

郭玉静,王云琦,周小舟,等.人类活动净磷输入来源特征影响着区域磷输出 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):355-368.

Guo Y J, Wang Y Q, Zhou X Z, et al. Source characteristics of net anthropogenic phosphorus input influence regional phosphorus output [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):355-368.

人类活动净磷输入来源特征影响着区域磷输出

郭玉静¹,王云琦^{1,2*},周小舟³,张建聪¹,程金花^{1,2},王震¹,张晓明⁴,李鹏⁵ (1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.北京林业大学水土保持学院,重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083; 3.重庆市林业科学研究院,重庆 400036; 4.中国水利水电科学研究院,北京 100048; 5.西安理工大学水利水电学院,陕西 西安 710048)

摘要: 为探究三峡库区磷输入对磷输出的影响,基于人类活动净磷输入(NAPI)模型和改进的输出系数模型(ECM),分析了 2006~2021 年库区磷输入输出的时空特征及其响应关系.结果表明,年际 NAPI 值呈先升高后降低的趋势(峰值为 2015 年),各区县 NAPI 值高低呈聚集分布,磷肥对 NAPI 的贡献率最大,年均达 64.42%;磷输出量(TP)在 2500t/a 上下波动呈缓慢增加趋势,TP 高值区域由库区东北部向西南部转移,旱地对 TP 的贡献率最大,年均 41.25%.TP 与 NAPI 呈正相关,磷输入来源中人类食品和动物饲料磷输入(P_{im})对 TP 的总作用最大,其次为非食品磷输入(P_{nf})和化肥磷输入(P_{fer}),单位 P_{im} 较 P_{nf} 和 P_{fer} 能产生更多的 TP;磷输出率在 1.18%~2.26%之间,年均 1.78%, P_{im} 比例对磷输出率的作用最大,其次为 P_{nf} 比例,磷输出率随 P_{im} 和 P_{nf} 比例增大而增大, P_{fer} 比例与磷输出率呈负相关, P_{im} 对区域潜在磷污染风险威胁最大.本研究可为三峡库区水环境管理提供科学参考.

关键词: 三峡库区; 人类活动净磷输入; 输出系数模型; 时空变化特征; 来源特征; 响应关系

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)01-0355-14

Source characteristics of net anthropogenic phosphorus input influence regional phosphorus output. GUO Yu-jing¹, WANG Yun-qi^{1,2*}, ZHOU Xiao-zhou³, ZHANG Jian-cong¹, CHENG Jin-hua^{1,2}, WANG Zhen¹, ZHANG Xiao-ming⁴, LI Peng⁵ (1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Jinyun Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3.Chongqing Academy of Forestry, Chongqing, 400036, China; 4.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 5.Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 355~368

Abstract: To investigate the impact of phosphorus input on phosphorus output in the Three Gorges Reservoir Area, this study utilized the Net Anthropogenic Phosphorus Input (NAPI) model and the improved Export Coefficient Model (ECM) to analyze the spatiotemporal characteristics of phosphorus input and output from 2006 to 2021, as well as their response relationship. The results showed that the annual NAPI value initially increased and then decreased, with a peak in 2015. The distribution of NAPI values exhibited spatial clustering among counties, with phosphorus fertilizers contributing the most to NAPI, averaging 64.42% annually. Total phosphorus (TP) output fluctuated around 2500 tons per year with a slowly increasing trend, and the areas with high TP values shifted from the northeastern to the southwestern parts of the reservoir area. Dryland contributed the most to TP, with an annual average of 41.25%. There was a positive correlation between TP and NAPI, with the phosphorus input from human food and animal feed (P_{im}) having the greatest overall impact on TP, followed by non-food phosphorus input (P_{nf}) and phosphorus fertilizer input (P_{fer}). P_{im} was found to generate more TP per unit than P_{nf} and P_{fer} . The phosphorus output rate ranged from 1.18% to 2.26%, with an annual average of 1.78%. The proportion of P_{im} had the greatest influence on the phosphorus output rate, followed by the proportion of P_{nf} , with the output rate increasing as the proportions of P_{im} and P_{nf} increased. In contrast, the proportion of P_{fer} was negatively correlated with the phosphorus output rate. P_{im} posed the greatest threat to potential regional phosphorus pollution risks. This study provides scientific references for water environment management in the Three Gorges Reservoir Area.

Key words: Three Gorges Reservoir Area(TGRA); net anthropogenic phosphorus input; export coefficient model; spatiotemporal variation characteristics; source characteristics; response relationship

随着经济及城市化快速发展,为满足随之快速增长的人口数量及粮食需求^[1],人们发展工业,扩大畜牧业生产,应用合成肥料等^[2-3],这些人类活动产生了大量磷,部分由植物吸收,大部分磷进入地表径流,

收稿日期: 2024-06-19

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金资助项目(U2340215);云南省基础研究计划项目(202401AU070122)

* 责任作者, 教授, wangyunqi@bjfu.edu.cn

改变了磷的自然循环,最终导致过量磷输送至水体^[4].磷作为水生物生长繁殖中不可或缺的元素,也影响着河流水生态^[5],是水体富营养化现象产生的主要原因.水体富营养化不仅严重威胁着区域的社会经济发展,也威胁着区域生物饮用水安全^[6-7].控制磷输入是治理区域富营养化问题并改善水质的有效措施,故探究人类活动净磷输入对磷输出的影响对区域水环境管理及维护生态安全具有重要意义.

对于人类活动磷输入强度评估,普遍采用人类活动净磷输入(net anthropogenic phosphorus inputs, NAPI)模型^[8],该模型包括人类活动所产生的 3 个不同磷输入来源,参数少、计算简便且模拟精度较高,因而在世界范围内广泛应用.在鄱阳湖流域、洞庭湖流域^[9],化肥磷输入对 NAPI 的贡献度普遍达到 60% 以上,远超过其他来源.但目前对于磷输入的研究普遍以流域为研究尺度,缺少更精细的空间尺度以得到更加准确的结果.对于定量估算磷输出量(TP)常采用 AnnAGNPS^[10]和 SWAT^[11]等为代表的机理模型,对数据要求高且操作复杂;而经典输出系数模型(ECM)等经验模型数据要求低、操作简便且模拟精度较好,广泛应用于污染物输出量估算.由于不同研究区域具有其特殊的地理条件,众多学者^[12-13]开始加入区域降雨、地形影响因子对 ECM 进行改进,研究表明^[14]改进后的模型能一定程度上提高污染模拟精度.然而只考虑降雨和地形不能完全表达污染从陆地输送到水体的迁移过程,目前研究普遍缺少土壤、植被和土地利用类型对磷输出的影响,因此,对于模拟磷输出量需充分考虑区域产流、产沙、下渗作用对磷输出的影响以得到更精准的 TP^[15].

