

# 西南喀斯特山区典型流域农业非点源污染负荷及分布特征

贺 贇<sup>1</sup>, 杨爱江<sup>1,2</sup>, 陈蔚洁<sup>3</sup>, 郭悦<sup>1</sup>, 冯于航<sup>1</sup>, 宋霞<sup>1</sup>

(1.贵州大学 资源与环境工程学院 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025;

2.贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站, 贵阳 550025; 3.贵州省材料产业技术研究院, 贵阳 550025)

**摘要:**为更精确地估算西南喀斯特山区的北盘江流域(晴隆段)农业非点源污染情况,引入降雨、地形因子( $\alpha, \beta$ )对经典的输出系数模型(ECM)进行了研究。结果显示:2017年北盘江流域(晴隆段)农业非点源氮、磷污染负荷分别是 2 582.00 t 和 246.74 t。两者分布特征基本一致,呈现分布不均的特质:污染负荷局部集中,坡度较高和人口密度大的区域负荷量较高。TN, TP 负荷中不同农业非点源的贡献率基本一致,为畜禽养殖>土地利用类型>农村生活。与实际观测值比较,改进的输出系数模型(IECM)对 TN, TP 负荷的估算值的平均相对偏差分别为 9.80% 和 2.09%。综上,IECM 提高了模型模拟的精度,可以为喀斯特山区非点源污染负荷的估算提供参考。

**关键词:**输出系数模型; 农业非点源污染; 北盘江; TN; TP

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0148-05

## Research on Spatial Characteristics and the Load of Agricultural Non-Point Source Pollution in Karst Area of Southwestern China

HE Yun<sup>1</sup>, YANG Aijiang<sup>1,2</sup>, CHEN Weijie<sup>3</sup>, GUO Yue<sup>1</sup>, FENG Yuhang<sup>1</sup>, SONG Xia<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University,

Guiyang 550025, China; 2.Science Park Development Co., Ltd., of Guizhou University,

Guiyang 550025, China; 3.Guizhou Materials Industry Technology Research Institute, Guiyang 550014, China)

**Abstract:** In order to more accurately estimate the current status of agricultural non-point source pollution (ANSP) in the Beipan River Basin (Qinglong Section) located in southwestern China, an improved export coefficient model (IECM) was developed by integrating the precipitation and terrain impact factor into the conventional export coefficient model. The results indicated that the loads of TN and TP of the agricultural non-point source pollutants in the research area in 2017 were 2 582.00 t and 246.74 t, respectively; the distribution characteristics of the two are basically the same, showing the characteristics of uneven distribution; Pollution load is locally concentrated. And then, the load is higher in areas with higher slopes and high population densities; the contribution rates of different ANSP to TN and TP loads provided the similar trend and decreased in the order: livestock>land use>rural life; compared with the actual observations, the average relative deviations of the IECM estimates of TN and TP loads were 9.80% and 2.09%, respectively, which indicated that the IECM improved the accuracy of model simulation and provided reference information of model selection for the estimation of ANSP in the karst area of southwestern China.

**Keywords:** export coefficient model; agriculture non-point source pollution; Beipan River; TN; TP

随着我国政府对水环境治理力度和投入的逐步加大,点源污染的治理已初见成效。目前相较于点源污染,非点源污染无固定排放口,具有分散性、隐蔽性、不确定性、累积性和模糊性等特性,使得对其进行

监测难度较大。非点源污染的防治问题逐渐成为我国水环境污染的关注焦点<sup>[1]</sup>,而其中农业非点源污染较为突出。目前研究非点源污染使用最广泛的方法是 Johnes 等<sup>[2]</sup>提出的输出系数模型(ECM)。该模

收稿日期:2020-04-11

修回日期:2020-05-11

资助项目:贵州省国内生态学一流学科建设项目(GNYL[2017]007);贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y195);贵州大学课题项目(700714182214)

第一作者:贺贇(1995—),男,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事环境污染控制研究。E-mail:574422329@qq.com

