

# 滇中尖山河流域不同土地利用类型产流及氮磷流失特征

苏孟白, 王克勤, 宋娅丽, 张雨鉴

(西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224)

**摘 要:**地表径流造成土壤养分流失及土地生产力衰退, 径流产生特征与土地利用类型密切相关, 深入研究其作用机制可为水土流失治理、流域内水体保护及氮磷迁移规律提供科学依据。以滇中尖山河流域不同土地利用类型(人工林、灌木林、次生林、坡耕地)为研究对象, 定量监测了 2017 年雨季(5 月—10 月)降雨过程中产流量、氮磷流失的形态、浓度、流失量及动态变化特征。结果表明: (1) 随着降雨量的增大, 不同土地利用类型下径流小区的径流量逐渐增大, 降雨量与径流量之间相关性显著, 各径流小区径流量均表现为: 灌木林<次生林<人工林<坡耕地; (2) 不同土地利用类型在各降雨条件下 TN 和 TP 浓度分别表现为: 人工林(2.39 mg/L)<次生林(2.63 mg/L)<灌木林(2.64 mg/L)<坡耕地(4.00 mg/L)、灌木林(2.53 mg/L)<次生林(4.07 mg/L)<人工林(5.72 mg/L)<坡耕地(6.47 mg/L), 坡耕地显著增加了径流中不同形态氮磷的浓度; (3) 溶解态氮磷是径流水体中氮磷污染的主要污染物, 其中  $\text{NO}_3^-$ -N 为径流氮素流失的主要形态,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 占 TP 浓度的比例为 50.91%~77.87%; (4) TN, TP 总流失量均表现为: 灌木林(0.76, 0.61 mg/m<sup>2</sup>)<次生林(1.04, 1.65 mg/m<sup>2</sup>)<人工林(1.36, 3.60 mg/m<sup>2</sup>)<坡耕地(7.91, 15.12 mg/m<sup>2</sup>)。为了减缓尖山河流域水体污染问题, 可调整尖山河流域沿线土地利用类型, 在降雨前应减少和避免农事活动, 增加灌木林地面积, 在流域出口处布设灌木林来减少流域氮磷的流失。

**关键词:**土地利用类型; 氮磷流失; 产流; 尖山河流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)05-0024-08

## Characteristics of Runoff, Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Types in Jianshan River Basin in Middle Yunnan Province

SU Mengbai, WANG Keqin, SONG Yali, ZHANG Yujian

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

**Abstract:** Surface runoff causes soil nutrient loss and land productivity decline, and runoff generation characteristics are closely related to land use types. In-depth study of its mechanism can provide scientific basis for soil erosion control, water body protection in the watershed and nitrogen and phosphorus migration rules. In this study, different land use types (plantation, bush, secondary forest, slope farmland) in Jianshan river basin in middle Yunnan Province were selected as the research study sites, and runoff plots with a horizontal projection area of 5 m×20 m were arranged. The runoff amount, patterns of nitrogen and phosphorus loss, concentrations, loss amount and dynamic change characteristics during the rainy season of 2017 (May to October) were qualitatively monitored. The results showed that: (1) with the increase of rainfall, the runoff amount of each plots under different land use types gradually increased, and there was a significant correlation between rainfall and runoff amount; the runoff amount in each plot increased in the order: bush<secondary forest<plantation forest<slope farmland; (2) the TN and TP concentrations in different land use types under the condition of rainfall increased in the order: plantation forest (2.39 mg/L)<secondary forest (2.63 mg/L)<bush (2.64 mg/L)<slope farmland (4.00 mg/L), and bush (2.53 mg/L)<secondary forest (4.07 mg/L)<plantation forest (5.72 mg/L)<slope farmland (6.47 mg/L), the concentrations of different forms of nitrogen and phosphorus in runoff significantly increased in slope farmland; (3) dissolved nitrogen

收稿日期: 2019-08-09

修回日期: 2019-11-21

资助项目: 云南省重点研发计划(2018BC001); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(050005113111); 国家林草局林业科技创新平台运行项目“云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站”(2019132161)

第一作者: 苏孟白(1996—), 男, 云南人, 硕士研究生, 主要从事生态恢复研究。E-mail: 1176111495@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

and phosphorus were the main pollutants of pollution in runoff water,  $\text{NO}_3^-$ -N was the main form of nitrogen loss in runoff, and  $\text{PO}_4^{3-}$ -P accounted for 50.91%~77.87% of TP concentration; (4) the total loss of TN and TP increased in the order: bush (0.76 and 0.61  $\text{mg}/\text{m}^2$ ) < secondary forests (1.04 and 1.65  $\text{mg}/\text{m}^2$ ) < plantation forest (1.36 and 3.60  $\text{mg}/\text{m}^2$ ) < slope farmland (7.91 and 15.12  $\text{mg}/\text{m}^2$ ). Therefore, in order to alleviate water pollution in Jianshan river basin, the land use type along Jianshan river basin should be adjusted, agricultural activities should be reduced and avoided before rainfall; bush forest area should be increased, bush forest should be set at the outlet of the basin to reduce nitrogen and phosphorus loss in the basin.