多数研究侧重于对磷输入或输出过程及其来源特征进行单独研究,忽略了两者的联系.研究表明,磷输入与磷输出密切相关^[16],输出的变化直接受到输入变化的影响.输出量与输入量的比率称为磷输出率,表征着区域磷遗留能力及潜在磷污染风险^[17],区域遗留磷的能力决定着有多少磷输入在之后长时序内缓慢地、源源不断通过河流系统输出^[18].尽管有少部分研究结合探究磷输入输出之间的响应关系,其总量之间存在着线性或指数的关系,但对于磷输入来源特征对磷输出量的影响及其响应尚存在空白,这对于区域以更精细调节磷输入来源特征来达到减少磷输出量,降低水体磷污染风险至关

重要.

三峡库区是我国重要的淡水水源地,也是生态环境极脆弱敏感区,在人口密集区和重要农作区常有化肥、农药施用过量 and 废水排放等污染问题^[19].自三峡水库蓄水以来,水华现象频发^[20].因此,本研究以三峡库区为研究对象,以区县为研究尺度收集相关统计数据,在长时序下,采用 NAPI 模型、基于全过程的入河系数改进的 ECM 分别估算三峡库区磷输入和输出量,分析其时空变化及其影响因素,探究磷输入及其来源特征与磷输出之间的响应特征,以期为三峡库区以及长江上游水资源管理和水环境污染防治提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区位于东经 106°20'~111°30',北纬 28°31'~31°44'(图 1),是我国中西部结合的咽喉地带,东起湖北宜昌,西至重庆江津,涉及范围为重庆和湖北的 18 个区县,总面积约为 57341km².地势东高西低,山地和丘陵分别占总面积的 74%和 22%,为典型山区.以林地和耕地为主要土地利用类型.土壤类型分布多样,分布最广的为紫色土^[21].库区属湿润的亚热带季风气候,年均气温为 14~19℃.年平均降水量 1000mm 以上,水热资源时空分布不均.由于库区特有的地理和气候条件^[22],易发生水土流失.库区常住人口约为 2200 万人,城镇化率 68%,地区国内生产总值(GDP)约达 1840 亿元.

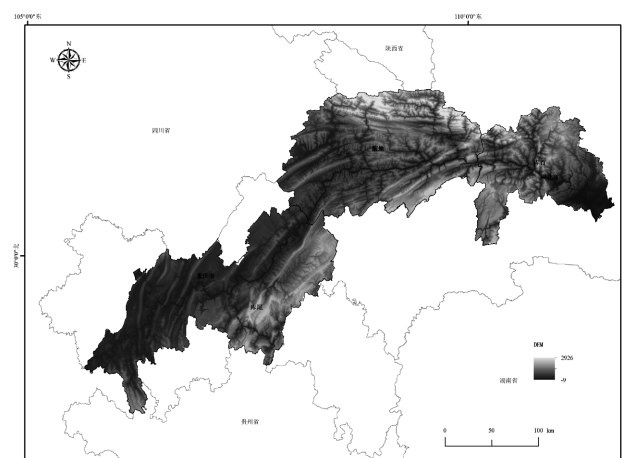


图 1 三峡库区地理位置

Fig.1 Geographic location of the Three Gorges Reservoir Area

1.2 数据来源

本文主要用到的数据包括降水、DEM、土地利

用、土壤和库区各区县的统计数据,原始数据详细信息及来源如表 1.

表 1 数据来源
Table 1 Data source

数据名称	数据内容	精度	数据来源
降水	2006-2021 年逐月降水量	1km × 1km	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)
DEM	90m 分辨率高程数据	90m × 90m	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn)
土地利用	2005、2010、2015、2020 四期土地利用类型	30m × 30m	中科院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)
土壤	土壤类型	1km × 1km	世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据(v1.1) (http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans)
统计数据	2006-2021 年人口数量及城镇化率、主要作物产量、农作物播种面积、化肥施用量、动物数量及产品产量、国内生产总值(GDP)、第一产业增加值、第二产业增加值、第三产业增加值	-	重庆市、湖北省统计年鉴

1.3 研究方法

1.3.1 人类活动净磷输入模型 采用人类活动净磷输入(NAPI)模型对三峡库区 NAPI 进行估算,计算公式如下:

$$NAPI = P_{im} + P_{fer} + P_{nf} \quad (1)$$

式中:NAPI 为磷输入量; P_{im} 为人类食品和动物饲料磷输入; P_{fer} 为化肥磷输入, P_{nf} 为非食品磷输入量.单位均为 $kg/(km^2 \cdot a)$.

(1)人类食品和动物饲料磷输入 食品、饲料磷输入量是磷消耗量和产品磷含量的差值.其计算公式如下:

$$P_{im} = P_{hc} + P_{lc} - P_{lp} - P_{cq} \quad (2)$$

式中: P_{im} 为人类食品和动物饲料磷输入; P_{hc} 代表人类食品磷消费量,根据区域人口和人均磷消费水平乘积得到^[23],三峡库区人口磷消费水平以《第一次全国污染源普查城镇生活排污系数手册》^[24]为标准确定(表 2); P_{lc} 为动物饲料磷消费量,根据区域牲畜数量和牲畜的磷消耗水平乘积得到^[25],通过文献^[26]得到动物磷消耗水平; P_{lp} 为动物产品含磷量,为牲畜数量与其磷含量的乘积; P_{cq} 为农产品含磷量,为各类农产品产量与其含磷量的乘积,从中国食品成分表^[27]获取农作物和动物产品含磷量(表 3),按 10%计算损耗量^[28].

(2)化肥磷输入 本研究使用统计年鉴中磷肥和复合肥的净使用量,其中复合肥中磷含量占比为 35.02%^[29].

(3)非食品磷输入 非食物性磷主要来自人类

日常生活中使用的含磷洗涤用品.本文基于人均污水排放量和污水中磷含量的估算方法^[23],人均非食物磷输入为 0.62kg/a.