通信作者:杨爱江(1973—),男,贵州毕节纳雍人,研究生导师,教授,主要从事环境污染控制研究。E-mail:Yangaj8818@sina.com

型利用区域水文、气象等参数,通过多元线性相关分析,建立区域内土地利用类型与污染输出负荷的关系。然后基于污染物输出系数,对不同类型污染源的污染负荷进行求和,以估算流域内非点源污染负荷总量。该模型所需数据资料相较其他模型较少,避开了非点源污染从产生到迁移转化的复杂过程。但该模型仅适用于降雨均匀的平原地区,对不符合此条件的非点源污染负荷的估算,存在较大偏差<sup>[3]</sup>。因此,许多学者对此模型进行了改进。蔡明等<sup>[4]</sup>在非点源负荷估算中,采用了引入降雨因子和流域损失系数的输出系数模型,模拟结果更符合实际;Ding 等<sup>[5]</sup>在引入降雨因子的同时,考虑了坡度对径流流量、流速的影响,进而引入了地形因子,模拟结果表明降雨和地形因子对非点源污染负荷估算有优化作用;滇池流域属于高原流域,降雨及地形空间差异大且非点源污染比例较高且有恶化的趋势,任玮等<sup>[6]</sup>选取了滇池流域范围内降雨变化明显、地形空间差异性大的宝象河流域,利用改进的模型对该流域非点源污染进行了估算,并成功提高了污染负荷结果的准确性。

喀斯特地区在受到自然因素及人为因素的影响极易发生水土流失,使得土壤生产力下降,地下则容易形成裂隙、溶洞等<sup>[7]</sup>。降雨产生的坡面径流携带着泥沙以及养分随径流汇入水体,极易造成水体富营养化<sup>[8]</sup>。但尚未有针对喀斯特地区非点源污染的研究。因此,本文选取降雨量大且分布不均、地形空间差异大,具有典型喀斯特地貌的北盘江流域(晴隆段)作为研究对象。研究区域位于贵州省晴隆县北盘江峡谷区,为典型的喀斯特地貌<sup>[9]</sup>。降雨、地形以及喀斯特地貌的交互作用下,水土流失严重。相比其他区域,其产生的非点源污染输移更易受降水、地形影响。同时,流域监测数据的缺乏也使得农业非点源污染负荷的计算难度较大。利用改进的输出系数模型,对其产生的 TN、TP 非点源污染进行估算,并对非点源污染物进行空间分析,了解该研究区域农业非点源污染负荷现状,以期填补对喀斯特山区农业非点源污染负荷模拟计算的空白,同时为该类型地区污染防控提供可参考的科学方法和依据。

## 1 研究区域

### 1.1 研究区概况

晴隆县属高原亚热带季风气候区,年均降水量 1 200 mm,是贵州省内降雨较多的地区。因受珠江流域北盘江及其支流的强烈切割影响,地形起伏大,具有沟壑纵横、岩溶发育强烈、落差大等特征,10°~20°坡度占全县坡度面积的 40.52%,20°以上的坡度占 48.05%。碳酸盐岩连片分布,在降雨、地形及岩性的交互作用下

造成了该区域土层薄、基岩裸露度高、成土速度缓慢,是典型的喀斯特高山石漠化地区<sup>[10]</sup>,石漠化面积达到 8.85 万 hm<sup>2</sup>,占全县土地面积的 66.70%。境内主要河流为北盘江及其支流,流经晴隆县沙子镇、莲城镇、茶马镇、光照镇,考虑流域范围,同时将普安县江西坡镇和高棉乡纳入研究区域,研究区域范围见图 1。

