

李梦冰,周丙娟,胡可欣,等.基于改进输出系数模型的非点源氮磷负荷估算 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3321-3330.

Li M B, Zhou B J, Hu K X, et al. Estimation of non-point source nitrogen and phosphorus loads using an improved export coefficient modeling approach [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3321-3330.

基于改进输出系数模型的非点源氮磷负荷估算

李梦冰,周丙娟,胡可欣,王金亮* (江西农业大学国土资源与环境学院,江西 南昌 330045)

摘要: 本文通过引进降雨和地形修正因子,构建改进输出系数模型,开展赣江流域非点源氮磷污染负荷估算和污染来源识别研究.将改进前后输出系数模型进行精度对比,并对氮磷负荷强度与监测氮磷浓度数据进行相关性分析.结果表明研究区非点源氮磷污染负荷总量和负荷强度均呈现上升趋势,2016~2020年TN、TP输出量分别增加15.99%和16.37%,负荷强度分别增加15.89%和16.85%,空间上呈现北高南低,局部集中的特点,下游污染风险更大;土地利用是氮污染主要来源,输出占比为51.65%,畜禽养殖对磷污染的贡献最大,输出占比为36.82%;改进后输出系数模型相对误差比改进前明显降低,年均氮磷浓度与氮磷负荷强度均呈现出显著相关性($P<0.05$),模型改进后精度更高.运用改进的输出系数模型,能够更精确地评估流域非点源污染状况,识别主要污染源类型,并据此确定污染控制的关键区域,可为流域非点源污染控制与治理提供参考.

关键词: 非点源污染; 改进的输出系数模型; 氮磷负荷; 赣江流域

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)06-3321-10

Estimation of non-point source nitrogen and phosphorus loads using an improved export coefficient modeling approach. LI Meng-bing, ZHOU Bing-juan, HU Ke-xin, WANG Jin-liang* (College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China). *China Environmental Science*, 2025,45(6): 3321~3330

Abstract: This study developed an improved export coefficient model by integrating rainfall and topographic correction factors to estimate non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads and identify key pollution sources in the Ganjiang River Basin. The accuracy of the original and modified models was systematically compared, and correlation analysis was performed between nitrogen and phosphorus load intensity and monitored concentration data. The results demonstrated an increasing trend in both total pollution loads and load intensities from 2016 to 2020. Total nitrogen and total phosphorus exports increased by 15.99% and 16.37%, respectively, while corresponding load intensities rose by 15.89% and 16.85%. Spatially, the pollution distribution exhibited a characteristic north-high-south-low pattern with localized concentration, indicating higher contamination risks in downstream areas. Land use emerged as the primary source of nitrogen pollution, contributing 51.65% of total nitrogen exports, whereas livestock farming was identified as the dominant phosphorus source, accounting for 36.82% of total phosphorus outputs. The enhanced export coefficient model demonstrated significantly reduced relative errors compared to the original version. Statistical analysis revealed significant correlations ($P<0.05$) between annual average nitrogen or phosphorus concentrations and load intensities, confirming the improved model's superior accuracy. The refined model enables more precise assessment of watershed non-point source pollution, facilitates identification of major pollution sources, and supports targeted delineation of critical control zones, thereby providing valuable scientific support for non-point source pollution management and remediation strategies in river basins.

Key words: non-point source pollution; improved export coefficient model; nitrogen and phosphorus load; Ganjiang River Basin

非点源污染大多由氮、磷等营养物质组成,这些物质在释放后,通过降雨和径流等方式被运送到河流中^[1].非点源污染的形成是一个复杂和随机的过程,具有广泛性、不确定性和时间延迟等特征^[2],准确量化非点源污染氮磷负荷具有一定困难.

模型模拟是估算非点源氮磷污染的有效方法,根据模型复杂度和时空尺度差异性主要分为机制模型和经验模型^[3].常见的机制模型有SWAT^[4]、HSPF^[5]、AnnAGNPS^[6]等,这些模型结果精度较高,

但因其参数和实测数据多,难以推广^[7-8].经验模型最常用的为输出系数模型,输出系数模型利用污染物排放系数和容易获取的土地利用数据,直接构建土地使用与氮磷污染之间的模型,因具备数据需求低、操作便捷以及模拟精度较高的优势被广泛运用^[9].最经典的传统输出系数模型由Johnes等^[10]构建,该

收稿日期: 2024-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42207416)

* 责任作者, 讲师, wjluotu@jxau.edu.cn

模型将区域输出污染物负荷等于区域内各个污染源的损失之和,通过建立接纳水体非点源污染负荷与土地利用之间的关系,模拟非点源污染空间分布特征.尽管该模型输入参数少、结构简单,但也存在一定局限性,难以在环境条件差异性较大的研究区域推广应用^[11].随着对流域非点源污染研究的深入,学者们不断对传统输出系数模型进行优化改进以提升非点源氮磷负荷预测精度.例如通过引入污染负荷系数^[12]、产污系数和截留系数^[13]以及空间修正的入河系数^[14]等关键参数改进输出系数模型,量化非点源氮磷污染输出强度;将输出系数模型与SLURP^[15]、SWAT^[16]等水文模型相结合,实现对非点源污染“产生-流失-入河”过程的耦合;进行多因子整合,综合考虑降雨、地形、地表径流、土壤淋溶及景观截留等环境要素^[3,17]的影响改进输出系数模型.这些改进显著提高了输出系数模型对非点源污染形成机制的解释力和负荷预测的准确性.

传统输出系数模型主要通过多元线性回归分析建立土地利用类型与污染负荷输出之间的联系,利用污染物的输出系数,将各种污染源的负荷进行累加,估算整个流域的面源污染负荷总量^[18].其具有操作过程便捷,需要参数少的特点,模拟精度在一定程度上能满足要求,已经成为在数据资料不足的流域进行污染负荷估算的常用模型.但该模型的一个明显缺陷在于,它所采用的输出系数仅代表流域内污染负荷的一个大致水平,没有考虑降雨、地形因素对污染负荷模拟结果^[19]的影响,并未体现在污染物迁移过程中,地形起伏变化和降雨量差异带来的影响,仅适用于降雨均匀的平原地区.降雨因子是流域非点源污染过程中的内在驱动,地形因子是污染物迁移的外在驱动力^[20].降雨径流和土壤侵蚀是影响面源污染产生的重要的驱动因子,地形的坡度差异可以影响营养物的传输过程^[14],忽略降雨和地形因素的影响会降低模型的精度,难以准确定量评估污染物的负荷.