表 2 动物和人类磷的消耗和排泄系数

Table 2 The phosphorus consumption and excretion of animal and human

类型	人	猪	牛	羊	家禽
磷消费量(kg/a)	0.50	3.10	9.65	1.12	0.14
排泄百分比(%)	100	68	88	85	68
磷产品总消费量(kg/a)	0.50	4.56	10.97	1.32	0.21
动物产品磷含量(kg/a)	-	1.46	1.32	0.20	0.07

表 3 主要农作物和动物产品磷含量表

Table 3 Phosphorus content of main crops and animal productions

作物产品	磷含量(%)	动物产品	磷含量(%)
水稻	0.08	猪肉	0.13
小麦	0.17	牛肉	0.18
玉米	0.20	羊肉	0.16
大豆	0.42	鸡肉	0.17
薯类	0.05	鸭肉	0.13
油菜籽	0.20	鹅肉	0.14
花生	0.23	蛋类	0.19
水果	0.01	奶制品	0.07
蔬菜	0.03	水产品	0.18

1.3.2 改进的输出系数模型 本研究基于输出系数模型^[30],结合入河系数,对三峡库区污染物磷输出量进行估算.模型如下式:

$$L = \lambda_{TP} \sum_{i=1}^n E_i A_i \quad (3)$$

式中: L 为磷输出量, t/a ; λ_{TP} 为 TP 入河系数; E_i 为第 i 类污染源的输出系数, $t/(km^2 \cdot a)$ 或 $t/(头 \cdot a)$ 或 $t/(万只 \cdot a)$ 或 $t/(人 \cdot a)$; A_i 为第 i 种土地利用类型面积, km^2 , 或第 i 种牲畜数量,头/万只,或农村人口数量,万人.

污染物输出系数具有地域差异性,为保证相对精确性,本文以研究区域为长江中上游区域和三峡库区的参考文献为依据^[31-32]确定输出系数(表 4).

1.3.3 入河系数 入河系数 λ_{TP} 表征着磷污染物从产生、迁移和转化的全过程受降水、坡度、地表/地下径流传输、流域滞留及不同土壤类型等相关因

子的影响,本研究建立以“地形因子-降雨因子-地表径流因子-植被截留因子-土壤侵蚀因子”为主体的全过程入河系数改进输出系数模型.

$$\lambda_{TP} = \text{Norm} \left[\text{Norm} \left(\frac{\alpha \cdot \beta \cdot K}{\text{TI}} \right) + \text{LI} \right] \quad (4)$$

式中: λ_{TP} 为 TP 入河系数;Norm 为归一化; $\alpha, \beta, \text{TI}, K, \text{LI}$ 分别为地形影响因子、降雨驱动因子、植被截留因子、土壤可蚀性因子、归一化的地表径流因子,以上参数均为无量纲.

地形影响因子

表 4 三峡库区磷污染源的输出系数

Table 4 The coefficient of phosphorus pollution output in the Three Gorges Reservoir Area

人口输出系数 ($t/(万人 \cdot a)$)	畜禽养殖输出系数($t/(头 \cdot a)$)/($t/(万只 \cdot a)$)				土地利用输出系数($t/(km^2 \cdot a)$)						
	猪	牛	羊	禽类	水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2.14	0.41	2.18	0.14	0.05	0.21	0.23	0.02	0.08	0.04	0.18	0.02

地形影响因子表征着流域地表起伏变化对磷输出的影响.计算公式如下:

$$\alpha = \frac{L(\theta_j)}{L(\bar{\theta})} = \frac{c\theta_j^d}{c\bar{\theta}^d} = \frac{\theta_j^d}{\bar{\theta}^d} \quad (5)$$

式中: θ_j 为空间单元的坡度, $^\circ$; $\bar{\theta}$ 为空间的平均坡度, $^\circ$; d 取值 0.6104^[33].

降雨驱动因子 降雨主要通过冲刷土壤表面对磷流失产生影响.降雨驱动因子计算公式如下:

$$\beta = \frac{R_u}{\bar{R}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} 0.287 P_m^{1.574}}{\bar{R}} \quad (6)$$

式中: R_u 为第 u 年的降雨侵蚀力; \bar{R} 为区域多年平均降雨侵蚀力; P_m 为第 m 月的降雨量,mm.

地表径流因子 采用 SCS-CN 产流模型对库区地表径流因子进行计算.关系式如下:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{(P - I_a)} \quad (7)$$

式中: F 为实际蓄水量; S 为最大需水量; P 为总降雨量; Q 为径流深; I_a 为降雨初损量,以上单位均为 mm.式 7 可改写为:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, & P > I_a \\ 0, & P \leq I_a \end{cases} \quad (8)$$

式中:初损量 I_a 与流域最大蓄水能力 S 的关系为 $I_a = \phi S$, ϕ 为初损率,无量纲,当三峡库区的初损率定为 0.05 时^[34],拟合精度较高.引入参数-径流曲线数

(CN)来计算 S 的值,关系式如下:

$$S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad (9)$$

式中:CN 综合反映流域下垫面特征,值在[1-100]范围内,无量纲,CN 值越大则蓄水能力越小.结果见表 5.

表 5 不同土地利用类型所对应的 CN 值

Table 5 CN values of different land use

土地利用类型	水田	旱地	建设用地	林地	草地	水域
CN 值	88	79	84	60	69	100

植被截留因子 植被截留因子表征区域某点的磷污染物流向水体的过程中被植被截留的可能性.计算公式如下:

$$\text{TI} = \ln \left(\frac{\sum_{DA=1}^N T_{DA_i}}{\tan B_{DA_i}} \right) \quad (10)$$

式中:DA 为植被类型; $\sum_{DA=1}^N T_{DA_i}$ 为林草地累积截留效率; B_{DA_i} 为平均坡度, $^\circ$.

根据三峡库区的土地利用数据和坡度数据计算三峡库区不同土地利用类型的植被截留因子值.首先设置三峡库区植被二值图:将土地利用类型为林地和草地的赋值 1,其余土地利用类型赋值 0.再以二值图与 $1/\tan B_{DA_i}$ 的乘积作为权重栅格进行 flow length 运算,最终得出三峡库区的植被截留因子.

土壤可蚀性因子 土壤可蚀性因子表征着土壤抗水蚀能力, K 值越小则土壤的抗冲能力越强.采用侵

蚀-生产力评价模型 EPIC 进行 K 因子的估算,如下式:

$$K_{EPIC} = 0.1317 \cdot \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 Sd \left(1 - \frac{Si}{100} \right) \right] \right\} \cdot \left(\frac{Si}{Si + Ci} \right)^{0.3} \cdot \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \cdot \left[1 - \frac{0.7 \left(1 - \frac{Sd}{100} \right)}{1 - \frac{Sd}{100} + \exp \left(-5.51 + 22.9 \left(1 - \frac{Sd}{100} \right) \right)} \right] \quad (11)$$

式中: K_{EPIC} 为土壤可蚀性因子,t/h/(MJ·mm);Sd 为砂粒含量,%;Si 为粉粒含量,%;Ci 为黏粒含量,%;C 为有机碳含量,%;乘以 0.1317 为转换单位.