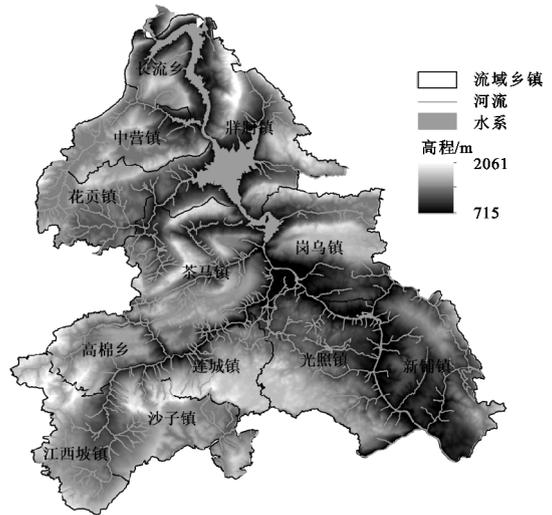


图 1 研究区域范围及高程

### 1.2 农业非点源污染

农业非点源污染主要由畜禽散养、农业生产等产生的排放物直接入河、农村生活污水未经处理随意排放等原因引起,所产生的主要污染物为 TN 和 TP。研究区域周边乡镇未设置进入北盘江的排污口,且周边非点源污染源主要是畜禽散养等产生的排放物直接入河、农村生活污水随意排放等,是一个典型以农业非点源污染为主的区域。因此,选取该区域为研究区,将 TN、TP 作为主要污染物,以农业种植污水、畜禽养殖污水和农村生活污水等作为污染源。

## 2 研究方法

### 2.1 输出系数模型介绍

输出系数模型是利用污染物输出系数来估算流域非点源污染输出负荷的一种方法。Johnes 等<sup>[2]</sup>对不同类型的畜禽、不同的土地利用类型采用不同的输出系数,丰富了输出系数模型的内容,但该模型仅在降雨均匀、地势平坦的地区有很好的模拟效果。因此,针对本文研究区域,需要对传统的输出系数模型进行改进以更好的模拟研究区域的非点源污染。有研究表明,降雨是非点源污染物的主要驱动因素<sup>[11]</sup>,而地形在非点源污染运输过程中起着至关重要的作用<sup>[12]</sup>。考虑到降雨和地形对非点源污染的不均匀性。参考以往的研究,改进的输出系数模型(非点源污染)式子如下<sup>[13-14]</sup>:

$$L = \sum_{i=1}^n \alpha \beta E_i [A_i (I_i)] + P \quad (1)$$

式中: $L$  为营养物的流失量(kg); $\alpha$  为降雨驱动因子; $\beta$  为地形驱动因子; $E_i$  为  $i$  类营养源的输出系数; $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型的面积( $\text{km}^2$ )或第  $i$  类畜禽数量或人口数量; $I_i$  为第  $i$  类的营养物质输入值(kg); $P$  为来自降雨的营养物质输入值(kg)。

## 2.2 降雨驱动因子确定

降雨驱动因子主要由降雨的年际变化差异  $\alpha_i$  以及流域内降雨的空间分布差异  $\alpha_s$  叠加作用决定<sup>[15]</sup>。

$$\alpha = \alpha_i \cdot \alpha_s = \frac{L}{L} \cdot \frac{R_j}{R} = \frac{f(r)}{f(\bar{r})} \cdot \frac{R_j}{R} \quad (2)$$

式中: $L$  为非点源污染物年入河量(kg); $r$  为研究流域内某一年的年降雨量(mm); $R_j$  为研究流域的单元

格  $j$  ( $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ) 内某一年的年均降雨量(mm); $\bar{R}$  为研究流域内某一年的年均降雨量(mm); $f(r)$  为年降雨量  $r$  与  $L$  入湖量的相关关系。

马欣敏<sup>[16]</sup>采用交叉验证法对反距离加权法、趋势面法以及普通克里金法 3 种空间插值法的精度进行了比较,结果表明普通克里金插值法优于其他两种方法。由附近气象站 2013—2017 年降雨数据通过 ArcGIS 软件进行降雨量普通克里金插值分析,再由式(2),得到降雨驱动因子图(图 2),研究区域 2017 年 TN 降雨影响因子为 0.980 5~1.053 7,TP 降雨影响因子为 0.994 7~1.068 9,空间分布均呈现由南东向北西递减的趋势。