**Keywords:** land-use types; nitrogen and phosphorus losses; runoff; Jianshan river watershed

地表径流造成的土壤养分流失在水力侵蚀区是土地生产力衰退的主要原因,同时也是农业非点源污染的重要发生形式<sup>[1]</sup>。降雨造成的水土流失致使富集的氮、磷等养分汇入水体,直接导致水体富营养化和水质退化,同时增加了水体的环境负荷和风险<sup>[2]</sup>。径流携带的泥沙使部分营养元素发生迁移,淤积河道,堵塞汇流口造成更多损失。地表径流的产生特征与土地利用类型密切相关<sup>[3]</sup>,土地利用类型对流域土壤和植被氮磷固定、径流氮磷输出等均有重要影响<sup>[4]</sup>,从而使不同土地利用类型条件下产流量、氮磷含量及氮磷流失量均有一定的差异,深入研究其作用机制能更好地分析不同土地利用类型养分流失过程。

目前对小流域不同土地利用类型下氮磷流失的研究主要集中于降雨特征<sup>[5-6]</sup>、土壤理化性质<sup>[7]</sup>、地形地貌<sup>[8]</sup>、植被覆盖变化<sup>[9]</sup>以及人为管理措施<sup>[10]</sup>对氮磷输出空间分布特征、径流污染物效应等方面的影响<sup>[3]</sup>。沈奕彤等<sup>[11]</sup>在降雨历时对黑土坡面养分流失的影响中得出,降雨历时是影响黑土坡面溶质迁移以及产流产沙的重要因素,降雨历时越长,表土氮磷流失越严重;李晓娜等<sup>[12]</sup>在植被过滤带对径流的有效拦截试验中显示了植物过滤带对径流平均拦截率达53%;马星等<sup>[13]</sup>对四川省遂宁水土保持试验站紫色土的长期监测中认为,不同雨型下坡度导致的植被和土壤物理性质的差异也是坡地土壤侵蚀不同的主要原因;向速林等<sup>[14]</sup>的研究表明,赣江下游不同土地利用类型(水田、旱地、林地和其他地)降雨径流氮磷污染负荷中,水田最高(分别为10 732.91, 1 071.65 t/a),林地最低。

上述研究偏向于分析影响因素对径流及养分流失、氮磷输出后的空间运移、污染负荷及小尺度的措施影响,但在滇中尖山河流域选择具有代表性的土地利用类型研究不同产流及氮磷输出迁移特征的相关研究较少。尖山河流域作为抚仙湖的一级支流和重要汇流流域之一,其流域内不同土地利用类型产流所携带的氮、磷等元素将直接影响湖内水体状况,农业面源污染的治理是小流域生态环境建设亟待解决的问题<sup>[4]</sup>。因此,本研究在滇中尖山河流域设置了不同

土地利用类型(人工林、灌木林、次生林、坡耕地)的径流小区,对自然降雨条件下径流小区的土壤理化性质、基本概况进行调查,定量监测2017年雨季(5—10月)降雨过程中产流量、氮磷流失的形态、浓度,单位面积地表径流氮磷流失量及动态变化特征,旨在为水土保持措施的效益评价、水土流失治理、流域内水体保护及流域内大尺度的氮磷元素产出、迁移规律提供合理的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于珠江南北盘江上游岩溶区域的云南省中部玉溪市澄江县尖山河流域,为抚仙湖的一级支流。地处北纬 $24^{\circ}32'00''$ — $24^{\circ}37'38''$ ,东经 $102^{\circ}47'21''$ — $102^{\circ}52'02''$ ,流域总面积35.42  $\text{km}^2$ ,海拔1 722.0~2 347.4 m,相对高差625.4 m,立体气候明显。尖山河流域多年平均降雨量1 050 mm。干湿季分明,雨季为5月下旬至10月下旬,降雨量占全年总降雨量的75%,旱季为11月上旬至次年5月中旬,降雨量占全年降雨量的25%。暴雨多出现在雨季,多年平均洪峰流量为36  $\text{m}^3/\text{s}$ 。年均蒸发量为900 mm。流域内的土壤主要是红紫泥土和红壤。研究区内耕地面积1 174.6  $\text{hm}^2$ ,占总面积的33.2%;坡耕地347.1  $\text{hm}^2$ ,坡耕地占总耕地面积的29.6%;林地面积1 697.5  $\text{hm}^2$ ,占总面积的47.9%,其中人工林941  $\text{hm}^2$ ,灌木林339.8  $\text{hm}^2$ ,次生林413.4  $\text{hm}^2$ 。

### 1.2 研究方法

1.2.1 径流小区的布设 根据滇中尖山河流域特点,选取具有代表性的4种土地利用类型人工林、灌木林、次生林及坡耕地分别布设水平投影面积为5 m×20 m的径流小区。于2017年4月对所有径流小区的地理位置、坡度、坡向、植被覆盖度进行调查,并采集所有径流小区表层土壤,用于测定土壤背景值。2017年生长季,人工林、灌木林和次生林为自然生长;坡耕地中种植作物为烤烟,品种为K326,由玉溪市烟草公司统一调入,根据当地农民农事习惯施基

肥、提苗肥和追肥,基肥与提苗肥氮磷钾比例为 12 : 6 : 24,提苗肥氮磷钾比例为 28 : 0 : 5,施肥量折合纯氮为 202.5 kg/hm<sup>2</sup>,折合纯磷为 91.8 kg/hm<sup>2</sup>。各径流小区的基本情况见表 1。

表 1 不同土地利用类型径流小区基本概况

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	主要植物种类
人工林	红壤	1788	18.58	西南	15	65	7	云南松、桉树、紫茎泽兰等
灌木林	红壤	1790	20.84	南	—	95	2	紫茎泽兰、扭黄茅、鬼针草等
次生林	红壤	1787	20.62	西北	20	90	9	云南松、旱冬瓜、紫茎泽兰等
坡耕地	红壤	1773	17.82	西南	—	20~30	—	玉米、豌豆、烤烟

1.2.2 样品的采集与测定 在 2017 年 5 月至 10 月的 6 场具有较大产流的自然降雨条件下,将径流小区径流池内泥沙与水样混匀,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(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)、磷酸根(PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P)含量。在流域内设有雨量计,记录试验期间的降雨量与降雨强度,各径流小区保持原有地貌。