1.3.4 磷输出率 结合 NAPI 模型和改进的 ECM 模型来计算磷输出率,表征磷污染的潜在风险及区域磷遗留能力^[8,35].计算公式如下:

$$P_r = \frac{L}{1000A \cdot NAPI} \quad (12)$$

式中: P_r 为磷输出率,%;L 为磷输出量,t/a,A 为区域面积,km².

1.4 数据处理及分析

本研究使用 Canoco5.0 和 IBM SPSS Statistics

27.0 对数据分别进行冗余分析和通径分析,利用 Excel2021 和 Origin2022 对研究区统计数据计算、分析与制图,并采用 ArcGIS10.8 地理信息系统对各子单元 NAPI、TP 进行数据空间分析和可视化.

2 结果与分析

2.1 三峡库区磷输入时空特征

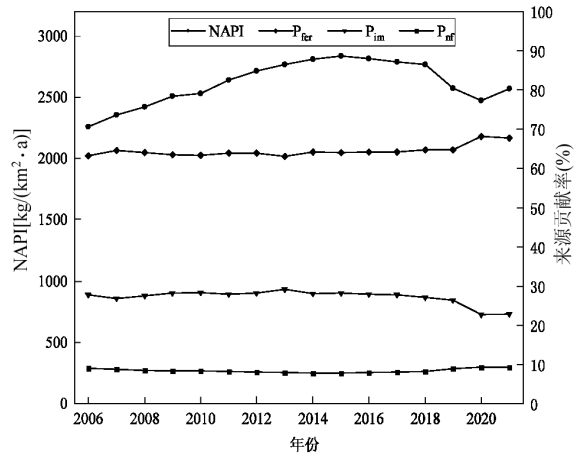


图2 2006~2021年三峡库区 NAPI 及来源特征年际变化
Fig.2 Interannual variations of NAPI and source characteristics in the TGRA from 2006 to 2021

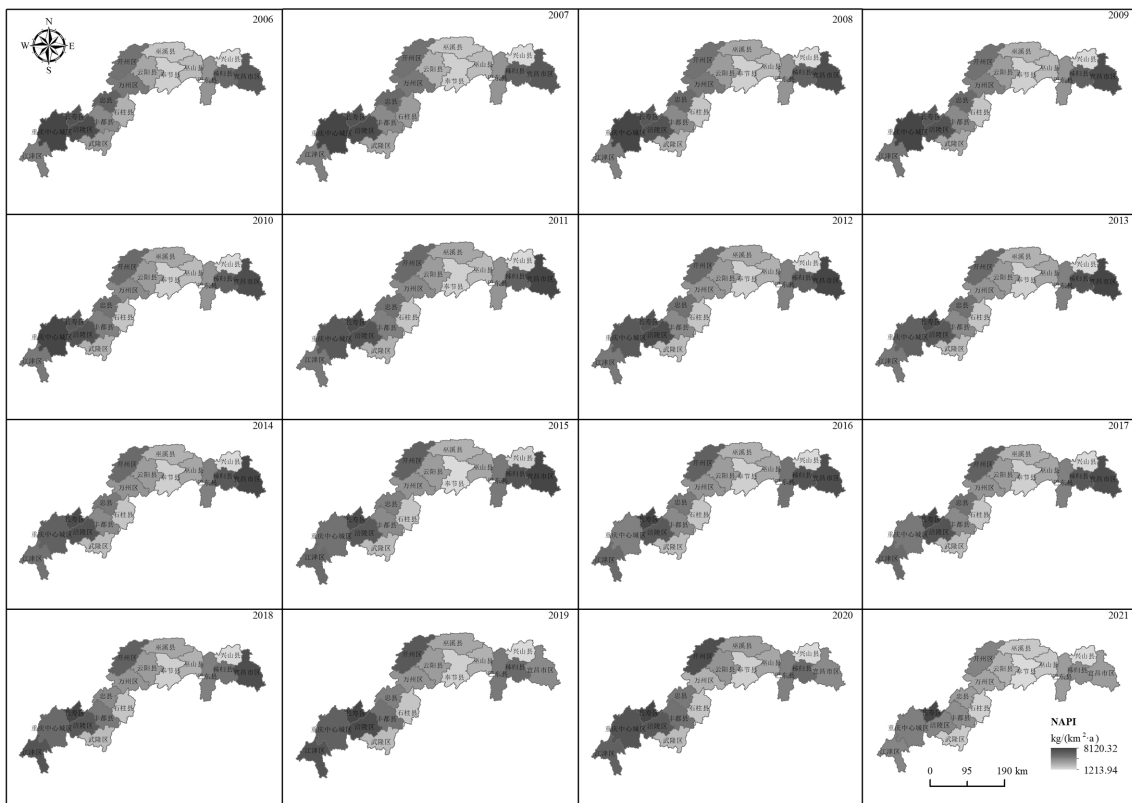


图3 2006~2021年三峡库区 NAPI 空间分布
Fig.3 Spatial distribution of NAPI in the TGRA from 2006 to 2021

2.1.1 NAPI 年际变化特征 三峡库区 NAPI 随时间变化呈先增大后减少的趋势(图 2),在 2015 年达到峰值,为 2837.97kg/(km²·a). 2015 年较 2006 年 NAPI 增长幅度为 25.71%,2021 年较 2015 年下降幅度为 9.55%.年均 NAPI 为 2614.37kg/(km²·a).

三峡库区 2006~2021 年 NAPI 来源贡献率从大到小依次为 P_{fer}、P_{im}、P_{nr},年均分别为 64.42%、27.19%、8.38%(图 2).P_{fer} 贡献率在 2020、2021 年有明显增加,较 2006 年分别增长了 4.93%、4.62%;P_{im} 则明显降低,2020、2021 年较 2006 年分别降低了 5.16%、4.96%;P_{nr} 随时间变化幅度不大,贡献率在 8.00% 上下波动.

2.1.2 NAPI 空间分布特征 库首及库尾的 NAPI 值均较高,腹地各区县 NAPI 水平均较低(图 3).其中库首以宜昌为最高 NAPI 水平,达 4273.82kg/(km²·a),其次为秭归,年均 NAPI 为 3592.95kg/(km²·a);库尾以长寿为最高 NAPI 水平,其次为重庆和涪陵,年均 NAPI 为 4416.94,4169.22kg/(km²·a).可见,库区各区县之间 NAPI 差异性较大,并且 NAPI 水平高低呈现出一种聚集状态,以重庆、宜昌为中心,周边区县普遍具有较高的 NAPI 水平,总体上各区县 NAPI 呈波

动下降趋势,普遍高于其他区县的重庆、涪陵和宜昌 NAPI 呈逐渐减少趋势,下降幅度分别为 42.41%、27.77%和 24.42%.而长寿、丰都、江津、开州和云阳 NAPI 呈逐渐增加趋势,增长幅度分别为 106.88%、56.35%、43.96%、38.30%和 33.22%.其他区县降幅不超 12%,增幅在 30% 内.