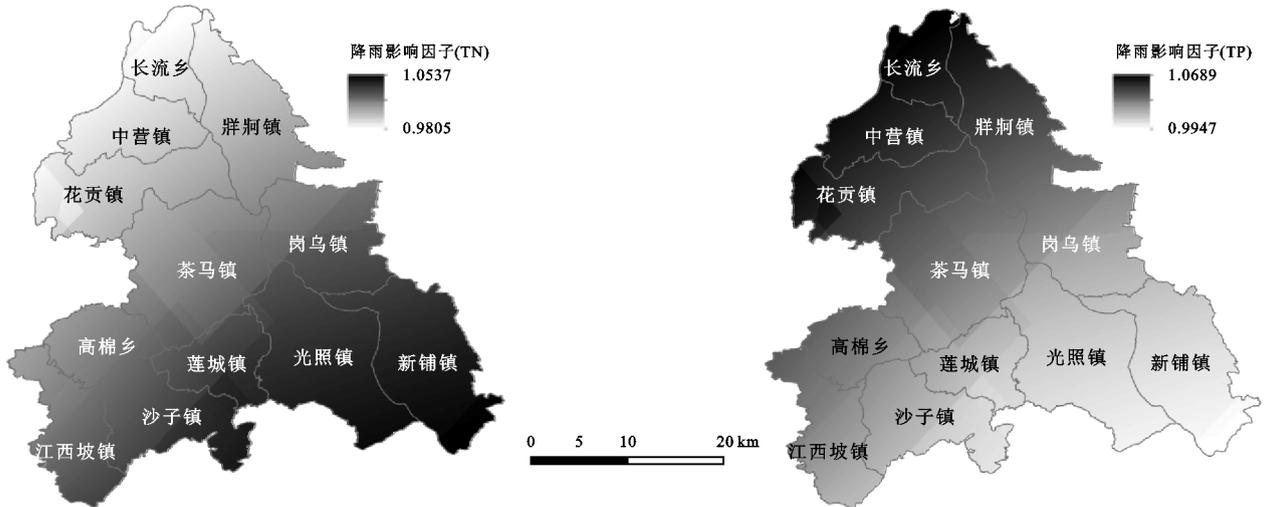


图 2 研究区域非点源污染 TN,TP 的降雨影响因子值

## 2.3 地形驱动因子

采用描述因地形差异而导致的非点源污染物负荷的变化情况的地形驱动因子,来研究地面坡度对径流流量和流速等产生影响,进而影响污染物的损失量,计算公式为<sup>[17]</sup>:

$$\beta = \frac{L(\theta_j)}{L(\bar{\theta})} = \frac{c\theta_j^d}{c\bar{\theta}^d} = \frac{\theta_j^d}{\bar{\theta}^d} \quad (3)$$

式中: $L$  为污染物负荷(kg); $c$  和  $d$  都是常量; $\theta_j$  为研究区域内空间单元的坡度; $\bar{\theta}$  为研究区域的平均坡度。

根据 Ding 等<sup>[5]</sup>的研究结果, $d$  取值为 0.610 4。利用 ArcGIS 软件对研究区域 DEM 数据进行计算统计,得到研究区域内的平均坡度  $17.22^\circ$ ,由式(3)可得到地形驱动因子如下:

$$\beta = \frac{\theta_i^{0.6104}}{17.22^{0.6104}} \quad (4)$$

根据式(4)在 ArcGIS 软件中通过栅格计算器计算得到研究区域地形驱动因子图(图 3)。

## 2.4 输出系数的确定

输出系数的确定主要是通过查阅文献法、试验法

以及水文统计法。由于该研究区域监测资料不足,故主要采用文献法来确定输出系数。根据《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》,结合本研究区域的实际情况以及参考国内部分地区已有研究成果<sup>[18-19]</sup>,确定各种土地利用方式、畜禽以及农业生活的输出系数,见表 1。