降雨量采用自计雨量计进行观测,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(K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)氧化—紫外分光光度法测定,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用酚二磺酸分光光度法测定,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-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 PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P 采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法测定。以上测定各个指标均做 3 组平行试验,取平均值。

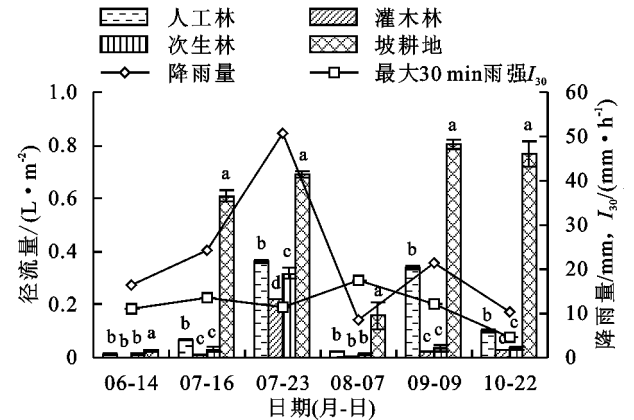
1.2.3 数据处理与分析 本文采用 Excel 2016 进行数据处理和图表绘制,并采用 SPSS 25.0 软件对研究区降雨量、降雨特征和不同土地利用类型滇中红壤产流产沙、氮磷流失量进行差异性分析,相关性分析采用皮尔逊双尾相关性分析法,方差分析采用最小显著性差异(LSD)法。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用类型降雨及产流特征

2017 年 5 月至 10 月共观测记录产流的降雨事件共 20 场,期间降雨量为 826.2 mm,占全年降雨量的 85.87%,从中选取了 6 场具有明显产流的降雨,不同土地利用类型下各径流小区产流量如图 1。根据我国气象部门规定的降雨强度标准,小雨、中雨、大雨和暴雨分别为 12 h 雨量≥5,5~14.9,15~29.9,30 mm,或 24 h 雨量≥10,10~24.9,25~49.9,50 mm 的降雨。选取的 6 场降雨中,6 月 14 日、8 月 7 日和 10 月 22 日均属于中雨(降雨量分别为 16.4,8.7,10.2 mm),7 月 16 日和 9 月 9 日属于大雨(降雨量分别为

24.2,21.6 mm),7 月 23 日属于暴雨(降雨量为 50.8 mm)。总体来看,随着降雨量的增大,不同土地利用类型下径流小区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后,得到相关系数依次为人工林(0.538)、灌木林(0.985)、次生林(0.994)、坡耕地(0.158),即表明降雨量与径流量相关性高于最大 30 min 雨强(I<sub>30</sub>)与径流量相关性。不同土地利用类型下径流量平均值在 7 月 23 日达到峰值(0.39 L/m<sup>2</sup>),为 6 月 14 日的 27.4 倍,而此时降雨量达 50.8 mm。各径流小区总径流量表现为:灌木林(0.29 L/m<sup>2</sup>)<次生林(0.44 L/m<sup>2</sup>)<人工林(0.91 L/m<sup>2</sup>)<坡耕地(3.06 L/m<sup>2</sup>),坡耕地最高,分别为灌草丛、次生林、人工林的 10.58,6.90,3.37 倍;各土地利用类型的变异系数范围在 0.57~1.43,差异较大。



注:图中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( $p < 0.05$ )。

图 1 试验地各径流小区 6 场降雨特征及产流特征

### 2.2 不同土地利用类型径流中各形态氮素流失浓度特征

从图 2 可以看出,不同土地利用类型在各降雨条件下 TN 流失浓度均值表现为人工林(2.39 mg/L)<次生林(2.63 mg/L)<灌木林(2.64 mg/L)<坡耕地(4.00 mg/L),人工林、次生林与灌木林间无显著差异( $p < 0.05$ ),坡耕地为人工林的 1.67 倍;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度表现为次生林(1.43 mg/L)<人工林(1.52 mg/L)<灌木林(1.58 mg/L)<坡耕地(2.26 mg/L),灌木林与人工林无显著差异,坡耕地为次生林的 1.58 倍;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度表现为人工林(0.58 mg/L)<灌木林

(0.67 mg/L) < 次生林 (0.70 mg/L) < 坡耕地 (1.12 mg/L), 灌木林、人工林与次生林间无显著差异, 坡耕地为人工林的 1.94 倍。不同降雨条件下, 坡耕地氮素流失浓度均高于其他土地利用类型, 说明坡耕地显著增加了径流中不同形态氮的浓度。随着时间的持续, 不同土地利用方式下各形态氮素浓度变化趋势一致, 均呈明显的降低趋势。坡耕地 TN 浓度直到 9 月 9 日才降低到 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中规定的总氮 V 类标准 2 mg/L。