2.2 三峡库区 TP 入河系数特征

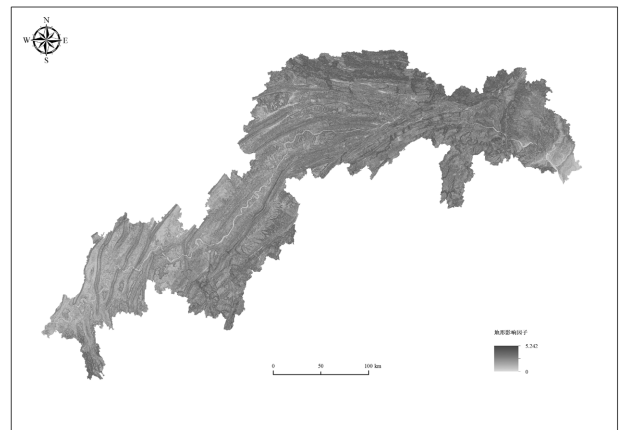


图 4 三峡库区地形影响因子

Fig.4 The terrain driving factor of the Three Gorges Reservoir Area

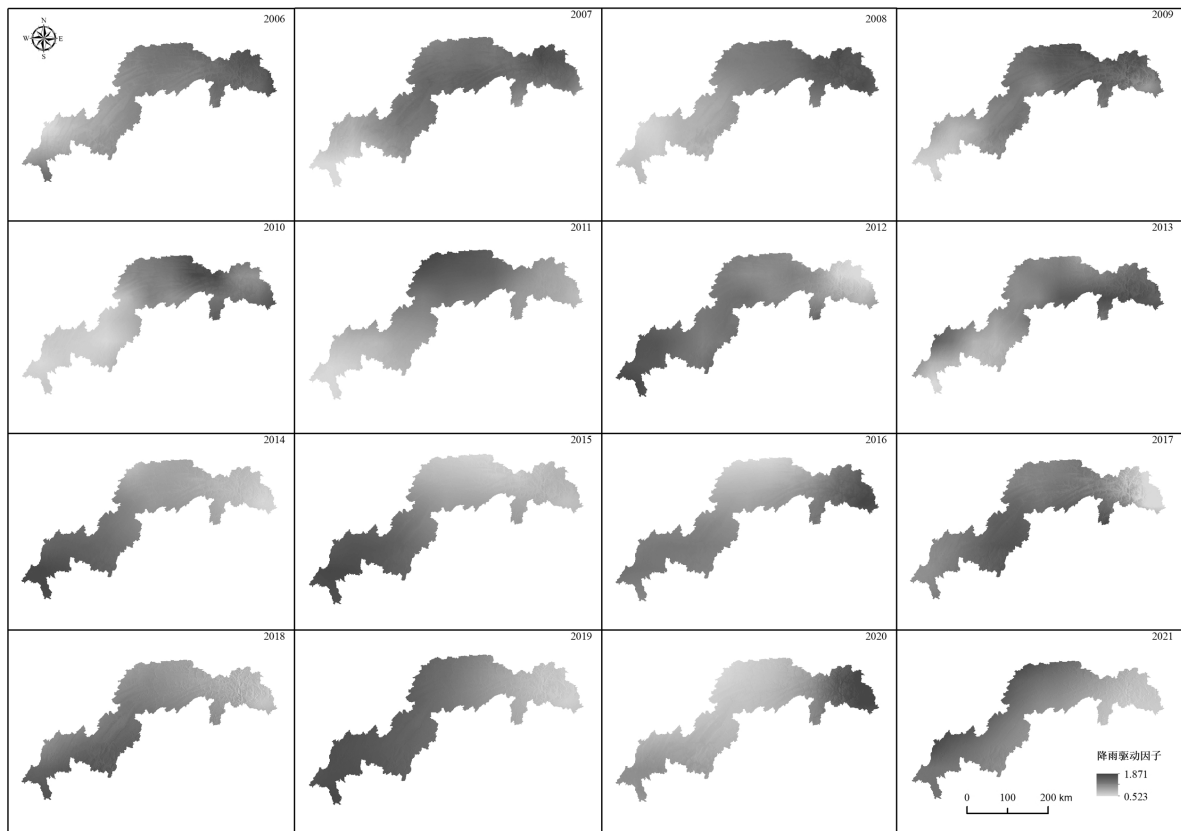


图 5 三峡库区降雨驱动因子

Fig.5 The precipitation driving factor of the Three Gorges Reservoir Area

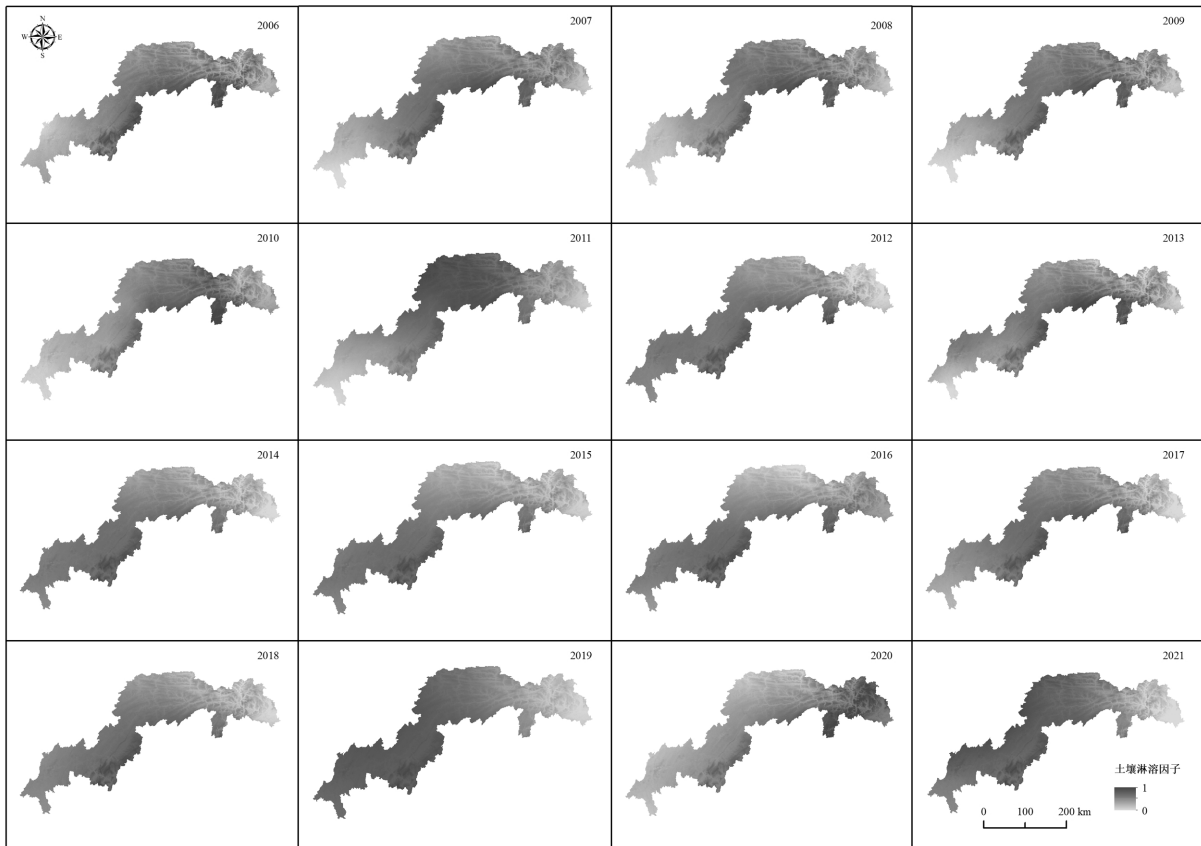


图 6 三峡库区地表径流因子

Fig.6 The surface runoff factor of the Three Gorges Reservoir Area

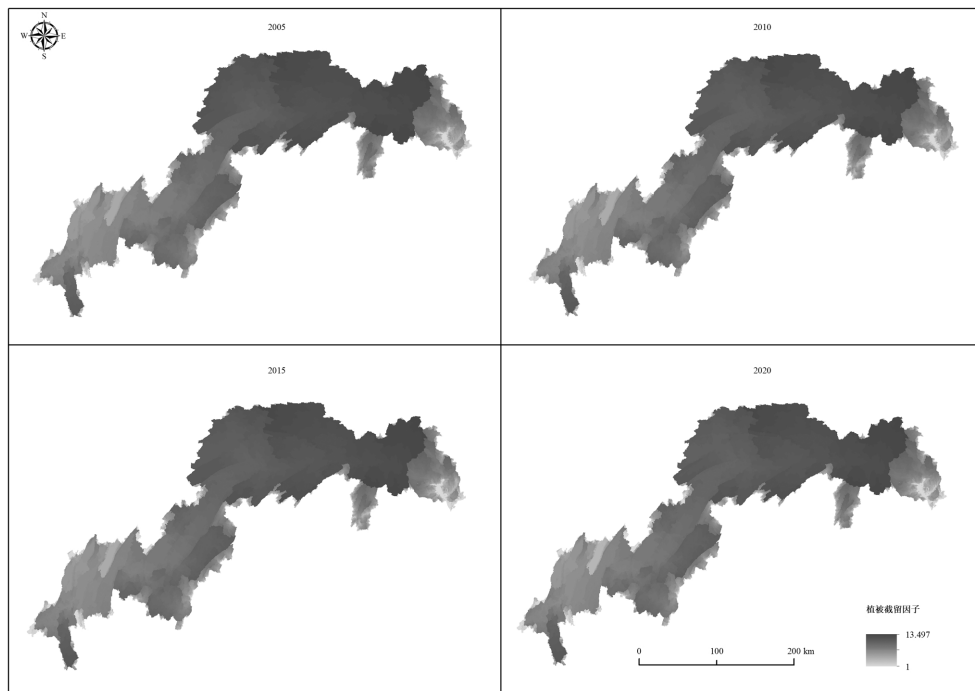


图 7 三峡库区植被截留因子

Fig.7 The vegetation retention factor of the Three Gorges Reservoir Area

2.2.1 地形影响因子 地形影响因子取值在[0,5.242] 范围内(图 4),三峡库区平均坡度为 20°,东北部多为山