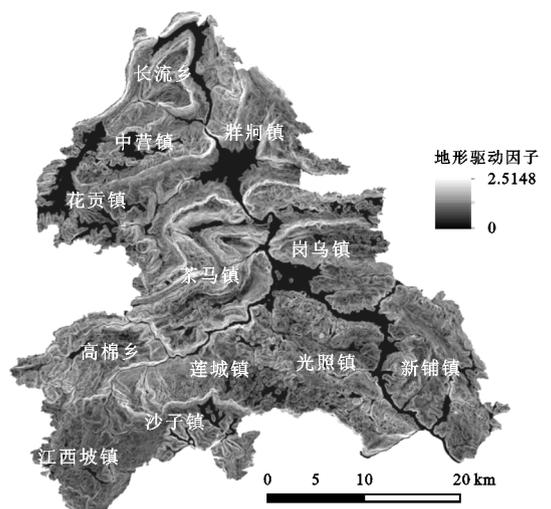


图 3 研究区域地形影响因子

表 1 研究区域非点源输出系数

污染源	类别	单位	TN 输出 系数	TP 输出 系数
畜禽养殖	猪	kg/(头·a)	4.40	0.423
	牛		17.226	1.387
	羊		0.400	0.054
	鸡		0.246	0.015
土地利用	耕地	t/(km <sup>2</sup> ·a)	2.320	0.161
	林地		0.250	0.015
	草地		0.600	0.065
	水域		1.100	0.020
	建设用地		1.300	0.050
	未利用地		1.340	0.051
农村生活	—		1.955	0.214

### 3 结果及分析

#### 3.1 非点源污染物负荷量分析

将降雨因子、地形因子以及不同污染源输出系数(表 1)等代入式(1),通过 ArcGIS 软件计算后得到研究区域 2017 年非点源污染总负荷量(表 2)

由表 2 可知,2017 年 TN,TP 负荷量分别是 2 582.00 t 和 246.74 t。总氮负荷量中畜禽养殖占比最大,为 48.06%。之后依次是土地利用、农村生活。这 6 种土地利用类型中,耕地的贡献最大,这与区域农业施加农用氮肥有很大的关系。来自畜禽养殖的

表 3 研究区域各乡镇 TN,TP 负荷量

污染物	长流乡	牂牁镇	岗乌镇	新铺镇	江西坡镇	高棉乡	沙子镇	中营镇	花贡镇	茶马镇	光照镇	莲城镇
TN	145.93	251.17	254.24	283.34	216.07	142.63	198.53	210.78	209.74	281.85	238.18	149.54
TP	14.38	23.50	25.29	28.85	18.69	13.37	19.05	17.20	19.56	30.87	22.40	13.57

非点源污染负荷的计算包括农村生产生活源、畜禽养殖源等。经过实地调查,该区域并没有大型工厂、养殖基地,可认为点源污染源对该区域并没有太大的影响。通过对各乡镇 3 种污染源进行统计分析,得到该区域 2017 年各乡镇土地利用、农村生活、畜禽养殖 3 种污染源分布(表 4)。TN 负荷量各乡镇 3 种污染源贡献中,每个乡镇污染源所占比例最大的为畜禽养殖负荷量,土地利用类型污染贡献率次之,最小的为农村居民生活。这表明该研究区域内 TN 负荷量主要污染源是养殖过程中产生的畜禽粪便及废水,加之农村地区排污管网等设施建设滞后,养殖废水直接排入水体中造成污染。TP 负荷量各乡镇 3 种污染源贡献中,大多数乡镇污染源所占比例最大的为畜禽养殖。长流乡、茶马镇、光照镇、新铺镇污染源所占比例最大的为土地利用,这主要由于该研究区域内主要以农业为主,农业人口较多,耕种过程中化肥的大量使用导致耕地的输出系数增大,因而耕地产生的污染负荷量过大;加之农村生活污染物直接排入水体造