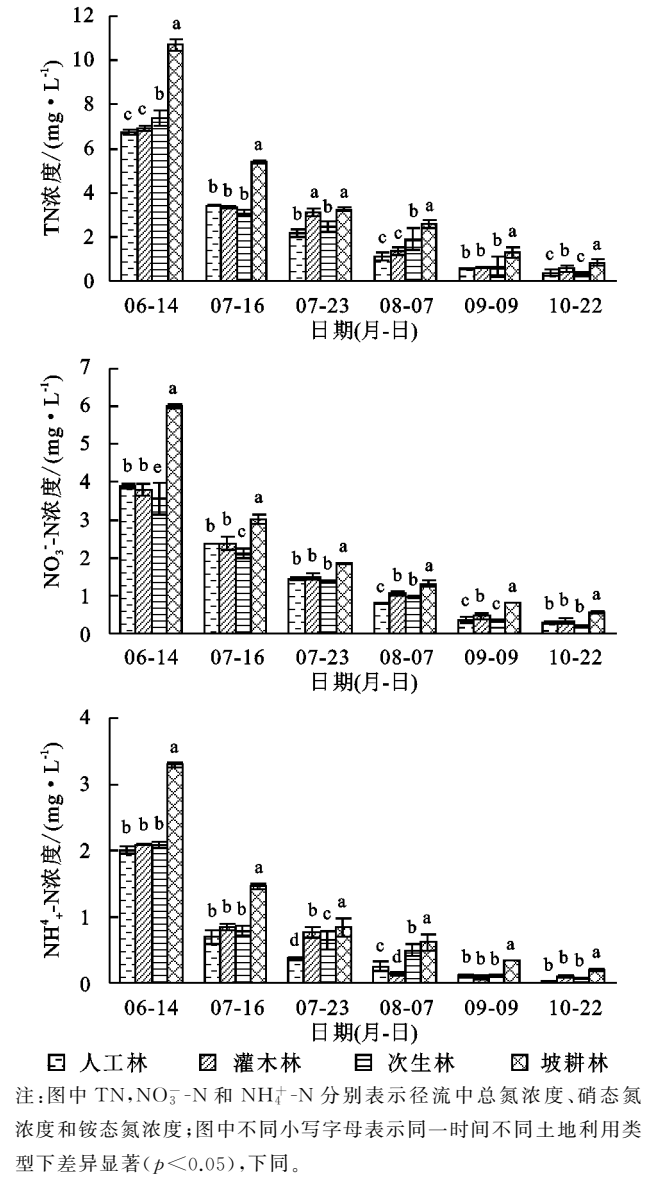
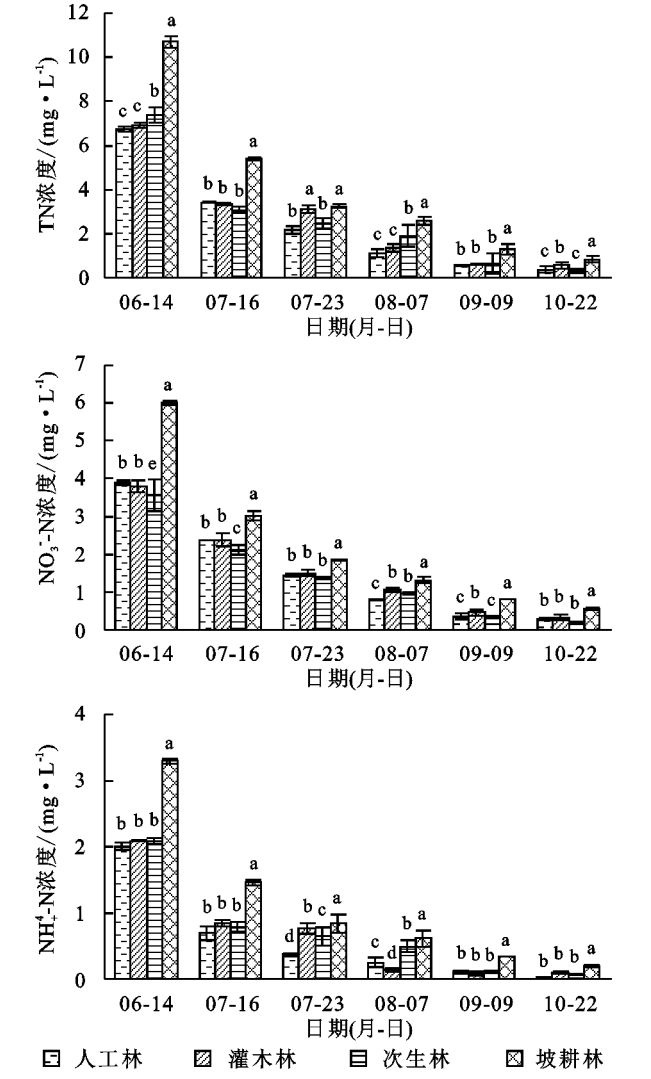


图 2 不同土地利用类型对径流中各形态氮素流失浓度的影响

溶解态氮和颗粒态氮(PN)为地表径流中氮素的主要存在形式, 由于亚硝态氮在溶解态氮中所占比例很小, 故溶解态氮为硝态氮和铵态氮之和, PN 为总氮减溶解态氮得到<sup>[15]</sup>。由图 3 可以看出, 不同土地利用类型下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 占 TN 浓度的比例为 56.10%~74.73%, 对径流中氮素浓度有直接影响, 为溶解态氮的主要组成部分, 均值表现为坡耕地 < 次生林 < 灌木

林 < 人工林。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 仅占 TN 浓度的 9.63%~34.91%, 均值表现为人工林 < 次生林 < 坡耕地 < 灌木林, 不同土地利用类型下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的比例为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的 1.67~7.76 倍。而 PN 所占 TN 浓度的比例变化幅度为 4.28%~27.65%, 说明溶解态氮是径流水体中氮素污染的主要污染物, 其中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为径流氮素流失的主要形态。



