

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.026.

苏孟白, 王克勤, 宋娅丽, 等. 退耕还林措施对滇中尖山河坡地氮磷流失的削减效应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 154-162.

SU Mengbai, WANG Keqin, SONG Yali, et al. Reduction Effect of Returning Farmland to Forest on the Losses of Nitrogen and Phosphorus on the Slope of the Jianshan River in Central Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 154-162.

退耕还林措施对滇中尖山河坡地氮磷流失的削减效应

苏孟白¹, 王克勤¹, 宋娅丽¹, 洪利达²

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 2.云南省澄江市水利局, 云南 澄江 652500)

摘要: [目的]探究滇中尖山河流域退耕还林措施下不同地类侵蚀性降雨、氮磷流失浓度、流失量的动态变化特征,对评价退耕还林生态工程对流域水体保护和面源污染的削减效应具有重要的指导意义。[方法]选择抚仙湖湖区典型流域尖山河小流域为研究区,以流域内退耕还林/坡耕地、人工林、灌木林和次生林为研究对象,对流域不同土地利用类型径流小区进行连续三年(2017—2019年)雨季(5—10月)定量监测。[结果]退耕还林后年侵蚀性降水量和年径流量分别降低37.16%和42.75%,产流量降低95.88%和94.29%。各态氮磷输出浓度分别削减:总氮34.32%、硝态氮32%、铵态氮61%、总磷73.4%和磷酸盐70.4%;各态氮磷输出量分别减少了总氮70.40 mg/m²、硝态氮41.24 mg/m²、铵态氮20.56 mg/m²、总磷162.16 mg/m²和磷酸盐107.38 mg/m²,削减率分别为:79.29%、80.48%、88.20%、95.66%和97.06%。未退耕还林前坡耕地总氮、硝态氮、铵态氮、总磷和磷酸盐年均输出浓度分别为其他地类的156.80%、149.57%、173.15%、157.42%和153.82%,退耕还林后分别降至139.00%、117.66%、108.08%、123.18%和92.29%,虽仍高于流域其他地类,但削减和控制效应已逐年增加。[结论]在滇中尖山河流域进行退耕还林植被恢复,有效改善了流域面源污染和水土流失现状,为临湖流域水环境治理提供了科学依据和数据支持。

关键词: 氮磷削减; 退耕还林; 尖山河流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0154-09

Reduction Effect of Returning Farmland to Forest on the Losses of Nitrogen and Phosphorus on the Slope of the Jianshan River in Central Yunnan

SU Mengbai¹, WANG Keqin¹, SONG Yali¹, HONG Lida²

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2.Water Conservancy Bureau of Chengjiang, Chengjiang, Yunnan 652500, China)

Abstract: [Objective] It is of great guiding significance for evaluating the reduction effect of the ecological project of returning farmland to forests on the protection of water environment and non-point source pollution in the river watershed to explore the dynamic change characteristics of erosive rainfall, nitrogen and phosphorus loss concentrations and loss amounts of different land types under the measures of returning farmland to forests in the Jianshan River watershed of central Yunnan Province. [Methods] Jianshan River watershed, a typical watershed in Fuxian Lake area, was selected as the study area. The main research objects were returning farmland to forest/sloping farmland, artificial forest, shrub forest and secondary forest in the watershed. Through quantitative monitoring in the different land use type runoff area in rainy season (May—October) for three consecutive years (2017—2019), the concentration, amount and dynamic characteristics of erosive rainfall, nitrogen and phosphorus losses were studied. [Results] The annual erosive precipitation and annual runoff after returning farmland to forests decreased by 37.16% and 42.75%, respec-

收稿日期: 2022-03-21

修回日期: 2022-04-17

资助项目: 云南省科技计划项目(202203AC100001-03); 云南省科技计划重点研发项目(2018BB018); 云南省大学生创新创业训练计划项目(202010677047); 云南省水土保持监测站网玉溪尖山河小流域水土保持监测站点

第一作者: 苏孟白(1998—), 男, 云南禄丰人, 硕士研究生, 主要从事生态恢复研究。E-mail: sumengbai980728@163.com

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

<http://stbcyj.paperonce.org>

tively. Runoff decreased by 95.88% and 94.29%, respectively. The export concentrations of total nitrogen, nitrate, ammonium nitrogen, total phosphorus, and phosphate reduced by 34.32%, 32%, 61%, 73.4% and 70.4%, respectively. The non-point source pollutant outputs of for TN, NO_3^- -N, NH_4^+ -N, TP and PO_4^{3-} -P decreased 70.40 mg/m², 41.24 mg/m², 20.56 mg/m², 162.16 mg/m², and 107.38 mg/m², respectively. The reduction rates were 79.29%, 80.48%, 88.20%, 95.66% and 97.06%, respectively. The output concentrations of TN, NO_3^- -N, NH_4^+ -N, TP and PO_4^{3-} -P of slope farmland before conversion were 156.80%, 149.57%, 173.15%, 157.42% and 153.82% of those of other land use types, respectively. After two years, they were 139.00%, 117.66%, 108.08%, 123.18% and 92.29% respectively, which were still higher than those of other land use types in the watershed, but the reduction and control effects on nitrogen and phosphorus had increased year by year. [Conclusion] The restoration of farmland to forests in the Jianshan River watershed has effectively improved the status of non-point source pollution and soil erosion in the watershed, and provided scientific basis and data support for the governance of the water environment in the lakeside watershed.