赣江作为鄱阳湖流域最大的水系,水土流失和水体污染问题日益突出.赣江流域以山地和丘陵为主要地形,其中山地丘陵地区占据了流域总面积的64.7%.这种地形特征使得赣江流域非点源污染在产生和运输过程中更容易受到降水和地形条件的影响.因此本文针对赣江流域地区因降雨

和地形差异性而造成的传统输出系数模型不适用问题,引入降雨和地形修正系数改进输出系数模型,选取土地利用类型、农村生活、畜禽养殖三类污染源,模拟赣江流域TN、TP污染负荷量及其强度,研究流域内氮磷负荷的时空分布特征,识别主要的污染源类型,以期为改善赣江流域水质问题提供相应防治依据,为非点源污染控制与治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

赣江是鄱阳湖流域第一大河,河流长度约766km,自南向北流经江西省.流域位于113°30'E~116°40'E、24°29'N~29°11'N之间,覆盖范围为83500km²,流经赣州、吉安、宜春等市所辖的44个县(市、区).赣江流域年均降水量为1400~1800mm,属于亚热带湿润季风气候.流域内呈现山地丘陵多平原少、水系密但分布不均衡的地形格局.赣江流域生态环境面临诸多挑战,主要表现为:森林生态系统功能退化,林分结构失衡;水土流失问题突出,水体污染日益严峻.

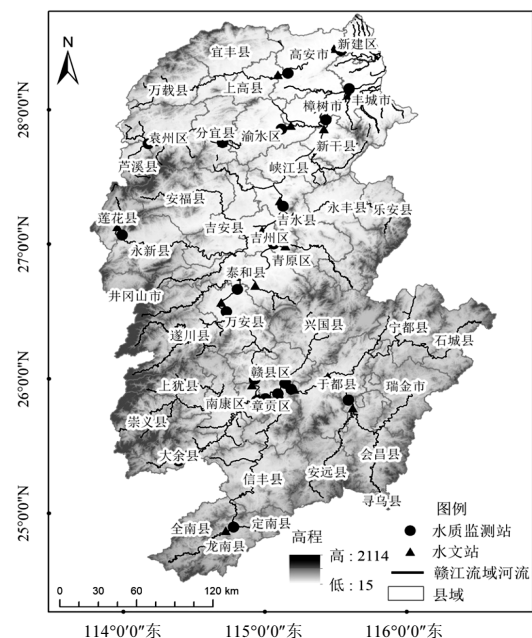


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源与处理

研究数据包括土地利用、地形、水系、降水、

统计年鉴、河流断面氮磷监测数据。(1)地表覆盖数据来源于2016年和2020年的30m全球地表覆盖数据GlobeLand30,精度为85.72%,Kappa系数0.82。(2)DEM数据获取于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),为30m空间分辨率。(3)水系数据通过ArcGIS水文工具对DEM数据进行填注,再进行流向分析,生成河流栅格网络。(4)赣江流域边界矢量数据于中国科学院环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),基于DEM提取的中国流域数据集。(5)水文数据获取自江西省水文监测中心(<http://www.jxsw.gov.cn>),数据来自赣江流域28个水文站点(如图1所示)。具体为赣江流域2016年、2020年的逐月月均径流量数据,单位为 m^3 。(6)水质数据来源于江西省生态环境监测中心(<http://sthjt.jiangxi.gov.cn>),数据来自赣江流域28个河流断面监测点(如图1所示)。具体为2016年、2020年平均总氮、总磷浓度数据,单位为 mg/L 。(7)降水数据获取自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),覆盖赣江流域及其周边区域的气象站点为15个,利用克里金协同空间插值方法获取2010~2020年年降雨量栅格数据。(8)统计数据收集于统计年鉴和分县的国民经济与社会发展统计公报等,从中收集到2016年、2020年赣江流域内各县农村人口及大牲畜、生猪、羊、家禽的数量。

1.3 研究方法

1.3.1 改进的输出系数模型 传统的输出系数模型往往未能充分考虑降水和地形对非点源污染的影响。降水作为非点源污染物扩散的关键驱动力^[21],而地形则在污染物的迁移和转化过程中起重要作用^[22]。为了更准确地反映非点源污染的分布和动态,将降水和地形这两个关键因素纳入模型中,以修正传统的输出系数模型^[23-24]。模型表达式为:

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

式中: L 为营养物质的流失量,kg; α 为降雨因素; β 为地形因素; E_i 为第*i*种污染源的输出系数,农村人口、畜禽养殖与土地利用的输出系数单位分别是 $Kg/(人 \cdot a)$, $kg/(头 \cdot a)$, $kg/(hm^2 \cdot a)$; A_i 为第*i*类土地利用类型面积, km^2 或第*i*种畜禽的数量、人口数量; I_i 为第*i*种营养源物质的输入量,kg; P 为由降水输入的营养物质质量,kg,参考相关研究^[23,25],故本文未考虑此项的影响。

1.3.2 降水影响因子 降雨影响因子 α 可以反映污染物负荷的年际变化以及降雨特性对产物的影响,是非点源污染产污的直接驱动力。降雨的侵蚀和冲刷使得污染物随土壤颗粒及其他悬浮固体进入河道,非点源污染由此发生^[26],对降雨侵蚀力值的正确估算是非点源污染负荷量的基础。降雨侵蚀力值采用月降雨量模型^[27]计算,其表达式如下:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R_i}{\bar{R}} \\ R_i = \sum_{j=1}^{12} r_{i,j} \\ r_{i,j} = \frac{125.92 \cdot FI_{i,j}^{0.603} - 111.173 \cdot FI_{i,j}^{0.691} + 68.73 \cdot FI_{i,j}^{0.841}}{3} \\ FI_{i,j} = \frac{P_{i,j}^2}{P_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_i 为第*i*年降雨侵蚀力因子; \bar{R} 为多年平均降雨侵蚀力因子; $r_{i,j}$ 为第*i*年第*j*月降雨侵蚀力因子; $FI_{i,j}$ 为Fournier指数; $P_{i,j}$ 为第*i*年第*j*月降雨量,mm; P_i 为第*i*年降雨量,mm。本文利用研究区内2010~2020年间月降雨量数据计算出2016和2020年降雨影响因子分别为0.96和1.05。

1.3.3 地形影响因子 地形影响因子 β 是非点源污染产污的外在驱动力。地形坡地差异通过影响径流量和流速进而影响污染物的迁移,对非点源污染物产生和运移具有重要影响^[26]。根据文献^[23], β 定义如下:

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

式中: c 和 d 都为常量; θ_j 为研究区内空间单元的坡度, $^\circ$; $\bar{\theta}$ 为整个研究区域的平均坡度, $^\circ$ 。通过文献^[23,28]确定 d 为0.6104,根据赣江流域DEM数据,计算出研究区域的平均坡度为 8.73° ,可以得到本研究区的地形影响因子为0~3.14(图2)。

$$\beta = \frac{\theta_j^{0.6104}}{8.73^{0.6104}} \quad (4)$$

1.3.4 输出系数确定 获取输出系数的主要途径包括进行现场监测或查阅文献^[29]。现场监测精度高,适合小流域,查阅文献法适用于大流域和实验条件不足的地区。本研究区流域面积大,特征差异明显,现场监测工作量大,难以快速得到结果。因此采用查阅文献的方式获得输出系数,畜禽养殖参考中国畜禽粪便排泄系数与江西省规模猪场污染物系数^[30-31],人口输出系数参考生态环境部发

布的污染物排放量的排污系数^[32]和鄱阳湖区域相关研究^[33],畜禽养殖业和农村人口的总氮和总磷输出系数分别取为各自排泄系数的 10%^[34];不同土地利用类型的输出系数参考我国平均水平和前人在国内典型区域的研究成果^[35-36],结合赣江流域自然、气候、地形等实际情况,确定非点源污染输出系数,本研究的输出系数见表 1.



图2 地形影响因子

Fig.2 Topography correction factor

表 1 各污染源氮磷输出系数

Table 1 Export coefficients of nitrogen and phosphorus for various pollution sources

污染源		总氮输出系数	总磷输出系数
农村生活[kg/(人·a)]	农村人口	2.14	0.214
	大牲畜	10.21	0.624
畜禽养殖[kg/(头·a)]	猪	0.74	0.179
	羊	0.4	0.085
	家禽	0.04	0.009
土地利用类型 [kg/(hm ² ·a)]	耕地	2.2	0.117
	林地	0.24	0.015
	草地	0.6	0.08
	水域	1.5	0.036
	建设用地	1.12	0.214
	裸地	1.49	0.151

1.3.5 氮磷输出负荷模拟结果验证 采用流域出口实测氮磷总量检验改进前后输出系数模型的计算精度.在精度验证中需要用到 TN、TP 年总负荷量,将实测 TN、TP 浓度数据进行 TN、TP 年总负荷量

转换.计算公式如下:

$$L_o = \sum_{i=1}^{12} 10^{-6} \times C_i \times Q_i \quad (5)$$

式中: L_o 为年总负荷量, t; C_i 为实测氮磷浓度指标, mg/L; Q_i 为实测月平均径流量, m³/s.通过分析实测 TN、TP 负荷量与模型模拟值的相关误差,验证改进输出系数模型精度.相对误差的计算公式为:

$$R_e = \frac{R_t - O_t}{O_t} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_e 为相对误差; R_t 为输出系数模型模拟值; O_t 为实测值.

2 结果与分析

2.1 模型精度验证

基于改进的输出系数模型对赣江流域进行非点源污染负荷的评估,为验证改进前后模型精度,将赣江流域 28 个水文站实测月均径流量和 28 个断面监测点实测氮磷浓度数据根据式(5)计算得出的 2016 年、2020 年 TN、TP 实测值与改进前后输出系数模型 2016 年、2020 年 TN、TP 模拟值进行相对误差计算,结果见表 2.采用 28 个断面监测点实测 2016 年、2020 年年均 TN、TP 浓度数据与计算出的 2016 年、2020 年 TN、TP 输出负荷强度进行 Pearson 相关性分析,结果见图 3.通过引入基于降雨和地形的改进输出系数模型,TN、TP 负荷的模拟误差得到了显著降低.具体来说,2016 年 TN 负荷模拟值与实测值的误差由改进前的 13.21% 下降至 6.51%,2020 年从 10.89% 下降至 4.32%;TP 负荷模拟值与实测值的误差 2016 年由改进前的 9.91% 下降至 3.41%,2020 年从 10.37% 下降至 3.84%,这表明通过改进输出系数模型使得模拟精度具有明显提升.此外,估算的 2016 年 TN 输出负荷强度、2020 年 TN 输出负荷强度与 2016 年年均 TN 浓度、2020 年年均 TN 浓度 Pearson 相关系数分别为 0.7 与 0.76,均呈现显著的正相关关系;估算的 2016 年 TP 输出负荷强度、2020 年 TP 输出负荷强度与 2016 年年均 TP 浓度、2020 年年均 TP 浓度 Pearson 相关系数分别为 0.88 与 0.87,同样呈现显著的相关性.由此可见,改进后的输出系数模型估算的非点源氮磷负荷与实际监测结果一致,可为赣江流域及环鄱阳湖区域的非点源污染控制研究提供定量化依据.

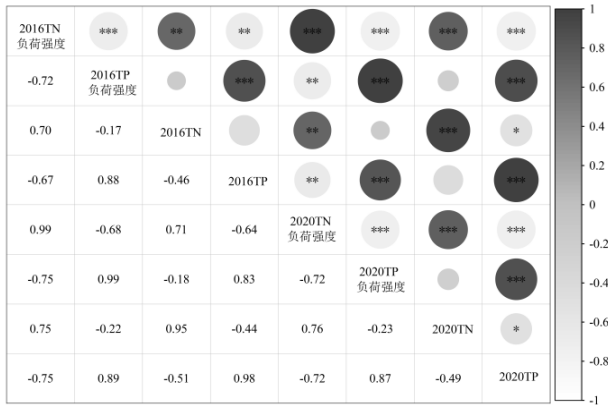


图3 氮磷污染负荷模拟结果与实际氮磷浓度相关性分析
Fig.3 Correlation analysis between simulated nitrogen and phosphorus loads and measured concentrations

表2 输出系数模型改进前后污染负荷模拟值与实测值结果对比

Table 2 Comparison between simulated and measured pollution loads before and after the improvement of the export coefficient model

污染物	年份	实测值(t/a)	传统输出系数模拟值(t/a)	改进前相对误差 (%)	改进输出系数模拟值(t/a)	改进后相对误差 (%)
TN	2016	94530.27	107021.91	13.21	100686.21	6.51
	2020	114878.14	127386.21	10.89	119844.95	4.32
TP	2016	8294.54	9116.93	9.91	8577.21	3.41
	2020	9877.68	10902.02	10.37	10256.62	3.84