区,平均坡度在 23°以上,地形影响因子值较高;西南部位于四川盆地,平均坡度约为 15°,地形影响因子值较低.总体呈现出“东北高、西南低”的空间分布特征.

2.2.2 降雨驱动因子 降雨驱动因子时空分布差异较大(图 5).三峡库区 2006~2021 年平均降雨量为 1242mm,高降雨强度区域逐渐由东北部向西南部转移,转移方向为“库首-腹地-库尾-库首”,但各区县降雨驱动因子变化无规律,这种不规律性进一步增加了各区县污染物 P 输出概率的不确定性.

2.2.3 地表径流因子 地表径流因子时空分布特征(图 6)与降雨驱动因子(图 5)相似.其中,库首西部区域的地表径流因子普遍较高,年均在 0.5 以上.区域地表径流的差异影响着污染物磷进入受纳水体的量,地表径流因子高表明区域磷输出量大.

2.2.4 植被截留因子 植被截留因子取值在[1, 13.497]范围内(图 7),值越高说明污染物截留效率高,高值 95%以上处于林地,集中在库区库首及腹地位置.2005~2020 年期间,三峡库区林地面积增加了约 2%,但总体上植被截留因子大小空间分布状况变化不大.

2.2.5 土壤可蚀性因子 三峡库区 19 种土壤类型的可蚀性在[0,0.327]之间.库首的土壤可蚀性因子值相对较低(图 8),除库首外,其他以外的区域土壤可蚀性因子值与土地利用类型相关,当土地利用类型为林地和草地时,土壤可蚀性因子值相对较低,但差值较小.