Keywords: nitrogen and phosphorus reduction; conversion of cropland to forestland; Jianshan River watershed

氮、磷不仅是植物生长发育所必须的大量营养元素,其含量及组分也是流域和湖泊水体富营养化关键限制性因子^[1-2]。降雨、土地利用类型、植被覆盖类型及人类活动等因素将直接或间接地影响流域水分循环^[3]。森林对面源污染物的调控体现在森林植被体系与土壤生态系统的二元过程中,面源污染物的阻控效应多发生在地表附近的慢速径流转化、地下植被根系生长固定和土壤颗粒及团聚体多孔介质吸附的过程中^[4]。退耕还林措施被认为可削减地表径流,控制氮、磷元素溶解和输送,以抑制流域面源污染的发展^[5]。

目前国内外针对流域退耕还林措施相关研究主要集中于流域面源污染特征^[6]、污染物时空过程关系^[7]、植被恢复污染物削减效应等^[8]小尺度、点状及模拟性的研究^[9]。如胡彦婷等^[10]在黄土丘陵沟壑区10°及20°退耕还林地(沙棘和油松林地)与坡耕地相比污染物输出数量分别削减了64.85%和88.80%;吴东等^[11]认为退耕还林后86.84%的林地保有量使 NH_4^+ -N输出浓度削减49.02%。Hughes和Quinn^[12]的研究表明,新西兰北部杯卡托地区植被恢复措施(ICM)对流域水质净度有直接和积极的影响,流域中位水体TN和TP输出浓度分别降低45.70%和62.15%。以上研究均表明,退耕还林措施均对氮磷流失削减效果显著,退耕还林方式多采用条带式或营造植被过滤带,且研究多集中于三峡库区、黄土沟壑丘陵区等非临湖流域^[13]或太湖、巢湖和洞庭湖等长江中下游临湖流域^[14],但数据多为土地利用改变后的单次数据,对流域全面变更为退耕还林以品字形配置而后进行面源污染的持续动态监测研究较少。

抚仙湖常年水质为Ⅰ类水,被设立为国家战略水资源储备库,其位于的珠江南北盘江上游岩溶区域水环境安全将直接影响抚仙湖。为改善流域生态环境,

提高水源涵养能力,抚仙湖流域退耕还林工程自2017年底全面实施,研究退耕还林后高原湖泊和水系上游湖泊的临湖流域氮磷削减控制效应迫在眉睫。因此,本研究以滇中尖山河流域坡耕地(2017年底改为退耕还林地)、人工林、灌木林、次生林为研究对象,对2017—2019年雨季(5—10月)自然降雨条件下氮磷流失形态、浓度及动态变化特征进行定量监测,旨在为退耕还林(草)植被恢复工程效益评价和流域水体保护及探究流域大尺度氮磷元素产出、迁移规律提供科学依据。

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(北纬24°32′00″—24°37′38″,东经102°47′21″—102°52′02″),为抚仙湖的一级支流。流域总面积35.42 km²,相对高差625.4 m,海拔1 722.0~2 347.4 m(最低海拔位于尖山河入抚仙湖入口),立体气候明显。流域多年平均降雨量1 050 mm。全年分干湿两季且两季分明,雨季(5月下旬至10月下旬)与旱季(11月上旬至次年5月中旬)降雨量分别占全年总降雨量的75%和25%。雨季多暴雨,多年平均洪峰流量为36 m³/s。年均蒸发量为900 mm。流域内的土壤主要为红紫泥土和红壤。

根据滇中尖山河小流域特点,选取具有代表性的坡耕地、人工林、灌木林、次生林4种土地利用类型分别布设投影面积为5 m×20 m的标准径流小区。2017年研究区内耕地面积1 174.6 hm²,占总面积的33.2%;坡耕地347.1 hm²,坡耕地占总耕地面积的29.6%;林地面积1 697.5 hm²,占总面积的47.9%,其中人工林941 hm²,灌木林339.8 hm²,次生林413.4 hm²。

坡耕地:流域内传统的种植方式(2018年前),种植作物有玉米(*Zea mays* L.)、豌豆(*Pisum sativum* L.)、烤烟(*Nicotiana tabacum* L.)等,覆盖度20%~30%(2018年实施退耕还林地后耕地保有量占比已小于0.1%);退耕还林地:流域2017年底开始实施全面退耕还林,植被按照“品”字形配置,株行距为3 m×3 m,初植密度为7 400株/hm²,退耕还林树种以雪松(*Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don)和金桂(*Osmanthus fragrans* var. *thunbergii*);人工林:自2005年该地区大力进行流域综合治理,农户将大部分坡耕地改为林地,主要种植云南松(*Pinus yunnanensis* Franch)、桉树(*Eucalyptus robusta* Smith),林间伴

生有灌木、草本、果树等,覆盖度为65%;灌木林:与人工林同期进行植被恢复,在自然条件下由灌草丛恢复为灌木林,植物主要包括扭黄茅(*Heteropogon contortus* (Linn.) Beauv)、鬼针草(*Bidens pilosa* L.)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana* Ehrhart ex Willd)等,覆盖度达95%;次生林:为经过次生演替阶段形成的植被,植被类型主要有云南松(*Pinus yunnanensis* Franch)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis* D. Don)、桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)、银荆(*Acacia dealbata* Link)、冷杉(*Abies fabri* Craib)等,覆盖度达90%。不同土地利用类型基本概况见表1,2017年不同土地利用类型土壤本底特征见表2。

表1 不同土地利用类型基本概况

土地利用类型	土壤类型	海拔/m	坡度/(°)	坡向	林龄/a	植被盖度/%	树高/m	主要植物种类	研究期
原坡耕地	红壤	1773	17.82	西南	—	20~30	—	玉米、豌豆、烤烟	2017年1月—2017年12月
退耕还林地	红壤	1773	17.82	西南	4	93	2.5	雪松、野漆、金桂、紫茉莉等	2017年12月—2019年12月
人工林	红壤	1788	18.58	西南	15	65	7	云南松、桉树、紫茎泽兰等	2017年1月—2019年12月
灌木林	红壤	1790	20.84	南	—	95	2	紫茎泽兰、扭黄茅、鬼针草、大籽蒿等	2017年1月—2019年12月
次生林	红壤	1787	20.62	西北	20	90	9	云南松、旱冬瓜、桉树、银荆、冷杉等	2017年1月—2019年12月