2.2 非点源 TN、TP 输出负荷量

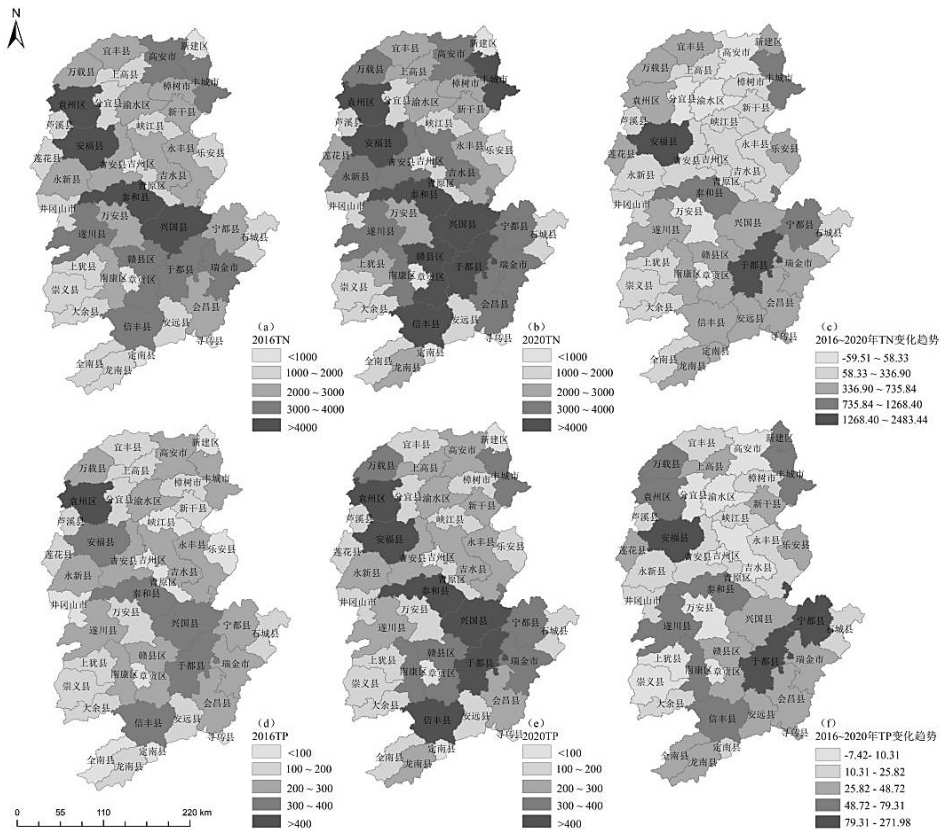


图4 2016年、2020年 TN、TP 负荷空间分布及变化趋势

Fig.4 Spatial distribution and change trend of TN and TP load in 2016 and 2020

根据改进输出系数模型公式,以县级行政区为单元,如图4所示,赣江流域2016年TN负荷量为100686.21t/a,2020年TN负荷量为119844.95t/a,2016~2020年间,TN负荷量增加了19158.74t/a,增幅为15.99%。在2016年,研究区域内各县TN输出负荷量在151.16~4669.984t/a,2020年赣江流域各县市TN输出负荷量在201.16~6402.27t/a。在2016~2020年间,TN负荷量增加最多的是于都县,增加了

2483.44t/a,增幅为63.37%。总体来说,从2016~2020年,赣江流域TN输出负荷量呈现明显上升趋势。赣江流域2016年TP负荷量为8577.21t/a,2020年TP负荷量为10256.62t/a,2016~2020年间,TP负荷量增加了1679.41t/a,增幅为16.37%。在2016年,TP输出负荷量在13.15~436.15t/a,2020年,赣江流域各县市TN输出负荷量在17.15~609.26t/a。总体来说,2016~2020年,赣江流域TP输出负荷量也呈现增加趋势。

在 2016~2020 年间,不同县之间 TN 与 TP 负荷量高低趋势一致,TN 负荷量较大的县市,TP 负荷量也较大.TN 与 TP 负荷量变化趋势总体一致,TN 负荷量上升的县市,TP 负荷量也呈上升趋势.

2.3 非点源 TN、TP 输出负荷强度

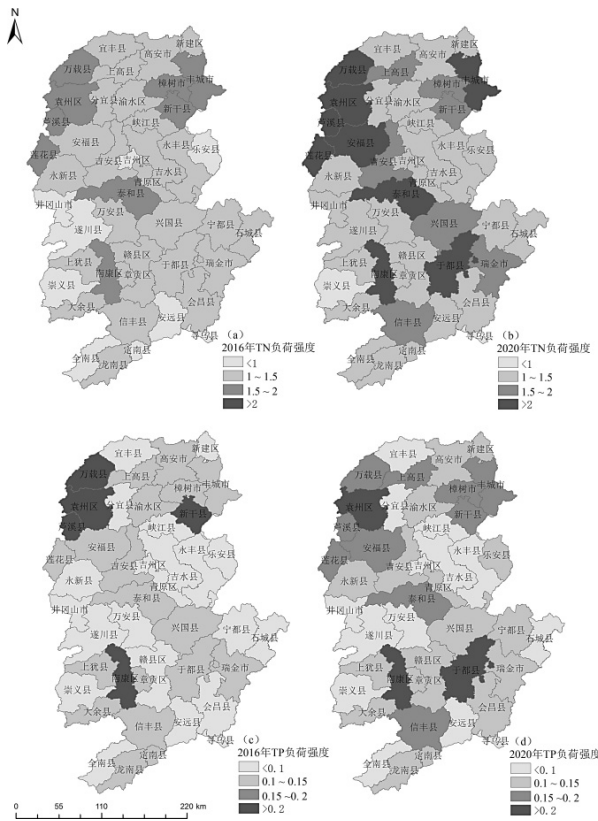


图5 2016年和2020年总磷负荷强度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of TN and TP load intensity in 2016 and 2020

将 2016 年、2020 年各县级行政区单元 TN、TP 输出负荷量除以各县级行政区单元面积,计算得出各县级行政区单元 TN、TP 输出负荷强度(图 5).赣江流域 2016 年 TN 负荷强度为 $1.27t/(km^2 \cdot a)$, 2020 年 TN 负荷强度为 $1.51t/(km^2 \cdot a)$,TN 单位面积污染量增加了 $0.24t/(km^2 \cdot a)$,增幅为 15.89%. 2016 年各县市非点源 TN 输出负荷强度在 $0.71 \sim 1.99t/(km^2 \cdot a)$, 2020 年赣江流域 TN 输出负荷强度在 $0.9 \sim 2.31t/(km^2 \cdot a)$.2016~2020 年间,赣江流域内各县 TN 负荷强度总体呈现上升趋势.结果显示 TN 输出负荷强度与 TN 输出量变化趋势总体一致.赣江流域 2016 年 TP 负荷强度为 $0.11t/(km^2 \cdot a)$,2020 年 TP 负荷强度为 $0.13t/(km^2 \cdot a)$,增幅为 16.85%.2016 年各县非点源 TP 输出负荷强度在 $0.06 \sim 0.19t/(km^2 \cdot a)$,2020 年赣江流域 TP 输出负荷强度

在 $0.06 \sim 0.21t/(km^2 \cdot a)$. 2016~2020 年间,赣江流域内各县 TP 负荷强度呈现上升趋势.