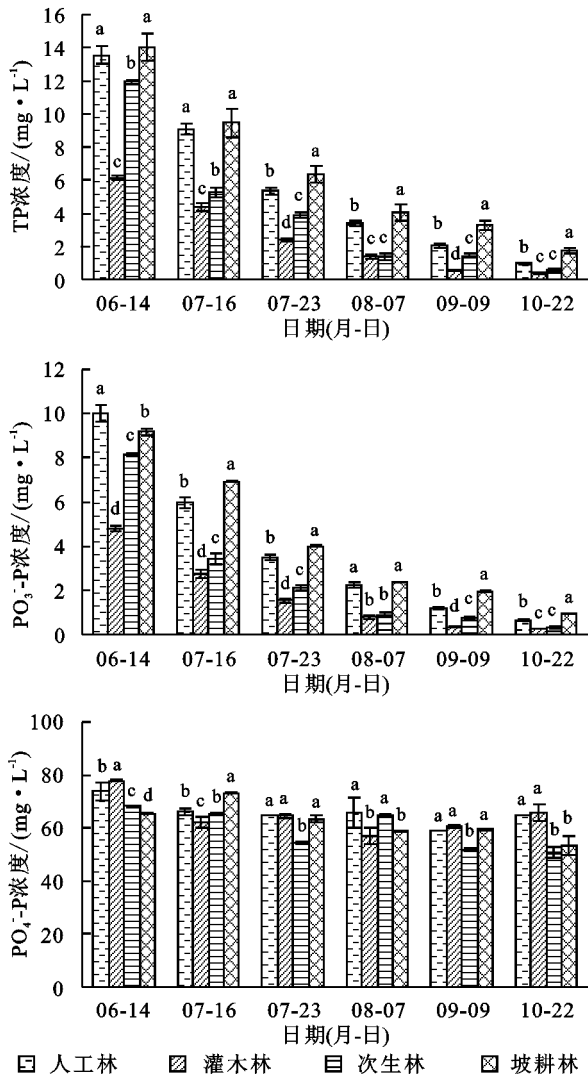
注: 图中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/TN 和 PN/TN 分别表示径流中硝态氮与总氮比值、铵态氮与总氮比值以及颗粒态氮与总氮比值。

图 3 不同土地利用类型对径流 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/TN 及 PN/TN 的影响

### 2.3 不同土地利用类型径流中各形态磷素流失浓度特征

由图 4 可以看出, 6 场降雨不同土地利用类型下 TP 和 PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P 浓度范围分别在 0.39~14.02, 0.25~9.18 mg/L, TP 浓度均值表现为灌木林 (2.53 mg/L) < 次生林 (4.07 mg/L) < 人工林 (5.72 mg/L) < 坡耕地 (6.47 mg/L), 坡耕地 TP 流失浓度最高, 为人工林的 2.56 倍; PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P 浓度表现为灌木林 (1.73 mg/L) < 次生林 (2.60 mg/L) < 人工林 (3.92 mg/L) < 坡耕地

(4.23 mg/L),坡耕地为灌木林的 2.44 倍。不同降雨条件下,坡耕地磷素流失浓度均高于其他土地利用类型,说明坡耕地显著增加了径流中不同形态磷的浓度。随着时间的持续,不同土地利用方式下各形态磷素浓度变化趋势一致,均呈明显的降低趋势,但在 10 月 22 日总磷浓度仍高于 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中规定的总磷 V 类标准 0.4 mg/L。不同土地利用类型下  $\text{PO}_4\text{-P}$  占 TP 浓度的比例为 50.91%~77.87%,说明径流总磷输出主要以溶解态磷为主。施肥后 4 次降雨中,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; $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$  均值表现为次生林<坡耕地<灌木林<人工林。



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浓度、磷酸根浓度及磷酸根与总磷浓度比值。

图 4 不同土地利用类型对径流各形态磷素流失浓度及  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$  的影响

## 2.4 不同土地利用类型氮磷流失量特征

图 5 为不同土地利用类型对径流 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$  (图 5B) 和  $\text{NH}_4\text{-N}$  流失量的影响。6 月 14 日、7 月 16 日、7 月 23 日、8 月 7 日、9 月 9 日和 10 月 22 日不

同土地利用类型下 TN 流失量分别为 0.01~0.30, 0.04~3.28, 0.68~2.24, 0.01~0.41, 0.01~1.03, 0.02~0.65  $\text{mg}/\text{m}^2$ ;  $\text{NO}_3\text{-N}$  流失量分别为 0.004~0.17, 0.03~1.83, 0.33~1.28, 0.01~0.21, 0.01~0.65, 0.01~0.43  $\text{mg}/\text{m}^2$ ;  $\text{NH}_4\text{-N}$  流失量分别为 0.002~0.09, 0.01~0.89, 0.17~0.58, 0.001~0.10, 0.002~0.27, 0.002~0.15  $\text{mg}/\text{m}^2$ 。6 场降雨 TN 不同土地利用类型下总流失量表现为:灌木林(0.76  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<次生林(1.04  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<人工林(1.36  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<坡耕地(7.91  $\text{mg}/\text{m}^2$ ),各土地利用类型的变异系数为 1.24,差异性显著( $p<0.05$ )。  $\text{NO}_3\text{-N}$  流失量占 TN 的比例为 48.46%~80%,总量表现为灌草林(0.39  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<次生林(0.59  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<人工林(0.90  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<坡耕地(4.57  $\text{mg}/\text{m}^2$ );  $\text{NH}_4\text{-N}$  流失量占 TN 的 9.71%~30.82%,总量表现为灌草林(0.13  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<人工林(0.26  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<次生林(0.27  $\text{mg}/\text{m}^2$ )<坡耕地(2.08  $\text{mg}/\text{m}^2$ )。