表2 2017年不同土地利用类型土壤本底特征

土地利用类型	土层/cm	容重/(g·cm ⁻³)	自然含水率/%	毛管持水量/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	pH	全氮/(g·kg ⁻¹)	总磷/(g·kg ⁻¹)
坡耕地	0—20	1.39	19.66	31.96	49.87	51.48	7.69	2.514	1.557
	20—40	1.69	19.78	32.18	49.65	48.66	8.19	1.798	1.327
	40—60	1.71	20.14	33.45	49.29	47.83	8.11	2.511	1.283
人工林	0—20	1.33	19.18	34.15	49.49	53.83	8.35	2.337	0.883
	20—40	1.35	20.26	36.29	45.13	50.64	8.45	1.859	1.083
	40—60	1.39	20.32	38.47	46.12	48.55	8.06	2.521	1.137
灌木林	0—20	1.38	17.11	30.03	47.92	50.89	8.24	2.261	1.79
	20—40	1.49	18.17	34.7	46.65	48.79	8.51	2.034	1.457
	40—60	1.48	19.95	33.87	45.19	46.22	8.06	2.496	1.303
次生林	0—20	1.49	22.19	37.25	52.18	57.78	6.59	1.421	0.535
	20—40	1.53	22.47	38.96	50.39	56.32	5.81	1.985	0.527
	40—60	1.54	22.79	39.72	50.21	55.29	5.4	1.722	0.76

1.2 样品的采集

在2017—2019年每年雨季5月至10月选择32场典型产流降雨事件。降雨产流后实地测定各小区产流产沙量,混匀径流池内泥沙水样后多点不同深度采集样品。各小区分别取500 ml径流样品转入标准容器,于4℃下冷藏保存,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(PO₄³⁻-P)含量。流域内设有雨量计,观测记录试验周期内的降雨量与降雨强度,除退耕还林地外各径流小区保持原有地貌。坡耕地于2017年12月退耕后短期内完成植被恢复造林并

封禁处理以减少人为干扰。

1.3 样品测定与数据处理分析

各指标测定参照《地表水环境质量标准》(GB3838—2002),径流水样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;TP和PO₄³⁻-P采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法测定。

本文采用Excel 2019进行数据处理和图表绘制,利用SPSS 25.0软件进行相关性分析,文中所列数据均进行三组平行重复试验并重复两组,取平均值。

不同土地利用类型氮磷流失浓度采用式(1)计算:

$$D_{iy} = \frac{\sum_{k=1}^n D_{iyx} \cdot V_{ix}}{\sum_{k=1}^n V_{ix}} \quad (1)$$

式中: D_{iy} 指第*i*种土地利用类型标准径流场在第*y*种形态氮磷污染物的输出浓度(mg/L); D_{iyx} 指第*i*种土地利用类型标准径流场在第*y*种形态氮磷污染物在第*x*场降雨时间中的输出浓度(mg/L); V_{ix} 是指第*i*种土地利用类型标准径流场在第*x*场降雨中的产流量(m^3/m^2);*n*指观测期内某年的降雨次数。

不同土地利用类型氮磷流失负荷采用式(2)计算:

$$T_{iy} = \sum_{k=1}^n D_{iyx} \cdot V_{ix} \quad (2)$$

式中: T_{iy} 指第*i*种土地利用类型标准径流场在第*y*种形态氮磷污染物的流失负荷(mg/m^2); D_{iyx} 指第*i*种土地利用类型标准径流场在第*y*种形态氮磷污染物在第*x*场降雨时间中的输出浓度(mg/L); V_{ix} 是指第*i*种土地利用类型标准径流场在第*x*场降雨中的产流量(m^3/m^2);*n*指观测期内某年的降雨次数。

退耕还林不同年份氮磷流失量削减率采用式(3)计算:

$$R = \frac{T_{y0} - T_{yj}}{T_{y0}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: T_{y0} 指未退耕还林即坡耕地时期最后一年时标准径流场在第*y*种形态氮磷污染物的流失负荷(mg/m^2); T_{yj} 指进行退耕还林*j*年后标准径流场在

第*y*种形态氮磷污染物的流失负荷(mg/m^2), $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。

2 结果与分析

2.1 退耕还林措施下侵蚀性降雨、径流量特征

于2017—2019年共3a对滇中尖山河流域径流区降雨及径流小区进行周期性监测。2017年、2018年和2019年年降雨量分别为962,892,651mm,不同监测年份坡耕地—退耕还林地(2017年为坡耕地、2018—2019年进行退耕还林)、人工林、灌木林、次生林侵蚀性降雨和径流量见表3。发生土壤流失的降雨称为侵蚀性降雨,自坡耕地退耕还林后,2018年、2019年侵蚀性降雨量较2017年分别降低41.85%和46.06%。2017年坡耕地侵蚀性降雨占全年降雨量的57.72%,而2018年、2019年退耕还林地侵蚀性降雨仅为全年降雨量的39.22%和48.88%。2017年不同土地利用类型径流量由大到小依次为:坡耕地>灌草丛>人工林>次生林,坡耕地分别为灌草丛、人工林和次生林的6.00,6.53,12.10倍;退耕还林两年后,坡耕地年径流量分别下降了95.88%和94.29%。2019年退耕还林地侵蚀性降雨量、径流量仍高于人工林、灌草丛和次生林,但远低于原坡耕地,说明进行退耕还林工程两年对坡面侵蚀性降雨转化和径流量产生的控制效果更佳($p<0.05$)。

表 3 退耕还林措施对侵蚀性降雨径流量的影响

土地利用类型	2017 年		2018 年		2019 年	
	侵蚀性	径流量/	侵蚀性	径流量/	侵蚀性	径流量/
	降雨/mm	(mm·m ⁻²)	降雨/mm	(mm·m ⁻²)	降雨/mm	(mm·m ⁻²)
坡耕地/退耕还林地	555.8	82.3	349.8	3.39	318.2	4.70
人工林	516.2	12.6	32.4	1.77	26.80	0.17
灌木林	498.8	13.7	136.2	0.44	99.29	0.13
次生林	327.2	6.8	94.63	0.03	71.2	0.02

2.2 不同土地利用类型径流氮素流失浓度特征

2.2.1 不同土地利用类型径流总氮流失浓度特征

从图1可以看出,2017年雨季坡耕地TN浓度均高于其他土地利用类型,TN平均输出浓度分别为人工林、灌木林、次生林的1.67,1.59,1.52倍,其中6月降雨最为集中且TN输出浓度最高,在6月14日的观测中TN输出浓度达10.67mg/L。2018年与2019年,退耕还林地TN平均输出浓度分别为人工林、灌木林、次生林的1.58,1.42,1.41倍和1.51,1.50,1.52倍。2018年和2019年相比2017年,6月TN输出浓度平均削减了21.03%和34.32%,说明退耕还林后TN平均输出浓度相比原坡耕地降低,且随时间变化逐渐趋于其他类型土地输出TN浓度。