总体来说,赣江流域在 2016~2020 年间,TN、TP 负荷强度呈现上升趋势,变化趋势与 TN、TP 输出变化趋势保持一致.从非点源污染 TN、TP 输出强度空间分布总体特征来看,赣江流域呈现北高南低,局部集中的特点.TN、TP 负荷强度高的县多位于赣江流域下游,表明下游面临着更大的 N、P 污染风险,需要加强治理.

2.4 非点源 TN、TP 负荷来源分析

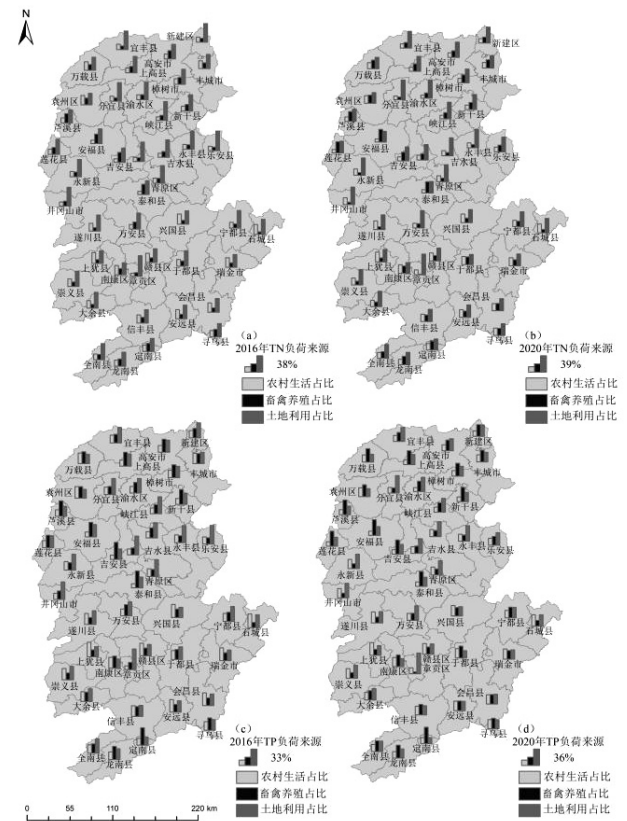


图6 TN、TP 负荷来源

Fig.6 TN and TP load sources

根据改进输出系数模型公式,以县级行政区为单元分别计算出农村生活、畜禽养殖和土地利用氮磷负荷量(图 6),再得出这 3 类污染源氮磷负荷量与 TN、TP 负荷量的比值(图 7、表 3),2016 年赣江流域中,不同污染源对 TN 负荷量的贡献为:土地利用 > 农村生活 > 畜禽养殖.2020 年为:土地利用 > 畜禽养殖 > 农村生活.氮污染负荷,从 2016~2020 年,农村生活产生的负荷量呈现了上升的趋势,增加了 $3292.63t/a$,增幅为 12.05%,农村生活 TN 负荷量占比呈现下降趋势,由 23.88%下降为 22.81%.畜禽养

殖 TN 负荷量呈现上升趋势,增加了 9251.87t/a,增幅为 30.23%,畜禽养殖 TN 负荷量占比呈现上升趋势,由 21.21%上升为 25.54%。土地利用 TN 负荷量也呈现上升趋势,输出量增加了 6614.25t/a,增幅为 10.68%。不同土地利用类型贡献率顺序为耕地>建设用地>水域>林地>草地>裸地,2016~2020 年耕地 TN 负荷量都最高,且呈现上升趋势,由 38715.06t/a 增加到 43743.85t/a。

在 2016 年,赣江流域中,各污染源对 TP 负荷量的输出占比顺序为:土地利用>畜禽养殖>农村生活。2020 年为畜禽养殖>土地利用>农村生活。磷污染负荷,从 2016~2020 年,农村生活产生的负荷量有小

幅度增长,增加了 329.26t/a,增长幅度为 12.05%,农村生活 TP 负荷量占比呈现下降趋势,由 28.03%下降为 26.65%。畜禽养殖 TP 负荷量呈现上升趋势,增加了 923.85t/a,增幅为 24.46%,畜禽养殖 TP 负荷量占比呈现上升趋势,由 33.26%上升为 36.82%。2016~2020 年间,猪的 TP 负荷量最大。土地利用 TP 负荷量也呈现上升趋势,输出量增加了 426.3t/a,增幅为 11.38%,土地利用 TP 负荷量占比呈现下降趋势,由 38.72%下降为 36.53%。不同土地利用类型贡献率顺序为耕地>建设用地>水域>林地>草地>裸地,2016~2020 年耕地 TP 负荷量都最高,是主要的污染源,且呈现上升趋势,由 2058.94t/a 增加到 2326.38t/a。

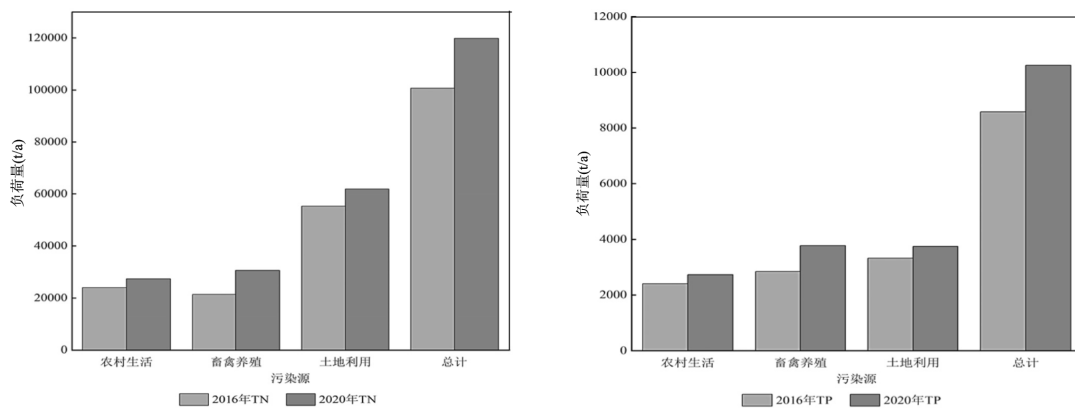


图 7 2016 年、2020 年各污染源氮磷输出量

Fig.7 Nitrogen and phosphorus output from pollution sources in 2016 and 2020

表 3 2016 年、2020 年各污染源氮磷输出量与占比

Table 3 Results of nitrogen and phosphorus output and percentage of each source in 2016 and 2020