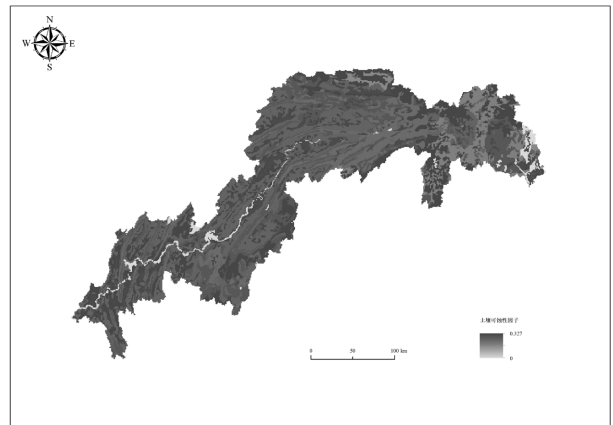


图 8 三峡库区土壤可蚀性因子
Fig.8 Erodibility factor of soil in the Three Gorges Reservoir Area

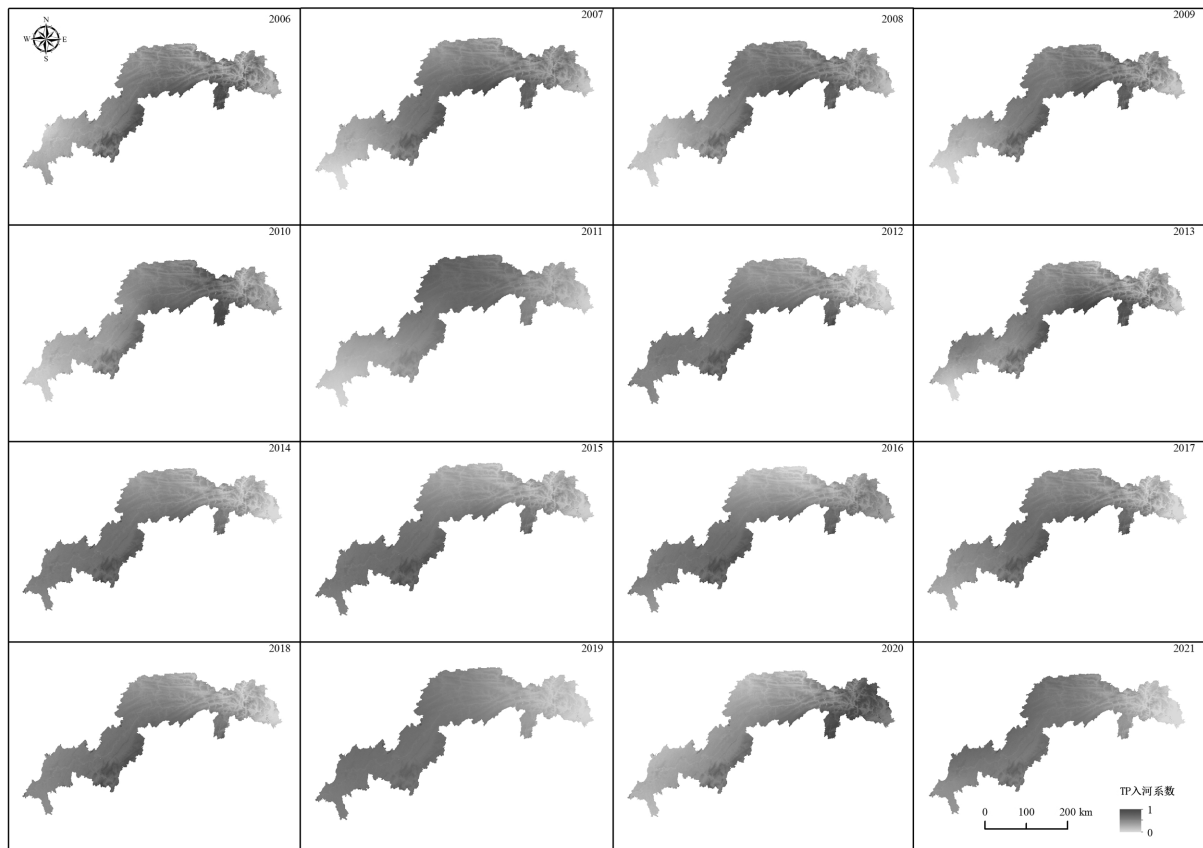


图 9 三峡库区 TP 入河系数
Fig.9 TP inlet coefficient of the Three Gorges Reservoir Area

2.2.6 入河系数 库首的入河系数随时间变化呈减小的趋势(图 9);腹地的入河系数值普遍较高,表明该区域磷污染物对受纳水体保持着较高的输出可能性,库尾入河系数则随时间变化呈增大的趋势.库首的入河系数普遍较低.

2.3 三峡库区磷输出时空特征

2.3.1 TP 年际变化特征 对于库区整体(图 10),TP 在 2500t/a 上下波动变化,最高值出现在 2019 年,达 3334.70t/a,最低值在 2020 年为 1691.44t/a.总体上 TP 呈缓慢增加趋势,至 2021 年 TP 增长幅度达 39.23%.

从三大污染源来看(图 10),TP 贡献率从大到小依次为土地利用、人口、畜禽养殖,其中土地利用类型中的旱地贡献率最大,年均达 41.25%.随时间变化,禽畜养殖贡献率逐渐降低,主要表现为家禽的贡献率逐年降低,2021 年较 2006 年贡献率降低了 5.64%,下降幅度达 56.84%.土地利用则逐年增加,主要表现

为旱地和建设用地贡献率增加,2021 年较 2006 年分别增长了 6.74%、3.33%,增长幅度分别达 17.71%、394.93%.

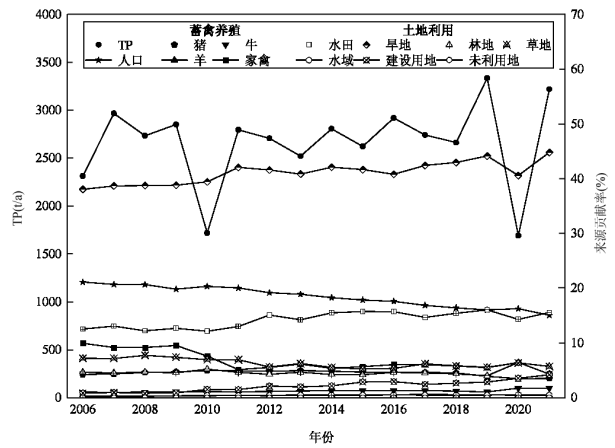


图 10 2006~2021 年三峡库区 TP 及来源特征年际变化
Fig.10 Interannual variations of TP and source characteristics in the TGRA from 2006 to 2021