成污染。非点源磷污染占比很大,占总量的 42.16%,之后依次是土地利用、农村生活。在这 6 种土地利用类型中,草地的占比最大,这与区域内草地占土地利用类型比重最大有关。

表 2 研究区域非点源污染负荷估算值

污染源	类型	TN/t	占比/%	TP/t	占比/%
土地利用	耕地	466.64	39.97	32.38	33.47
	林地	126.95		7.62	
	草地	379.56		41.12	
	水域	38.78		0.71	
	建设用地	19.36		0.74	
	未建设用地	0.76		0.03	
农村生活	—	309.06	11.97	60.12	24.37
畜禽养殖	—	1240.89	48.06	104.02	42.16
总和	—	2582.00	100	246.74	100

将表 2 的数据重分类为研究区域内各乡镇后,进行空间分布分析。结果显示,北盘江沿岸污染贡献率较大的乡镇依次是茶马镇和岗乌镇,长流乡和高棉乡贡献率最小。对 TP 负荷量的贡献率最大是茶马镇、新铺镇、莲城镇和高棉乡贡献率最小。总体而言,TN、TP 负荷量空间分布呈现出较大的空间差异性,茶马镇、新铺镇、岗乌镇 3 个乡镇镇域面积以及耕地面积较大,人口比较多,因此这 3 个乡镇非点源污染负荷量大(表 3)。

成的污染。

#### 3.2 模型计算结果验证

为验证改进的模型有效性,本文通过 ECM 和 IECM 分别计算 2017 年北盘江流域(晴隆段)的 TN、TP 污染负荷量。计算结果及对比见表 5。实际观测值采用北盘江晴隆段盘江桥断面 2013—2017 年的实际监测数据。将实际观测值与估算值进行对比进行验证。

结果显示改进前的模型估算的 TN 污染负荷高于实际观测值,但 IECM 模型使相对误差从 28.97% 降到 9.80%,这与 Ding 等<sup>[5]</sup>的研究结果(改进后的模型使 TN 污染负荷估算量的相对偏差从 -33% 降到 -19%)相似,这说明改进 IECM 模型提高了 TN 负荷入河量的计算精度。TP 污染负荷同样高于实际观测值,改进后的模型使相对误差从 31.41% 降到了 2.06%。由此表明改进后的输出系数模型在计算非点源污染负荷量中精度更高,也是修正后的模型可以作为该研究区域农业非点源污染负荷计算的依据。

表 4 研究区域各乡镇不同污染源贡献情况

污染物	长流乡	牂牁镇	岗乌镇	新铺镇	江西坡镇	高棉乡	沙子镇	中营镇	花贡镇	茶马镇	光照镇	莲城镇
TN	48.73	62.61	64.63	105.47	33.79	41.32	51.77	44.30	61.58	97.58	95.77	36.31
TP	5.50	8.03	9.43	14.28	3.10	4.15	5.61	5.13	6.41	14.50	13.92	4.07
TN	35.50	24.80	27.14	23.11	32.03	22.81	31.66	42.80	27.02	56.23	31.59	17.63
TP	4.11	2.87	3.14	2.67	3.70	2.63	3.66	3.68	3.13	6.50	3.65	2.04
TN	61.70	163.76	162.47	154.76	150.25	78.50	115.10	123.68	121.14	128.04	110.82	95.60
TP	4.77	12.60	12.72	11.90	11.89	6.59	9.78	8.39	10.02	9.87	4.83	7.46

表 5 研究区域非点源污染负荷估算值

污染物	监测值/ t	ECM 模拟 结果/t	相对 误差/%	IECM 模拟 结果/t	相对 误差/%
TN	2351.46	3032.64	28.97	2582.00	9.80
TP	251.94	331.08	31.41	246.74	2.06