指标	年份	农村生活		畜禽养殖		土地利用		输出量合计 (t/a)
		输出量(t/a)	占比(%)	输出量(t/a)	占比(%)	输出量(t/a)	占比(%)	
TN	2016	24041.08	23.88	21353.94	21.21	55291.18	54.91	100686.21
	2020	27333.71	22.81	30605.81	25.54	61905.43	51.65	119844.95
TP	2016	2404.11	28.03	2852.40	33.26	3320.70	38.72	8577.21
	2020	2733.37	26.65	3776.25	36.82	3747.00	36.53	10256.62

3 讨论

3.1 改进输出系数模型的可行性

研究表明,鄱阳湖点源污染少且治理效果好,当前主要以非点源污染为主,陈武权等^[33]利用产排污系数法计算鄱阳湖周边地区污染排放量,点源排放占 1.31%,非点源占 98.69%。赣江作为鄱阳湖最大水系,对鄱阳湖非点源贡献占比最大。赣江流域农业发达,由于化肥农药大量施用,畜禽业蓬勃发展,农村排污量大,非点源污染成为流域的主要污染源^[33]。

由于参数需求少且结构简化,传统输出系数模型在流域污染负荷评估中得到了普遍应用^[37]。尽管传统输出系数模型在估算非点源污染负荷方面具有一定价值,但它也面临着一些局限性,主要包括环境因素的忽视和区域差异性等^[38]。对于地形、降雨属性等环境背景差异较大的流域,运用传统输出系数计算的氮磷污染负荷与实测值存在较大误差,因此对于地形、降水条件等其他因素差异较大的地区,应对该模型作相应的修正^[14]。本文引入地形、降雨修正因子,进而改进输出系数模型,通过改进前后的输

出系数模型与实测值的相对误差对比以及估算的氮磷负荷强度与年均氮磷浓度指标的相关性分析,验证了改进后的输出系数模型能够更准确的模拟赣江流域的非点源污染。

改进后的输出系数模型相对误差下降,精度更高,这主要是由于改进后输出系数融合了地形修正因子,更加突出降雨作用下地形产流的空间影响,考虑污染源和受纳水体之间的污染物迁移过程中的迁移损失.当前研究的热点在于优化输出系数的确定方法和调整环境因素的校正机制.通过这些模型的持续改进,旨在提升其在模拟污染负荷方面的精确度,并拓展其应用范围.例如 Guo 等^[39]在输出系数模型改进中,引入大气沉降因子,考虑迁移和下渗作用,模拟入河过程,计算保留率;段阳等^[35]引入流域损失系数,对输出系数模型改进后评估流域非点源污染.非点源污染物在进入收纳水体的迁移物理过程是十分复杂的,需要分析各种空间参数对其产生的阻力和动力机制,使得非点源污染负荷模拟更加准确.在进行赣江流域非点源氮磷污染模拟的研究中,采用改进的输出系数模型是一种有效的方法.这种模型通过引入降雨因子和地形因子来模拟非点源污染的输出,但其也具有一定的局限性,如忽略了距离和大气沉降等影响因素,同时在以后的研究中还需引入其他空间参数,以提高模型的精度.

3.2 流域氮磷污染负荷来源解析及对策

根据输出系数模型估算的 TN、TP 污染输出负荷量、负荷强度及不同污染源的贡献率,分别从土地利用、禽畜养殖和农村生活角度对研究区域的非点源污染来源进行分析并针对不同污染物来源类型,提出相应的治理措施和防治策略.

土地利用是影响研究区域非点源污染的关键因素,不同土地利用类型对非点源氮磷污染贡献占比耕地>建设用地>水域>林地>草地>裸地.农业种植生产活动是产生非点源污染的重要原因,非点源污染高负荷区集中分布在赣抚平原、吉泰盆地农业主产区.赣抚平原、吉泰盆地农业主产区主要以种植水稻为主,而目前国内氮肥的平均利用率为 30%~35%,磷肥为 10%~20%^[40],化肥利用率低和施肥不当加剧非点源污染.对此应强化农业教育,推广科学施肥,倡导测土配方,优化施肥比例.同时对农药进行减量控制,合理轮作,减少污染.针对赣南丘陵盆地果树

种植加剧非点源污染问题,应科学规划、合理划定禁止开发、限制开发、可开发区域,充分发挥生态自然修复能力,保留原生植被,设置植被隔离带,采取水土保持措施.

畜禽养殖是非点源磷污染的主要来源,其中生猪养殖污染贡献占比最大.虽然当前养猪场逐步规模化,但散户养殖数量也呈上升趋势,且许多生猪散养户没有配备环保设施,部分规模养殖场的环保设施标准也较低,未能达到标准排放要求.局部地区生猪养殖密度较大,对环境造成较大压力.猪难以消化饲料中的植酸磷^[41],粪便中含有大量的磷,如果处理不当,粪便中的磷会通过地表径流进入水体.因此应对畜禽养殖应实施种养结合,提高资源的循环利用效率,并减少环境污染,即通过将粪便资源化,建立粪便收集机制,将畜禽排泄物集中处理,转化为可利用资源,利用畜禽粪便作为农业肥料,通过还田方式提升土壤肥力,促进作物生长;推动畜牧业与种植业的深度融合,形成相互支持的生态循环系统;加强对畜禽养殖环境污染的监管,确保粪便处理和利用符合环保标准.

农村生活是非点源污染的重要来源,研究表明农村生活非点源氮磷负荷量占比呈现下降趋势,2016~2020 年农村生活 TN 负荷量占比由 23.88%下降为 22.81%,TP 负荷量由 28.03%下降为 26.65%.农村生活污水处理相关配套设施的完善是其污染占比下降的重要原因.赣江流域农村生活污水覆盖范围已建成污水处理设施约 3500 个,占全省比例 47%,其中赣州市农村生活污水处理设施 1695 个,覆盖行政村比例达 43%,建成数和覆盖村庄数均居全省第一^[42].虽然农村生活非点源氮磷负荷量占比下降,但是其仍然占有重要比例,还需采取完善农村生活污染物收集体系、制定针对性处理标准、加强生活垃圾处理设施建设、引进无害化处理技术、科学引导农村居民环境行为等措施.