三年中,在产流最多的时段内不同土地利用类型TN输出浓度均随时间逐渐降低,2018年、2019年6月TN平均流失浓度对比2017年同月分别削减了24.02%和34.31%。

2.2.2 不同土地利用类型径流硝态氮流失浓度特征

2017年NO₃⁻-N平均输出浓度表现为坡耕地(2.226mg/L)>灌木林(1.513mg/L)>人工林(1.445mg/L)>次生林(1.364mg/L)(图2),坡耕地分别为人工林、灌木林、次生林的1.54,1.47,1.63倍,6月坡耕地NO₃⁻-N输出浓度与其他土地利用类型中差距最大为160.20%,峰值浓度差达2.436mg/L。2018年和2019年退耕还林地NO₃⁻-N平均输出浓度仍高于其他林分类型,分别比其他林分类型高出115.44%~135.26%和

103.62%~108.41%。在暴雨集中的6月退耕还林地 NO_3^- -N平均输出浓度与其他土地利用类型相比平均差值仅0.126~0.901 mg/L,2019年6月对比2017年

与2018年同期同比削减了30.00%和16.31%。在排除特大暴雨的情况下,退耕还林两年后 NO_3^- -N平均输出浓度削减率达32%。

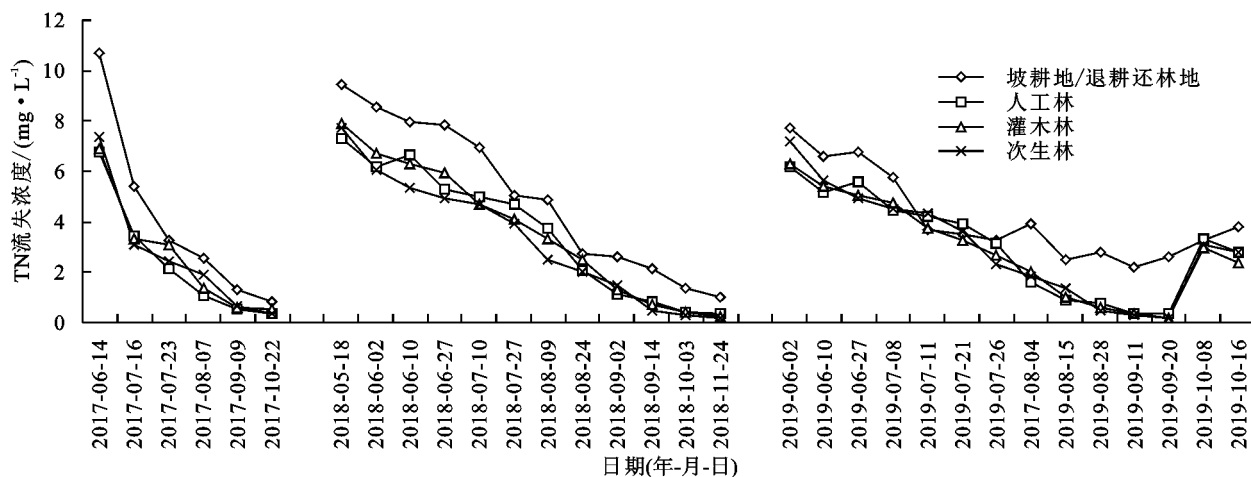


图1 2017—2019年不同土地利用类型TN输出浓度

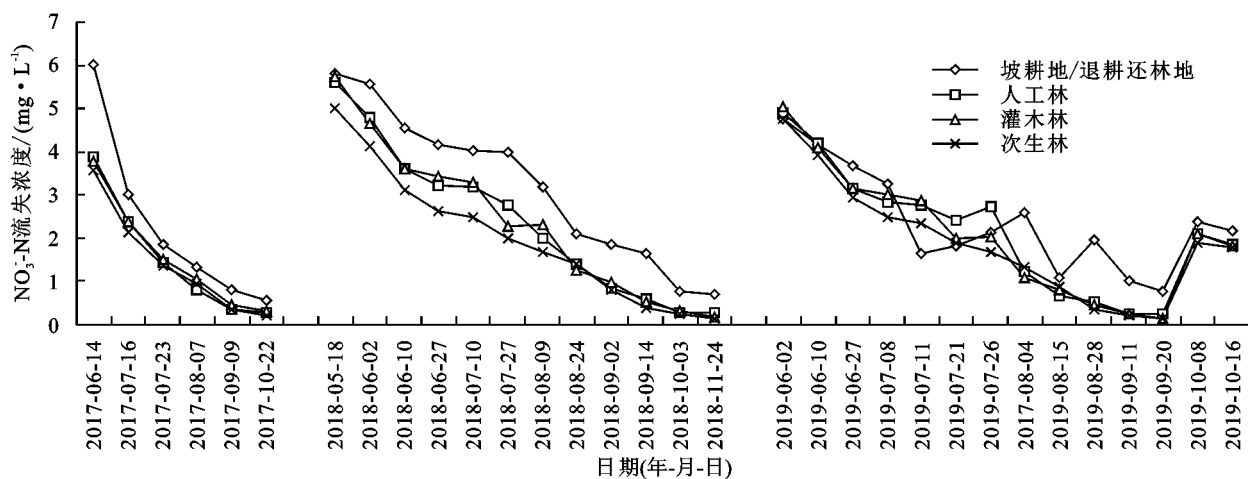


图2 2017—2019年不同土地利用类型 NO_3^- -N输出浓度

2.2.3 不同土地利用类型径流铵态氮流失浓度特征

NH_4^+ -N输出浓度较其他两种形态氮素输出水平较低(图3)。2017年 NH_4^+ -N平均输出浓度表现为坡耕地(1.117 mg/L)>次生林(0.696 mg/L)>灌木林(0.641 mg/L)>人工林(0.587 mg/L)。2017年坡耕地 NH_4^+ -N平均输出浓度分别为次生林、灌木林、人工林的1.90,1.74,1.60倍。2018年退耕还林地 NH_4^+ -N平均输出浓度比2017年削减了25.82%(0.829 mg/L),2019年削减了47.01%(0.592 mg/L)。退耕还林后2018年和2019年平均 NH_4^+ -N输出浓度同年其他地类的1.19~1.52倍和1.10~1.18倍,较2017年分别削减了45.31%和61.84%。