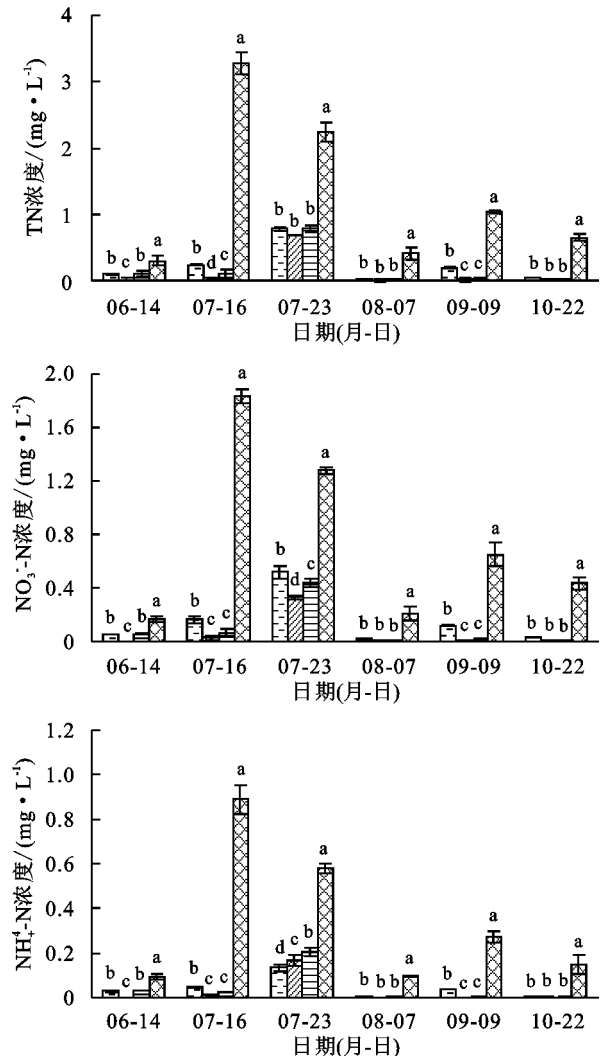


图 5 不同土地利用类型对不同形态氮素流失量的影响

由图 6 可以看出,6 月 14 日、7 月 16 日、7 月 23

日、8月7日、9月9日和10月22日各处理下 TP 流失量分别为 0.01~0.39, 0.05~5.76, 0.52~4.36, 0.01~0.64, 0.01~2.63, 0.01~1.34 mg/m<sup>2</sup>; PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P 流失量分别为 0.005~0.26, 0.03~4.22, 0.34~2.77, 0.005~0.38, 0.01~1.56, 0.01~0.72 mg/m<sup>2</sup>。6 场降雨不同土地利用类型 TP 总流失量表现为: 灌木林 (0.61

mg/m<sup>2</sup>) < 次生林 (1.65 mg/m<sup>2</sup>) < 人工林 (3.60 mg/m<sup>2</sup>) < 坡耕地 (15.12 mg/m<sup>2</sup>), 各土地利用类型的变异系数为 1.28, 差异性显著 ( $p < 0.05$ ); PO<sub>4</sub><sup>-</sup>-P 流失量占 TP 的比例为 50.99%~78.69%, 总量表现为灌木林 (0.39 mg/m<sup>2</sup>) < 次生林 (0.94 mg/m<sup>2</sup>) < 人工林 (2.33 mg/m<sup>2</sup>) < 坡耕地 (9.90 mg/m<sup>2</sup>)。

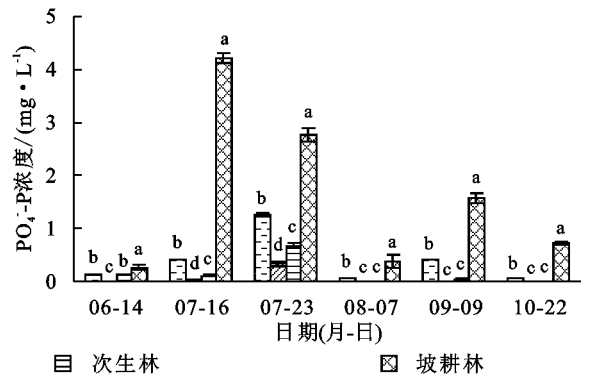
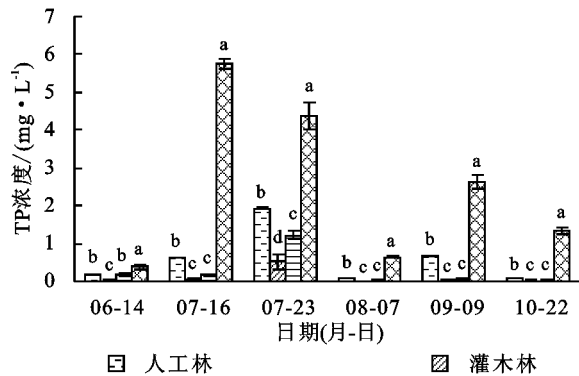


图6 不同土地利用类型对不同形态磷素流失量的影响

### 3 讨论

#### 3.1 不同土地利用类型下产流特征

降雨量、土地利用类型是影响降雨径流的关键因素<sup>[16]</sup>。随着降雨量的增大,滇中尖山河流域不同土地利用类型下的径流量呈增大的趋势,降雨量与不同土地利用类型下径流量呈显著性相关。这是由于随着降雨量的增大,降雨量超过土壤的实际入渗能力,导致土壤透水能力下降,土壤含水率饱和,导致更多的降雨形成地表径流<sup>[17-18]</sup>。人工林、灌木林、次生林下降雨量与径流量相关系数较高,而坡耕地下相关系数较低。这是由于除降雨量外,径流量还与地表植被覆盖、土壤前期含水量等因素有关,人工林、灌木林、次生林在生长期,植被覆盖度差异较小,径流量主要受到降雨量的影响,两者相关系数较高;而研究期间坡耕地下不同降雨场次农作物(烤烟)的生长期和地表覆盖度差异较大,土壤前期含水量也不同,导致相关系数较低。