4 结论

4.1 2020 年 TN 输出量与 TP 输出量分别较 2016 年增加 15.99%和 16.37%,总体呈现上升趋势;2020 年 TN 负荷强度与 TP 负荷强度分别较 2016 年增加 15.89%和 16.85%,变化趋势与 TN、TP 输出量变化

趋势总体一致。

4.2 从非点源污染 TN、TP 输出强度空间分布总体特征来看,赣江流域呈现北高南低,局部集中的特点。TN、TP 负荷强度高的县多位于赣江流域下游,表明下游面临着更大的 N、P 污染风险,需要加强治理。

4.3 从非点源污染来源看,土地利用是氮污染的主要来源,农业活动是导致非点源污染的主要原因,负荷高区域主要分布在赣抚平原、吉泰盆地;畜禽养殖对磷污染贡献最大,其中猪的 TP 负荷量最大,应加强监管,促进粪便资源化。

4.4 对比改进前后输出系数模型氮磷负荷模拟值与实测值相对误差,改进后输出系数模型精度更高,相对误差更小;年平均 TN、TP 浓度与其负荷强度相关性 $P < 0.05$,均呈现出显著相关性,表明了改进后的输出系数模型估算的赣江流域非点源氮磷污染负荷与实际相符,精度较高。

参考文献:

- Zhang T, Ni J, Xie D. Assessment of the relationship between rural non-point source pollution and economic development in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2016,23(8):8125-8132.
- 裴亮,刘慧明,莫家玉,等.南水北调中线工程农业非点源污染来源及控制措施 [J]. *生态经济*, 2011,21(6):164-167.
Pei L, Liu J M, Mo J Y, et al. Countermeasures and origin against agricultural non-point pollution prevention in the middle route project of the South-to-North water transfer [J]. *Ecological Economy*, 2011, 21(6):164-167.
- 庞树江,王晓燕.流域尺度非点源总氮输出系数改进模型的应用 [J]. *农业工程学报*, 2017,33(18):213-223.
Pang S J, Wang X Y. Application of modified diffuse total nitrogen export coefficient model at watershed scale [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 213-223.
- 张国锐,刘成高,贾玉山,等.基于 SWAT 模型的沂河流域氮负荷时空分布及其关键来源研究 [J]. *水电能源科学*, 2023,41(8):66-69.
Zhang G R, Liu C G, Jia Y S, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and key sources of nitrogen in Yihe River Basin based on SWAT model [J]. *Water Resources and Power*, 2023,41(8):66-69.
- 莫军成,黄春福,杨家亮,等.HSPF 模型在淠河流域洪水预报中的应用 [J]. *水电能源科学*, 2023,41(2):70-73.
Mo J C, Huang C F, Yang J L, et al. Application of HSPF model in flood forecasting of Lushui Basin [J]. *Water Resources and Power*, 2023,41(2):70-73.
- Luo C, Li Z, Li H, et al. Evaluation of the AnnAGNPS model for predicting runoff and nutrient export in a typical small watershed in the Hilly region of Taihu Lake [J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2015,12(3):10955-10973.
- 谢晖,邱嘉丽,董建玮,等.流域水文模型在面源污染模拟与管控中的应用研究进展 [J]. *生态学报*, 2022,42(15):6076-6091.
Xie H, Qiu J L, Dong J W, et al. Research of the HSPF model on nonpoint source pollution modeling and management: progresses and perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(15):6076-6091
- 杜娟,李怀恩,李家科.基于实测资料的输出系数分析与陕西泾河流域非点源负荷来源探讨 [J]. *农业环境科学学报*, 2013,32(4):827-837.
Du J, Li H E, Li J K. Analysis on export coefficients based on measured data and study on the sources of non-point load for Fenghe River watershed in Shaanxi Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013,32(4):827-837.
- 刘庄,晁建颖,张丽,等.中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题 [J]. *水科学进展*, 2015,26(3):432-442.
Liu Z, Yao J Y, Chao L, et al. Current status and problems of non-point sourcepollution load calculation in China [J]. *Advances in Water Science*, 2015,26(3):432-442.
- 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 (Amsterdam)*, 1996,183(3/4):323-349.
- Wang W, Chen L, Shen Z. Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution - Science Direct [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 747:141-164.
- 徐立红,陈成广,胡保卫,等.基于流域降雨强度的氮磷输出系数模型改进及应用 [J]. *农业工程学报*, 2015,31(16):159-166.
Xu L H, Chen C G, Hu B W, et al. Improvement of export coefficient model for N and P based on rainfall intensity and its application [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(16):159-166.
- Wang J, Shao J, Wang D, et al. Simulation of the dissolved nitrogen and phosphorus loads in different land uses in the Three Gorges Reservoir Region-based on the improved export coefficient model [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015,17(11):1976-1989.
- 张景琳,张艳军,王素描,等.引入空间修正入河系数的改进输出系数模型研究——以长江流域为例 [J]. *中国农村水利水电*, 2024,12(3):78-85.
Zhang J L, Zhang Y J, Wang S M, et al. An improved export coefficient model with a spatially modified river load ratio—A case study of the Yangtze River Basin [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024,12(3):78-85.
- 龙天渝,梁常德,李继承,等.基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测 [J]. *环境科学学报*, 2008,28(3):574-581.
Long T Y, Liang C D, Li J C, et al. Forecasting the pollution load of nonpoint sources imported to the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008,28(3):574-581.
- 翟文亮,唐见,汪成刚,等.耦合改进输出系数法-SWAT 模型的丹江口水库流域非点源污染模拟 [J]. *长江科学院院报*, 2023,40(7):50-58.
Zhai W L, Tang J, Wang C G, et al. Simulation of Non-point source pollution in Danjiangkou Reservoir Basin based on coupled improved output coefficient method and SWAT model [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023,40(7):50-58.
- Chengchengyuan, Limingliu, Jinweiye, et al. Assessing the effects of rural livelihood transition on non-point source pollution: a coupled ABM-IECM model [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017,24(14):12899-12917.
- 苟婷,裴德富,梁荣昌,等.基于输出系数模型的东江源头区农业面源氮磷排放特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(12):6539-6550.
Gou T, Pei D F, Liang C R, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources in the source area of Dongjiang River based on output coefficient model [J]. *Chinese Environmental Science*, 2023,43(12):6539-6550.
- 刘茂辉,赵越,钱丽萍,等.红壤茶园的输出系数模型的改进及其应用 [J]. *水资源与水工程学报*, 2014,25(2):85-90.
Liu M H, Zhao Y, Qian L P, et al. Improvement and application of export coefficient model in tea garden of red-soil [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014,25(2):85-90.
- Wenchao L, Jiehua W, Xiuling P B. Effects of heavy rain on the concentrations and forms of carbon, nitrogen and phosphorus in urban rivers of northern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023,30(24):64971-64981.