2.3 不同土地利用类型径流磷素流失浓度特征

2.3.1 不同土地利用类型径流总磷流失浓度特征
由图4可知,2017年流域不同土地利用类型TP平均输出浓度表现为坡耕地(6.192 mg/L)>人工林

(5.422 mg/L)>次生林(3.976 mg/L)>灌木林(2.363 mg/L),且坡耕地输出浓度依次为其他土地利用类型的2.62,4.56,1.14倍,属劣V类水质。在进行退耕还林后,2018年TP平均输出浓度削减了26.32%(4.562 mg/L),降雨集中时段内(6月、7月)TP输出浓度比2017年同月分别削减了26.63%和27.45%。2019年不同土地利用类型TP平均输出浓度排序依次为:灌木林(1.610 mg/L)>退耕还林地(1.556 mg/L)>人工林(1.358 mg/L)>次生林(0.966 mg/L),退耕还林地TP输出水平已低于灌木林;且在2019年的产流中输出浓度除6月外均低于1 mg/L,6月内均不高于2 mg/L。2019年各月TP输出浓度较2018年进一步得到控制,三年中坡耕地/退耕还林地平均输出浓度依次为:2019年(1.556 mg/L)<2018年(4.562 mg/L)<2017年(6.191 mg/L)。2019年平均TP输出浓度较2017年、2018

年削减率分别达 74.87% 和 65.89%。说明 TP 输出浓度在退耕还林后已得到有效控制,并随着植被恢复周期的增长控制效应更佳,TP 输出浓度与人工林、灌木林和次生林平均输出浓度趋于一致。

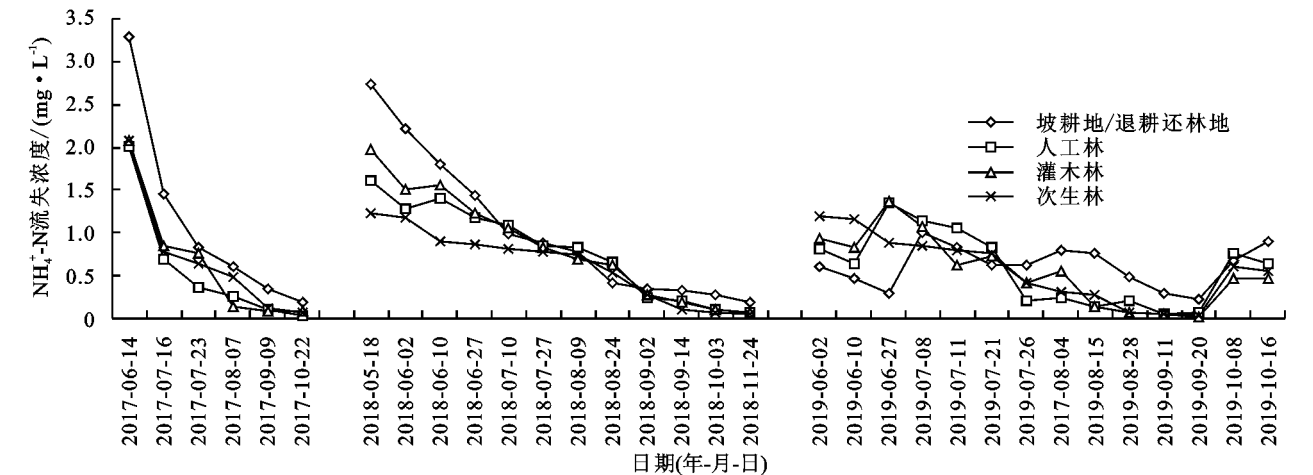


图 3 2017—2019 年不同土地利用类型 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 输出浓度

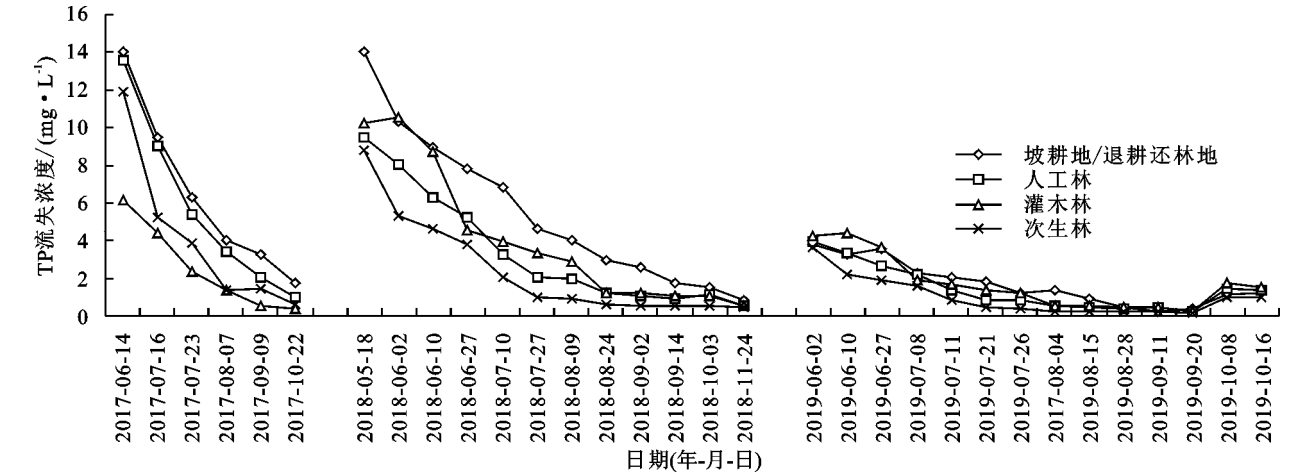


图 4 2017—2019 年不同土地利用类型 TP 输出浓度

2.3.2 不同土地利用类型径流磷酸根流失浓度特征

2017 年各土地利用类型 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均输出浓度(图 5)表现为坡耕地(3.981 mg/L) > 人工林(3.757 mg/L) > 次生林(2.567 mg/L) > 灌木林(1.652 mg/L), 2018 年表现为退耕还林地(2.703 mg/L) > 灌木林(2.294 mg/L) > 人工林(1.578 mg/L) > 次生林(1.025 mg/L); 2019 年表现为灌木林(1.138 mg/L) > 人工林(0.785 mg/L) > 退耕还林地(0.779 mg/L) > 次生林(0.522 mg/L)。2018 年和 2019 年退耕还林地输出浓度仅为同年最低次生林的 263.11% 和 149.27%, 而未退耕还林时坡耕地输出浓度为最低灌木林的 241.88%。相较于 2017 年、2018 年输出浓度削减率为 29.08%, 输出浓度对比最低输出林分仍高于未退耕还林时; 退耕还林第二年后削减效果才进一步体现, 2019 年达到 70.40%, 2019 年较 2018 年削减率达 58.70%。说明 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 输出浓度在退耕还林第一年后已得到初步控制, 并且随着植被恢复周期的增长控制效应更佳, 且输出浓度已经低于或其他林分类型一致。

