失量最低。向速林等^[23]在赣江下游不同土地利用类型降雨径流氮磷输出的研究中表明,氮磷的污染负荷均以林地<旱地<水田,林地在降雨径流时携带的氮磷负荷量为最低。李晓娜等^[24]的研究同样表明,灌木林植被覆盖度较高可促进土壤团粒结构形成,土壤入渗状况改善,使土壤抗侵蚀和保水能力得到增强,从而降低土壤氮磷淋溶和地表径流迁移的可能性。本研究中不同土地利用类型 TP 流失量总体上高于 TN 流失量,这是由于磷素进入地表径流中的方式主要为径流冲刷淋洗,TP 中占比较高的 PO_4^- -P 极易随径流流失,而相对磷素而言,TN 中颗粒态氮可通过植物茎秆拦截,渗透到土壤中,并被土壤固定吸附在土壤中,减少氮素流失。值得注意的是,不同土地利用类型的氮磷流失量并未随时间的持续而降低,原因可能是林地和灌草地土壤表层氮磷含量较高,降雨径流发生后土壤表层氮磷仍有大量残留;而农地在作物收获后(9 月)地表呈现出裸地状态,地表覆盖度低,加之此期间有降雨不断产生,而大量养分还存在于土壤表面,极易加剧氮磷的径流流失以及土壤侵蚀。

综上,滇中猛果河仓房小流域试验监测期间处于小流域雨季,雨热同期,且径流量与降雨量及降雨强度呈显著正相关,径流量受土地利用类型影响较大。3 种不同土地利用类型中,农地氮磷流失规律较为复杂,应是该流域不同土地利用类型中氮磷流失的重点控制对象;而林地和灌草地均能有效减少径流氮磷流失,降低氮磷流失量,保持水土,表现出了良好的水土保持效益,其中林地的氮磷流失量最低,水土保持效果最好。因此,为了减少该流域氮磷流失量,减小发生水体富营养化的概率:一方面可以通过在流域内增加林地和灌草地面积,开展退耕还林还草工程,以减缓和防治云南红壤丘陵区水土流失;另外,在农地的实际耕作中,可通过调整滇中猛果河仓房小流域沿线土地利用类型,氮、磷肥施用量,施用频次及耕作方式等措施来减少径流量、降低氮磷流失质量浓度;第三,在农地中,要尽量减少或避免雨季的农事活动,提高肥料利用率和适量减少氮磷的输出。通过改变土地利用类型,加强林草植被保护和建设,提高现有植被质量和覆盖率,减轻水土流失强度,可实现云南红壤丘陵区生态环境的明显改善及水资源的可持续利用。

4 结 论

(1) 不同土地利用类型下径流量与降雨量和降雨强度呈显著正相关,总径流量表现为:林地(20.12 L/m^2) $<$ 灌草地(23.80 L/m^2) $<$ 农地(34.34 L/m^2),各土地利用类型的变异系数在 $0.14 \sim 0.64$ 之间,差异较大;

(2) 不同土地利用类型在各降雨条件下 TN , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度均值表现为林地($3.20, 2.08, 0.50 \text{ mg/L}$) $<$ 灌草地($4.09, 2.57, 0.58 \text{ mg/L}$) $<$ 农地($4.95, 3.16, 0.88 \text{ mg/L}$), TP 和 $\text{PO}_4^- - \text{P}$ 质量浓度均值表现为林地($3.43, 1.95 \text{ mg/L}$) $<$ 灌草地($4.33, 2.57 \text{ mg/L}$) $<$ 农地($5.82, 3.61 \text{ mg/L}$);溶解态氮磷是径流水体中氮磷污染的主要污染物,其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^- - \text{P}$ 为径流氮磷流失的主要形态($56.81\% \sim 77.41\%$ 和 $50.12\% \sim 76.64\%$);