- [21] Shen Z, Hong Q, Yu H, et al. Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2008,405(1-3):195-205.
- [22] Liu Q Q, Singh V P. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation [J]. *Journal of hydrologic engineering*, 2004,9(5):375-382.
- [23] 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.
- [24] 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.
Ding X W, Shen Z Y, Liu R M, et al. Improved export coefficient model considering precipitation as well as terrain and its accuracy analysis [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008,17(2):306-309.
- [25] 耿润哲,王晓燕,焦 帅,等.密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2013,33(5):1484-1492.
Geng R Z, Wang X Y, Jiao S, et al. Application of improved export coefficient model in estimating non-point source nutrient load from Miyun reservoir watersheds [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5):1484-1492.
- [26] 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.
Lin M, Ding X W, Lu B X. Review of researches on influence mechanism of rainfall, topography on the production and transportation of non-point source pollution [J]. *Environmental Engineering*, 2015,33(6):19-23.
- [27] 龙天渝,刘 敏,刘 佳.三峡库区非点源污染负荷时空分布模型的构建及应用 [J]. *农业工程学报*, 2016,32(8):217-223.
Long T Y, Liu M, Liu J. Development and application of non-point source pollution load model of spatial and temporal distribution in Three Gorges Reservoir Region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(8):217-223.
- [28] 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.
Ren W, Dai C, Guo H C. Estimation of pollution load from non-point source in Baoxianghe watershed based, Yunnan Province on improved export coefficient model [J]. *Chinese Environmental Science*, 2015,35(8):2400-2408.
- [29] 丁晓雯,刘瑞民,沈珍瑶.基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(5):534-538.
Ding X W, Liu R M, Shen Z Y. Method for obtaining parameters of export coefficient model using hydrology and water quality data and its application [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2006,42(5):534-538.
- [30] 张 磊,姜树林,李翔宏,等.江西规模猪场污染物产生系数的研究 [J]. *江西农业学报*, 2022,34(6):139-146,152.
Zhang L, Jiang S L, Li X H, et al. Study on pollutant generation coefficient of large-scale pig farms in Jiangxi Province [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022,34(6):139-146,152.
- [31] 包维卿,刘继军,安 捷,等.中国畜禽粪便资源量评估的排泄系数取值 [J]. *中国农业大学学报*, 2018,23(5):1-14.
Bao W Q, Liu J J, An J, et al. Value-taking of livestock and poultry excreta factor in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018,23(5):1-14.
- [32] 郝桂珍,宋凤芝,徐 利,等.基于输出系数模型的清水河上游农业非点源污染负荷估算 [J]. *科学技术与工程*, 2020,20(33):13919-13927.
Hao G Z, Song F Z, Xu L, et al. Estimation of Pollution Loads from Agricultural Non-point Sources in the Upstream of Qingshui River Based on Export Coefficient Models [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020,20(33):13919-13927.
- [33] 陈武权,杨庆榜,杨 斌.基于产排污系数法的鄱阳湖滨湖区总磷排放量测算研究 [J]. *环境污染与防治*, 2022,44(7):960-965.
Chen W Q, Yang Q B, Yang B. Calculation of total phosphorus emission in Poyang Lake lakeside area based on pollution generation and discharge coefficient method [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022,44(7):960-965.
- [34] Engebretsen A, Vogt R D, Bechmann M. SWAT model uncertainties and cumulative probability for decreased phosphorus loading by agricultural Best Management Practices [J]. *Catena*, 2019,175:154-166.
- [35] 段 扬,蒋洪强,吴文俊,等.基于改进输出系数模型的非点源污染负荷估算——以嫩江流域为例 [J]. *环境保护科学*, 2020,46(4):48-55.
Duan Y, Jiang H Q, Wu W J, et al. Estimation of non-Point source pollution load based on improved export coefficient model —A case study of Nenjiang watershed [J]. *Environmental Protection Science*, 2020,46(4):48-55.
- [36] 李 根,毛 锋.我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估 [J]. *中国水土保持*, 2008,14(2):9-11.
Li G, Mao F. Evaluation on Non-Point source pollution of soil and water loss and its economic loss of China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008,14(2):9-11.
- [37] 高俊淑,陈政君,李晓琳,等.基于 GIS 异龙湖子流域氮磷时空分异特征及源结构解析 [J]. *生态与农村环境学报*, DOI:10.19741/j.issn.1673-4831.2023.1109.
Gao J S, Chen M J, Li X L, et al. Characterization of spatial and temporal variability of nitrogen and phosphorus in Yilong Lake Sub-basin and analysis of source structure based on GIS [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, DOI:10.19741/j.issn.1673-4831.2023.1109.
- [38] 马亚丽,王兴繁.基于改进的输出系数模型龙溪河流域氮磷负荷评估 [J]. *中国农学通报*, 2021,37(31):70-77.
Ma Y L, Wang X F. Evaluation of nitrogen and phosphorus load of Longxi River Basin based on the improved export coefficient model [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021,37(31):70-77.
- [39] Guo Y, Wang X, Melching C, et al. Identification method and application of critical load contribution areas based on river retention effect [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,305:114-314.
- [40] 李 娜,韩维峥,沈梦楠,等.基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算 [J]. *农业工程学报*, 2016,32(8):224-230.
Li N, Han W Z, Shen M N, et al. Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8):224-230.
- [41] 李雅楠,余利红,陈新美,等.来源于 *Penicillium sp.*C1 的水产用中性植酸酶基因在毕赤酵母中的表达及性质研究 [J]. *生物技术通报*, 2020,36(2):134-141.
Li Y N, Yu L H, Chen X M, et al. Expression and characterization of aquatic neutral phytase gene from *Penicillium sp.* C1 in *pichia pastoris* [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2020,36(2):134-141.
- [42] 彭刚华,伍恒赞.赣江水质现状及污染特征分析 [J]. *江西水利科技*, 2001,27(4):250-252.
Peng G H, Wu H B. The current situation and pollution feather analysis of water quality of Ganjiang river [J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2001,27(4):250-252.

作者简介:李梦冰(2001-),女,江西上饶人,硕士,主要研究方向为土地利用与土地生态.发表论文1篇.18970314926@163.com.