本研究中,不同土地利用类型下径流量的大小排序为灌木林(0.29 L/m<sup>2</sup>) < 次生林(0.44 L/m<sup>2</sup>) < 人工林(0.91 L/m<sup>2</sup>) < 坡耕地(3.06 L/m<sup>2</sup>)。坡耕地径流量最高的原因是坡耕地的耕作较为频繁,土壤经常受到扰动,其降雨产流量相对较大;人工林(约 15 a 生)地表植被结构较为复杂,覆盖度较高(65%),入渗与滞留效应较高,且地表土壤疏松,其产流量较坡耕地低;次生林(约 20 a 生)较人工林植被覆盖度高(90%),结构更为复杂,主要通过凋落物阻碍径流,降低流速,从而环流和分流,并能通过植物根系作用维

持土壤良好的渗透性,增加入渗率,从而减少地表径流量;灌木林中植物生长迅速、秸秆密集、可有效覆盖地表,植被盖度达 95%,通过改变坡面的微地形减缓坡度,从而改变径流的产生过程,降低径流量,并显著拦截地表径流,因此其产流量较小。

#### 3.2 不同土地利用类型下径流氮磷流失浓度特征

径流是氮磷流失的主要源动力<sup>[19]</sup>,不同土地利用类型地表覆盖影响着降雨径流的产流过程及特征<sup>[20]</sup>,导致径流中的氮磷浓度差异较大。本研究中,径流 TN 浓度表现为人工林(2.39 mg/L) < 次生林(2.63 mg/L) < 灌木林(2.64 mg/L) < 坡耕地(4.00 mg/L),TP 浓度表现为灌木林(2.53 mg/L) < 次生林(4.07 mg/L) < 人工林(5.72 mg/L) < 坡耕地(6.47 mg/L)。坡耕地由于常年施用大量的氮磷肥,耕作、施肥频次均较高,导致氮磷流失浓度较高,TN 和 TP 流失浓度达到 4.00, 6.47 mg/L,对周边水体造成富营养化的风险也较高。这也可能是滇中尖山河流域水质总氮总磷含量偏高的重要原因之一,今后应加强这方面的防治工作和研究。灌木林、次生林和人工林由于受到人工干扰较小,外部养分输入较低,能显著降低径流量及氮磷流失浓度,其径流氮磷流失浓度显著低于坡耕地。同样李晓娜等<sup>[12]</sup>研究中黑麦草、偃麦草和无芒雀麦对径流及氮磷的拦截效果中也表明植被过滤带使氮磷入渗量大于植物秸秆直接拦截量。

随着时间的持续,不同土地利用方式下各形态氮磷浓度均呈明显的降低趋势。在降雨初期,径流水体冲刷了坡耕地的表层土壤,溶解了大量的溶解态与颗粒态的氮磷,氮磷浓度相对较高;随着降雨的持续,表

层疏松的土壤逐渐被冲刷,土壤中残存的氮磷量逐渐降低,导致降雨后期径流水体中氮磷浓度呈下降趋势。灌木林、次生林和人工林由于旱季凋落物分解作用,使土壤表面氮磷聚积,降雨后氮磷浓度随着时间的持续呈下降趋势。在不同形态氮素流失中, $\text{NO}_3^-$ -N 所占比重最高(56.10%~74.73%),其次为  $\text{NH}_4^+$ -N (9.63%~34.91%),最低的为 PN 颗粒态氮(4.28%~27.65%)。说明不同土地利用类型中氮素流失均以溶解态氮为主,特别是溶解态氮中的硝态氮,比重均超过 50%;不同土地利用类型中坡耕地溶解态氮流失比例最高,达到总氮的 84.47%。不同土地利用类型下径流中磷素流失表现出相同的特征,即径流磷素流失主要以溶解态为主, $\text{PO}_4^-$ -P/TP 均值为 50.91%~77.87%,坡耕地  $\text{PO}_4^-$ -P/TP 比值较低,说明坡耕地颗粒态磷含量较高,施入土壤的磷很快被吸附到土壤颗粒表面或与土壤物质作用形成难溶性磷,对农业面源污染贡献较大。沈连峰等<sup>[21]</sup>和左继超等<sup>[22]</sup>在河南省淮河流域不同土地利用类型磷素流失特征及红壤坡地磷素输出中得出同样的结论。综上,坡耕地随径流流失的总磷平均浓度均远远超出了水体富营养化的磷素阈值(总磷 0.02 mg/L),对周边水体富营养化的威胁不容忽视。

### 3.3 不同土地利用类型下径流氮磷流失量特征

地表径流中养分流失量受两方面的影响,一是径流量,二是径流中的养分浓度<sup>[23]</sup>。本研究中,不同土地利用类型径流量和氮磷流失浓度均为人工林、次生林和灌木林<坡耕地,径流氮、磷流失量表现为灌木林(0.76,0.61 mg/m<sup>2</sup>)<次生林(1.04,1.65 mg/m<sup>2</sup>)<人工林(1.36,3.60 mg/m<sup>2</sup>)<坡耕地(7.91,15.12 mg/m<sup>2</sup>),这表明灌木林、次生林、人工林具有控制氮磷流失作用,水土保持功能较好,特别是灌木林由于植被覆盖度较高(95%),其径流氮磷流失量最低。同样,李晓娜等<sup>[12]</sup>研究表明,灌木林减少氮磷流失的驱动力来源于植被覆盖度较高的直接效应,植被覆盖度高可促进土壤团粒结构形成<sup>[24]</sup>,改善土壤入渗,减小水流流速,增强土壤抗侵蚀和保水能力,从而降低土壤氮素淋溶和地表径流迁移氮素可能性。Pansak 等<sup>[25]</sup>认为植被(香根草、新银叶合欢)的种植改变了氮磷的迁移途径,氮磷由地表径流损失转变为渗漏,从而降低地表径流氮磷流失量。