2.3 退耕还林区面源污染物径流输出量变化分析

由图 6 可知, 观测期内坡耕地/退耕还林产流 TN 年际输出量表现为 2019 年(18.39 mg/m²) < 2018 年(19.41 mg/m²) < 2017 年(88.79 mg/m²), 退耕还林地 2019 年和 2018 年较 2017 年输出量分别削减了 79.29% 和 78.14%; 2018 年与 2019 年退耕还林地 TN 平均输出量同年占有土地利用类型总输出量的比例较 2017 年(35.95%) 分别下降了 4.40% 和 2.48%。观测期内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 输出量均表现为 2019 年(10.00, 2.75 mg/m²) < 2018 年(12.18, 3.90 mg/m²) < 2017 年(51.24, 23.31 mg/m²), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 输出量 2019 年和 2018 年较 2017 年分别削减了 80.48% 和 76.23%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 输出量分别削减了 88.20% 和 82.27%, 2018 年和 2019 年坡耕地/退耕还林地下 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 同年输出量占比较 2017 年由分别下降 4.78% 和 9.69%。总体来看, 退耕还林后径流中不同形态氮素输出量同年占比削减分别为 3.44%, 2.39% 和 4.85%, 说明退耕还林对各溶解态氮素输出量削减控制效果更佳。

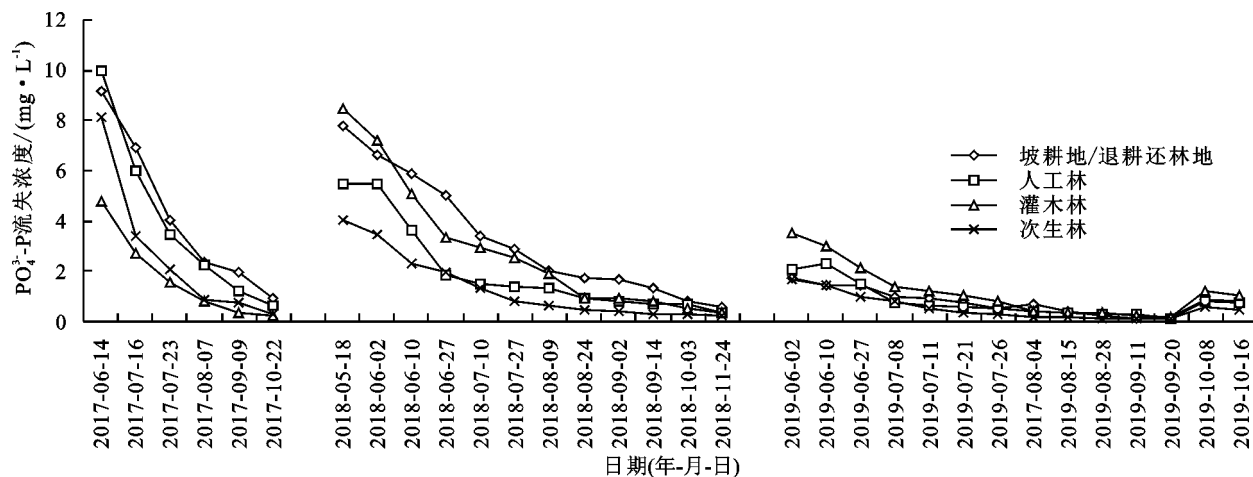
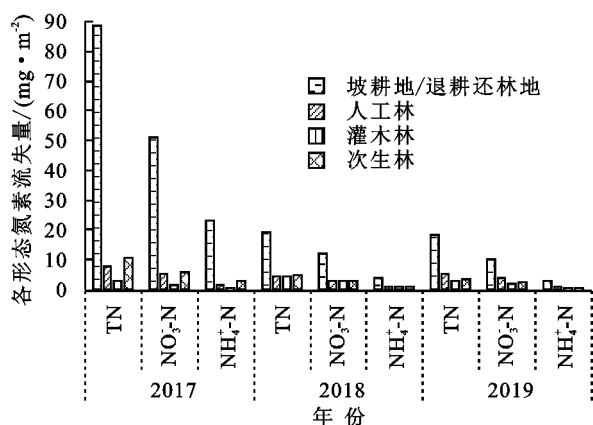
图5 2017—2019年不同土地利用类型 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 输出浓度

图6 坡耕地/退耕还林地径流各态氮素年际平均输出量与输出量占比

相较于对氮素的控制,退耕还林措施对 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 削减效果更优。由图 7 可知,2017 年坡耕地 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 输出量分别为 169.52, 110.63 mg/m^2 , 占不同土地利用类型总输出量比例分别为 37.14% 和 38.12%, 2018 年和 2019 年 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 同年输出量占比较 2017 年分别下降了 2.00%, 7.31% 和 3.42%, 14.34%。2018 年和 2019 年 TP 输出量降至 20.89, 7.36 mg/m^2 , 较 2017 年削减幅度达 87.50% 和 95.66%。