## 4 结论

(1) 2017 年北盘江流域(晴隆段)TN、TP 负荷强度趋势相似,且两种污染物分布特征基本一致,呈现分布不均的特质:污染负荷局部集中,坡度较高和人口密度大的区域负荷量较高。茶马镇、岗乌镇、光照镇、江西坡镇 4 个乡镇负荷量最大,表明这几个乡镇对整个流域来说,更易产生氮、磷污染。同时,研究区域内对 TN、TP 负荷量的贡献率皆为畜禽养殖>土地利用类型>农村生活。由此可知,在进行农业非点源污染治理时,畜禽养殖污染源应是重点考虑对象。

(2) 研究区域为典型的喀斯特山区,在降雨和地形的影响下,单独使用输出系数模型计算污染负荷,精度较差。通过引入降雨,地形因子对现有模型进行改进。验证后发现,改进的输出系数模型对污染负荷的模拟计算优化作用较为明显,说明将降雨、地形因素考虑后,可以提高模型的精度,在喀斯特山区具有更好的适用性。

### 参考文献:

- [1] 张亚尼,李泽利,邓小文,等.沙河流域非点源溶解态氮负荷模拟及源解析[J].水土保持研究,2017,24(5):352-356.
- [2] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4):323-349.
- [3] 丁晓雯,沈珍瑶,刘瑞民,等.基于降雨和地形特征的输出系数模型改进及精度分析[J].长江流域资源与环境,2008,17(2):306-309.
- [4] 蔡明,李怀恩,庄咏涛,等.改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J].水利学报,2004,7(6):40-45.
- [5] Ding X, Shen Z, Hong Q, et al. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3/4):233-244.
- [6] 任玮,代超,郭怀成.基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J].中国环境科学,2015,35(8):2400-2408.
- [7] 覃自阳,何丙辉,甘凤玲.模拟降雨下重庆喀斯特槽谷区径流氮磷元素流失特征[J].中国农业大学学报,2021,26(5):129-140.
- [8] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2011,31(21):6353-6362.
- [9] 彭文君,舒英格.基于 GIS 的石漠化山区县域土地利用空间变化的生态风险测度[J].水土保持研究,2018,25(1):342-348,355.
- [10] 史迎春,舒英格.喀斯特石漠化时空变化特征及驱动因子分析:以贵州晴隆县为例[J].林业资源管理,2017,000(1):135-143,152.
- [11] 黄国如,陈晓丽,任秀文.北江飞来峡库区典型流域非点源污染特征分析及模拟[J].水资源保护,2019,035(4):9-16.
- [12] 林明,丁晓雯,卢博鑫.降雨,地形对非点源污染产输影响机理综述[J].环境工程,2015,33(6):19-23.
- [13] Shen Z, Chen L, Ding X, et al. Long-term variation (1960—2003) and causal factors of non-point-source nitrogen and phosphorus in the upper reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 252:45-56.
- [14] 胡富昶,敖天其,胡正,等.改进的输出系数模型在射洪县的非点源污染应用研究[J].中国农村水利水电,2019(6):78-82.
- [15] Chen X, Liu X, Peng W, et al. Non-point source nitrogen and phosphorus assessment and management plan with an improved method in data-poor regions[J]. Water, 2018, 10(1):17.https://doi.org/10.3390/w10010017.
- [16] 马欣敏.基于 GIS 的区域降雨量时空分析及空间插值方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- [17] 丁洋,赵进勇,董飞,等.奶水河流域农业非点源污染负荷估算与分析[J].水利水电技术,2020,51(1):139-146.
- [18] 张昊天,周忠发,刘贤梅,等.基于 GIS 的红枫湖流域平坝区境内农业非点源污染估算[J].环境工程,2019,37(3):174-179.
- [19] 李政道,刘鸿雁,姜畅,等.基于输出系数模型的红枫湖保护区非点源污染负荷研究[J].水土保持通报,2020,40(2):193-198.