(3) 不同土地利用类型下 TN 和 TP 流失总量表现为:林地(59.96 和 65.47 mg/m^2) $<$ 灌草地($98.92, 102.95 \text{ mg/m}^2$) $<$ 农地($170.28, 200.94 \text{ mg/m}^2$),各土地利用类型的变异系数为 $0.56, 0.59$, 差异性显著。为了减少该流域氮磷流失量,可通过在流域内增加林地和灌草地面积,开展退耕还林还草工程,以减缓和防治云南红壤丘陵区水土流失。

参考文献:

- [1] 金春玲,高思佳,叶碧碧,等.洱海西部雨季地表径流氮磷污染特征及受土地利用类型的影响[J].环境科学研究,2018,31(11):1891-1899.
- [2] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.
- [3] 云南省水利厅.云南省水利厅关于云南省 2015 年水土流失调查结果的公告[R].云南省水利厅,2017.
- [4] 乔闪闪,吴磊,彭梦玲.人工模拟降雨条件下黄土坡面水—沙—氮磷流失特征[J].环境科学研究,2018,31(10):1728-1735.
- [5] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产生产沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.
- [6] 杨世琦,邢磊,刘宏元,等.松干流域不同种植模式对坡耕地土壤氮磷流失的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(3):61-69.
- [7] 常松果,胡雪琴,史东梅,等.不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征[J].水土保持学报,2016,30(5):34-40.
- [8] 向速林,陶术平,王逢武.不同土地利用类型降雨径流氮

磷特征分析:以赣江下游地区为例[J].人民长江,2015,46(16):80-82.

- [9] 李吉平,徐勇峰,陈子鹏,等.洪泽湖地区麦稻两熟农田和杨树林地氮磷径流流失特征研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2019,43(1):102-108.
- [10] 韦宇,李秀寨,普晓莉.武定县耕地面积变化与经济发展关系研究[J].农村经济与科技,2015,26(3):17-19.
- [11] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [12] 宋娅丽,王克勤,董莉,等.滇中烤烟坡耕地地表径流氮素的动态变化特征[J].水土保持学报,2010,24(4):7-11.
- [13] 胡雪琴,蒋平,彭旭东,等.紫色丘陵区不同土地利用类型径流泥沙及氮磷流失特征[J].水土保持学报,2015,29(2):35-39.
- [14] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):7-12,19.
- [15] 樊登星,余新晓,贾国栋,等.北京山区灌草坡面水土流失特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(2):24-28.
- [16] 王国重,李中原,田颖超,等.雨强和土地利用类型对豫西南山区产流产沙的影响[J].武汉大学学报:工学版,2017,50(2):24-28.
- [17] 谢颂华,莫明浩,涂安国,等.自然降雨条件下红壤坡面径流垂向分层输出特征[J].农业工程学报,2014,30(19):132-138.
- [18] 何军,崔远来,王建鹏,等.不同尺度稻田氮磷排放规律试验[J].农业工程学报,2010,26(10):56-62.
- [19] 陈安强,雷宝坤,刘宏斌,等.洱海近岸不同种植类型农田沟渠径流氮磷流失特征[J].生态与农村环境学报,2017,33(8):697-705.
- [20] 李国栋,胡正义,杨林章,等.太湖典型菜地土壤氮磷向水体径流输出与生态草带拦截控制[J].生态学杂志,2006,25(8):905-910.
- [21] Yang J L, Zhang G L, Shi X Z, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus losses in ephemeral runoff processes by typical storm events in Sichuan basin, Southwest China [J]. Soil and Tillage Research, 2009,105(2):292-299.
- [22] 张华淦,王克勤,宋娅丽,等.滇中尖山河小流域不同土地利用类型土壤活性有机碳分布特征[J].水土保持研究,2019,26(3):16-21.
- [23] 向速林,陶术平,王逢武.赣江下游同样地降雨径流氮磷污染负荷估算[J].生态科学,2016,35(2):62-65.
- [24] 李晓娜,张国芳,武美军,等.不同植被过滤带对农田径流泥沙和氮磷拦截效果与途径[J].水土保持学报,2017,31(3):39-44,50.