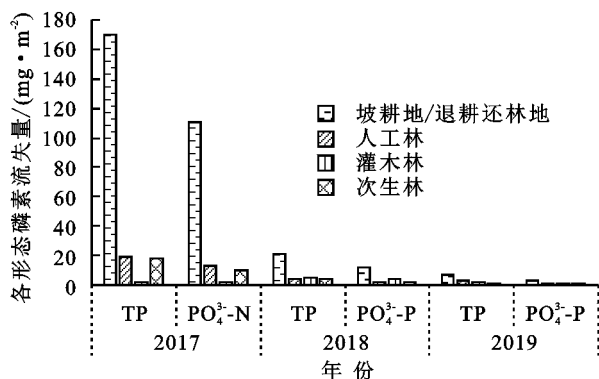


图7 退耕还林地径流各态磷素年际平均输出量与输出量占比

3 讨论

3.1 退耕还林对侵蚀性降雨及产流量的削减作用

在降雨事件中产生地表径流后发生土壤侵蚀进而引起土壤流失的这部分降雨称为侵蚀性降雨^[15], 地形、土壤及植被不同是导致侵蚀性降雨比例不同的关键因素。本研究中,坡耕地进行退耕还林两年后,对比原坡耕地,侵蚀性降雨、侵蚀性降雨同年占总降雨量比例和产流量分别削减了 42.75%, 8.90% 和 94.29%, 且随着植被恢复的加强逐渐降低。这与王珠娜等^[16]在三峡库区退耕还林的研究中得到地表径流量削减结果一致。本研究中退耕还林树种主要为雪松,退耕还林初期植被覆盖度仅为 10.00% (2018 年初,林龄 1 a), 产流量仍高于其他土地利用类型,对阻止侵蚀性降雨形成和削减产流的效能尚不明显,产流削减率仅为 13.74%。但本研究中坡耕地产流量较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;退耕还林后产流削减可能是由于前期通过造林整地改变微地形和土壤结构,增加降雨入渗;退耕还林后通过增加地表盖度、丰富地表植被的异层结构,有效干预降雨到侵蚀性降雨的转变和产流的发生。随着植被逐渐恢复,造林树种上层林冠逐渐郁闭后与中层灌木、下层草本和底层枯枝落叶层的复层结构抵抗雨滴击溅和坡面抗冲抗蚀^[17],退耕还林后灌木和多年生的草本迅速入侵,并具有较强的抗逆性、速生性和萌蘖能力,覆盖度迅速提高,同时形成密集且固着力强的地下根系网,因此在退耕还林第二年产流削减率达 94.29%。

相关研究^[18]表明在退耕还林区内降水量减少对径流削减的贡献率同样不可忽视,本研究中 2018 年与 2019 年非退耕还林地侵蚀性降雨均值均为 87.70 mm,但两年间退耕还林地侵蚀性降雨量分别削减

41.85%和46.06%,即退耕还林地侵蚀性降雨和径流削减均来自于植被恢复。出现差异主要由于本研究考察的降雨多为雨季短历时、高雨强的暴雨产流,此时侵蚀性降雨转化和产流的主要贡献因素。本研究中,在退耕还林初期造林树种和林下草灌共同形成的初期地表植被覆盖是降雨侵蚀力削弱及侵蚀性降雨量削减的主要原因^[19];此外对产流量削减其主要作用的为周边迅速入侵的灌草和地下草灌种库的萌发,而未郁闭的乔木贡献实则较低^[20]。退耕还林工程中植被恢复进程繁复,各阶段均形成不同的垂直覆盖结构。当前气候变化格局下极端降雨频发,不同退耕还林模式下植被恢复各个进程中侵蚀性降雨的转化、削减和其内在机理仍需要进一步研究。

3.2 退耕还林对流域面源污染物的削减作用

流域氮磷面源污染物输出是一个复杂的过程,途径包括地表径流和淋溶流失等,地表径流养分流失浓度负荷是评价植被恢复体系的关键监测指标^[21]。本研究区坡耕地(2017年)的观测周期内,氮素流失浓度及其流失量均高于磷素^[22],说明尖山河流域面源污染物输出主要为氮素。与氮素相比,退耕还林地TP和 PO_4^{3-} 输出浓度在植被恢复过程中较氮素降低更高,即磷类污染物削减控制在退耕还林措施下响应速度高于氮类污染物,这与吴东等^[23]在三峡库区、王全九等^[24]对黄土高原坡地和陈强等^[25]对滇东南岩溶区的退耕还林研究结果均一致。本研究出现氮磷削减效能的差异可能主要是由于一方面研究区植物在生长过程中吸收、固定和利用氮磷程度不同,原坡耕地富集的氮磷比例高于1,而植物组织中氮为0.30%~1.00%、磷为0.00%~0.30%,即吸收氮素合成植物蛋白质用量高于吸收磷素合成植物核酸的用量^[26-27]。另一方面邓文鑫等^[28]在对常见针叶树种养分利用和氮磷化学计量特征的研究中指出,在氮素可充分满足雪松生长的条件下,植物生长所需磷素含量更高;陈婵等^[29]同样认为在植被不同恢复阶段N综合指数良性发展,P则在植物吸收利用过程中负向发展且成为限制性因素。由此可得P成为本研究区植被恢复的限制性因素,植被生长发育受P控制。其结果是进行退耕还林后径流中氮污染物含量较高,植物吸收利用量大,其输出量及输出浓度的削减幅度均明显高于磷素,但削减率低于磷;磷污染物含量较少,植物吸收利用率高,其削减率高于氮。

在水蚀环境下,径流中氮磷面源污染物输出量可表征流域土壤养分损失情况与流域污染物负荷程度,流域不同土地利用类型氮磷输出情况及贡献比则表明流域健康状况^[30]。退耕还林工程两年后

(2019年)TN和TP年际输出总量分别下降79.29%和95.66%,5种面源污染物浓度最终平均削减54.22%,这主要是由于坡耕地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;退耕还林地具有斑块尺度植被恢复的性质,退耕还林不同植被类型、层次结构和形态结构对水土流失过程和格局产生深远影响,是植被恢复从削弱侵蚀营力到提高土壤抗冲蚀能力、从改善土壤环境到优化营养元素分配格局共同耦合作用的结果^[31]。