本研究中不同土地利用类型磷素流失量总体上高于氮素流失量,说明磷素主要通过径流冲刷淋洗的方式进入地表径流中,总磷中占比较高的磷酸根极易随径流

流失,而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。不同土地利用类型径流磷素流失量中水溶性磷为总磷的 52.02%~78.69%。常松果等<sup>[10]</sup>在不同土壤管理措施下坡耕地磷素流失特征中的结果也表明,全磷流失量为 77.9 mg,水溶性磷流失量为 64.4 mg,水溶性磷流失量占比为 85.24%;曾立雄等<sup>[3]</sup>对三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征的研究结果中,茶园、柑橘园和竹林正磷酸盐流失量占全磷的 90%。不同土地利用类型下氮磷流失量并未随着时间的推移而逐渐降低,如 9 月 9 日和 10 月 22 日坡耕地氮磷流失量仍较大,原因为 8 月底坡耕地中烤烟已收获,植被覆盖度较低,产流量较大,导致氮磷流失量较高;而此时人工林、灌木林和次生林中植物茎叶可有效削弱雨滴动力,改变降雨再分配,减少地表径流,降低表层土壤氮磷向径流迁移,而表层以下的土壤养分很难向表层径流迁移,从而减小氮磷流失量。

滇中尖山河流域径流量受土地利用类型影响较大,4 种不同土地利用类型中,坡耕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;而灌木林、次生林和人工林均能有效减少径流氮磷流失,其中灌木林的氮磷流失量最低,水土保持效果最好。因此,为了减缓尖山河流域水体污染问题,减小发生水体富营养化的概率:一方面在实际耕作中,可通过调整尖山河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、降低氮磷流失浓度;其次,降雨径流是径流氮磷流失的重要原因,在降雨前应特别注意减少和避免那些会加剧径流氮磷流失的农事活动;第三,可以通过在流域内增加灌木林地面积,在流域出口处布设灌木林等措施来减少流域氮磷的流失。同时,今后需要更加系统地开展野外坡耕地径流小区不同种植模式对比试验研究,以防止土壤质量退化,寻求减少水土流失及减少氮磷输出的科学途径,以期对滇中尖山河流域多尺度水土养分流失模拟与控制提供参考。

## 4 结论

(1) 滇中尖山河流域 4 种不同土地利用类型 TN,TP 总流失量差异性显著,均表现为坡耕地最高:灌木林(0.76,0.61 mg/m<sup>2</sup>)<次生林(1.04,1.65 mg/m<sup>2</sup>)<人工林(1.36,3.60 mg/m<sup>2</sup>)<坡耕地(7.91,15.12 mg/m<sup>2</sup>)。坡耕地应为该流域氮磷流失的重点控制对象,而灌木林的氮磷流失量最低,水土保持效果最好。

(2) 各降雨条件下 TN 和 TP 浓度分别表现为: 人工林(2.39 mg/L) < 次生林(2.63 mg/L) < 灌木林(2.64 mg/L) < 坡耕地(4.00 mg/L), 灌木林(2.53 mg/L) < 次生林(4.07 mg/L) < 人工林(5.72 mg/L) < 坡耕地(6.47 mg/L) 坡耕地显著增加了径流中不同形态氮磷的浓度。

(3) 不同土地利用类型下降雨量与径流量呈显著性相关, 各径流小区径流量均表现为: 灌木林 < 次生林 < 人工林 < 坡耕地; 径流氮素流失中溶解态氮为氮素主要污染物,  $\text{NO}_3^-$ -N 与  $\text{NH}_4^+$ -N 占 TN 浓度的比例为 72.35%~95.72%, 其中  $\text{NO}_3^-$ -N 为径流氮素流失的主要形态; 径流总磷输出主要以溶解态磷为主,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 占 TP 浓度的比例为 50.91%~77.87%。

(4) 为减缓滇中尖山河流域水体污染问题, 可通过调整尖山河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, 在降雨前注意减少和避免农事活动, 和在流域出口处布设灌木林等措施来减少流域氮磷的流失。今后应对不同种植模式下坡耕地径流及氮磷流失开展相关研究, 将是防治坡耕地土壤质量退化及减少水土流失的主要方向。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3390-3396.
- [4] 宋娅丽, 王克勤. 滇中坡耕地农田生态系统中氮素平衡特征[J]. 水土保持学报, 2010, 024(1): 150-154.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 张泽宇, 李占斌, 李鹏, 等. 汉江小流域土壤氮素空间分布特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 46-52, 58.
- [8] 陈志良, 程炯, 刘平, 等. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 30-33.
- [9] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 等. 植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 195-201.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 朱磊, 田军仓, 孙晓磊. 基于全耦合的地表径流与土壤水分运动数值模拟[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 322-330.
- [18] 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] 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.
- [20] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 28-34.
- [21] 沈连峰, 苗蕾, 韩敏, 等. 河南省淮河流域不同土地利用类型氮磷流失的特征分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 77-80.
- [22] 左继超, 郑海金, 奚同行, 等. 自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4178-4186.
- [23] 陈静蕊, 刘佳, 王惠明, 等. 保护性耕作措施对陡坡地养分流失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018, 000(1): 146-152.
- [24] 杨永辉, 武继承, 赵世伟, 等. 不同保墒与土壤结构改良措施对土壤结构及小麦、玉米水分利用的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 220-227.
- [25] Pansak W, Hilger T H, Dercon G, et al. Changes in the relationship between soil erosion and N loss pathways after establishing soil conservation systems in uplands of Northeast Thailand[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 128(3): 167-176.