本研究中,实施退耕还林后,坡耕地总氮、总磷输出量可在一年内(2018年对比2017年)削减78.13%~87.67%,输出量在植被恢复两年后与其他林分一致。原因主要包括:退耕还林后,人为干扰对土壤减少,且无农业活动;前期的弃耕撂荒和造林准备阶段,能有效的帮助近地面入侵草本和中层入侵灌木的快速成型和营造适宜造林的立地条件,从而形成具有水土保持功效的微地形;同时,造林植被恢复后进一步丰富了林分复合结构,加强了对雨滴击溅和地表冲刷的抵抗能力。本研究观测周期内,虽径流中各形态氮磷面源污染物输出浓度仍处于劣V类水质规定范畴,但退耕还林已对面源污染表现出较好的的削减和控制效应。因此,在滇中尖山河流域进行大范围的退耕还林植被恢复工程,可减少面源污染物的输出和改善水土流失现状,并进一步依托后续有效的管控和抚育手段控制流域水质和土壤质量退化。今后退耕还林工作应围绕如何最大程度削减雨季短历时、高雨强下的暴雨产流;同时在退耕还林的研究工作中可设置多树种,并将乔灌草结合作为退耕还林的造林模式,在树种选择方面可多选择成林郁闭时间短的速生树种,以迅速覆盖裸露地表达达到短期内削减产流的目的。

4 结论

(1) 研究时段内退耕还林地侵蚀性降水量逐年下降,恢复两年后侵蚀性降雨量同年占比、产流量分别降低8.84%和94.29%,径流中总氮、硝态氮和铵态氮浓度分别削减34.32%,32%和61%。

(2) 氮素污染物为尖山河小流域面源污染主要控制因素,退耕还林工程对磷素污染物削减效果优于氮素;植被恢复期间2018年总磷及磷酸盐输出浓度削减率分别为14.81%和29.08%,2019年达73.44%和70.40%。

(3) 退耕还林两年后面源污染物输出量分别减少了总氮70.4 mg/m²,硝态氮41.24 mg/m²和铵态氮20.56 mg/m²;总磷162.16 mg/m²和磷酸盐107.38 mg/m²;削减率分别为:79.29%,80.48%,88.20%,95.66%和97.06%。

参考文献:

- [1] Srinivas R, Singh A P, Dhadse K, et al. An evidence based integrated watershed modelling system to assess the impact of non-point source pollution in the riverine ecosystem[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246:118963.
- [2] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6):799-810.
- [3] Seeger M, Errea M P, Begueria S, et al. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 288(3/4):299-311.
- [4] 张灿强, 张彪, 李文华, 等. 森林生态系统对非点源污染的控制机理与效果及其影响因素[J]. *资源科学*, 2011, 33(2):236-241.
- [5] 任智慧, 赵春发, 王青青, 等. 复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟:以南京市云台山河流域为例[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(1):174-184.
- [6] Dong G, Gu J, Lv X, et al. Evaluate the effect of the grain for green project on vegetation variation in Xiliugou basin[C]//Iop Conference Series:Earth and Environmental Science. Iop Publishing, 2021, 668(1):012036.
- [7] Wu L, Liu X, Ma X. Prediction of land-use change and its driving forces in an ecological restoration watershed of the Loess hilly region[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(6):238-243.
- [8] 王彦东. 南水北调中线水源地农业面源污染特征及农户环境行为研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [9] 张森森, 肖武, 徐建飞, 等. 巢湖流域土地整治与面源污染时空过程及关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1):360-367.
- [10] 胡彦婷, 张富, 赵传燕, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地面源污染物负荷变化研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2018, 53(3):28-36.
- [11] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例[J]. *环境科学*, 2016, 037(8):2940-2946.
- [12] Hughes A O, Quinn J M. Before and after integrated catchment management in a headwater catchment: changes in water quality[J]. *Environmental Management*, 2014, 54(6):1288-1305.
- [13] 包鑫, 江燕. 半干旱半湿润地区流域非点源污染负荷模型研究进展[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(2):328-338.
- [14] 刘祖英, 王兵, 赵雨森, 等. 长江中上游地区退耕还林成效监测与评价[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8):2463-2469.
- [15] Mamun Abdullah A L, Shams S, Nuruzzaman M. Review on uncertainty of the first-flush phenomenon in diffuse pollution control[J]. *Applied Water Science*, 2020, 10(1):1-10.
- [16] 王珠娜, 王晓光, 史玉虎, 等. 三峡库区秭归县退耕还林工程水土保持效益研究[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1):68-72.
- [17] 欧阳帅, 项文化, 陈亮, 等. 南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5):1-9.
- [18] 刘政, 叶晶萍, 欧阳磊, 等. 彭冲涧小流域植被恢复的水文效应及其对年降水量响应的临界值[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11):3705-3711.
- [19] 王玲莉, 张富, 胡彦婷, 等. 侵蚀性降雨分类及植被类型对产流产沙的影响[J]. *人民黄河*, 2021, 43(10):109-113.
- [20] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 植被恢复演替初期对模拟降雨产流特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1):54-57, 62.
- [21] 刘辉, 胡梦甜, 韩永伟, 等. 8种面源污染防治种植模式对土壤温度、湿度和氮磷流失风险的影响[J]. *环境生态学*, 2019, 1(8):28-34.
- [22] 苏孟白, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中尖山河流域不同土地利用类型产流及氮磷流失特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5):24-31.
- [23] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. *环境科学*, 2015, 36(10):3825-3831.
- [24] 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.
- [25] 陈强, 常恩福, 毕波, 等. 滇东南岩溶地区3种退耕还林模式的水土保持效应研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(5):1-4.
- [26] 张耀艺, 倪祥银, 杨静, 等. 中亚热带同质园不同树种氮磷重吸收及化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4):1154-1162.
- [27] Muratore C, Espen L, Prinsi B. Nitrogen uptake in plants: the plasma membrane root transport systems from a physiological and proteomic perspective[J]. *Plants*, 2021, 10(4):681-684.
- [28] 邓文鑫. 合肥常见针叶树种养分利用效率及氮磷化学计量的研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2009.
- [29] 陈婵, 张仕吉, 李雷达, 等. 中亚热带植被恢复阶段植物叶片、凋落物、土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(8):658-671.
- [30] Postigo C, Ginebreda A, Barbieri M V, et al. Investigative monitoring of pesticide and nitrogen pollution sources in a complex multi-stressed catchment: the Lower Llobregat River basin case study (Barcelona, Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755(1):142377-142387.
- [31] 冯天骄. 黄土丘陵区整地与植被恢复耦合作用的生态水文效应[D]. 北京:中国科学院大学, 2018.