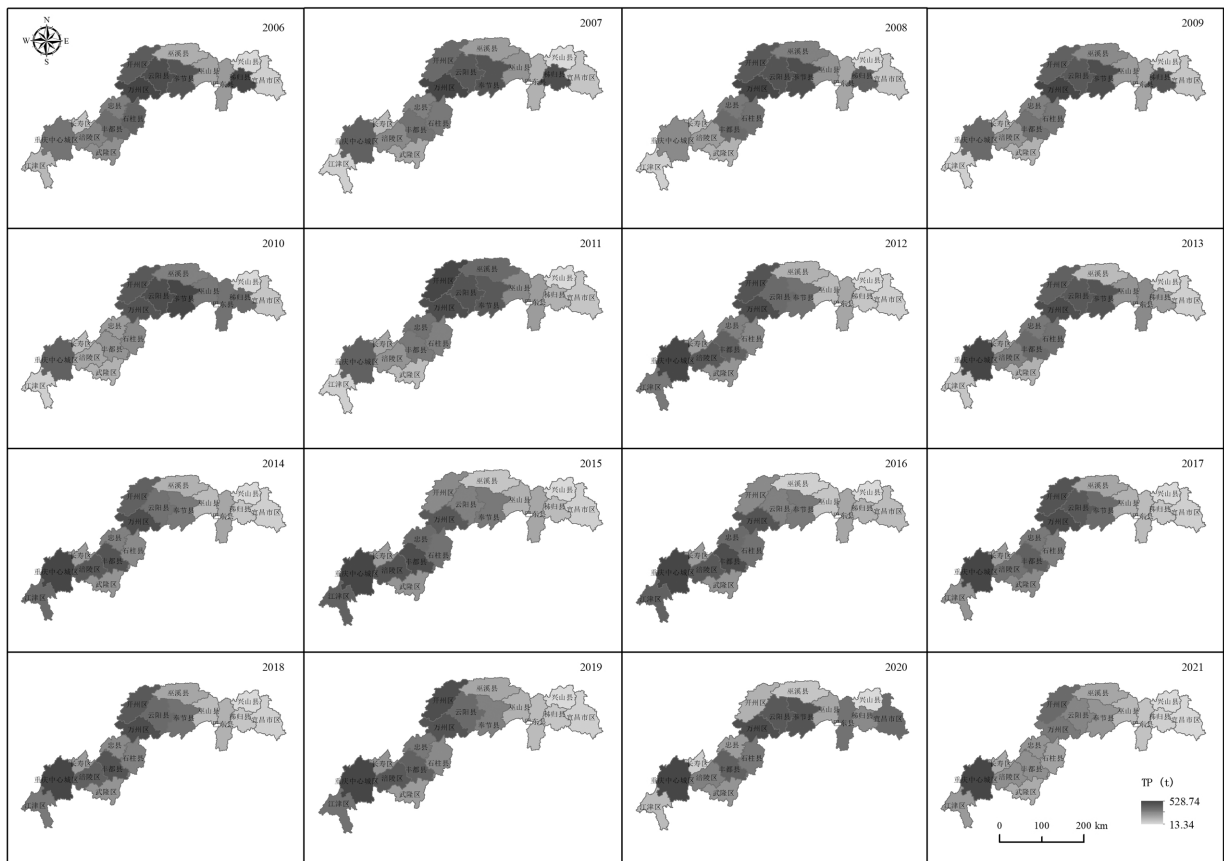


图 11 2006~2021 年三峡库区 TP 空间分布
Fig.11 Spatial distribution of TP in the TGRA from 2006 to 2021

2.3.2 TP 空间分布特征 三峡库区 TP 空间分布差异性较大(图 11).总体上呈“腹地库尾高,库首低”的

分布特点,其中重庆具有最高的 TP,达 305.38t/a,万州其次,为 237.75t/a,最低的为兴山,仅 24.55t/a.在

2006~2011 年,TP 呈现出“腹地高、库尾次之、库首低”的特点,其中腹地中万州具有最高的 TP,年均值为 246.07t/a;库尾为重庆 173.74t/a;库首为秭归 195.64t/a.自 2012 年起,TP 输出重点区域明显由库区东北方向往西南方向转移.在 2012~2021 年,库尾 TP 大于腹地而呈现出“库尾高、腹地次之、库首低”的特点,其中重庆和江津有大幅增长,增长率分别达 232.23%和 133.23%;库首则一直处于较低水平,且秭归、宜昌和兴山均有大幅下降,分别降低了 81.00%、56.43%和 38.41%.

2.4 三峡库区磷输入与磷输出的响应关系

2.4.1 NAPI 与 TP 的响应 三峡库区 NAPI 与 TP 呈线性变化(图 12),TP 随 NAPI 的增加而增加.2006~2021 年三峡库区磷输出率呈波动变化,范围在 1.18%~2.26%之间,年平均输出率为 1.78%.以 2015 年 NAPI 降低为节点来看,2006~2015 年平均磷输出率 1.76%,2016~2021 年提高至平均 1.81%.

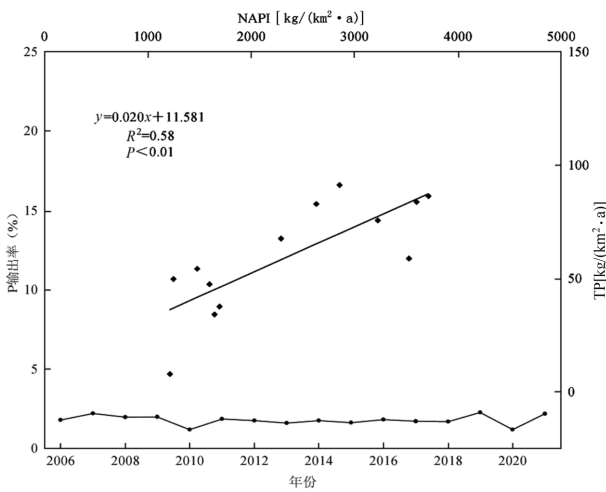


图 12 三峡库区 NAPI 与 TP 的响应关系

Fig.12 The response relationship between NAPI and TP in the TGRA

2.4.2 磷输入来源与磷输出的响应 基于通径分析得到 NAPI 三类来源输出量对 TP 的通径系数(表 6), P_{im} 、 P_{fer} 、 P_{nf} 对 TP 的直接通径系数即为直接作用,分别为 0.257、0.017 和 0.203,可见 P_{im} 对 TP 的直接作用程度最大,其通过 P_{fer} 和 P_{nf} 的间接作用分别为-0.003 和 0.139,故 P_{im} 对 TP 的总作用为 0.393,成为对 TP 作用最大的 NAPI 来源.其次为 P_{nf} ,总作用为 0.380,最小的是 P_{fer} ,仅 0.074.

NAPI 来源特征对磷输出率的通径系数(表

7), P_{im} 比例对磷输出率的直接作用程度最大,为 0.379,通过 P_{nf} 比例的间接作用为 0.026,总作用达 0.405,其次是 P_{nf} 比例总作用为 0.231,其中直接作用为 0.058,通过 P_{im} 比例的间接作用为 0.173.通过相关分析得到 P_{fer} 比例与磷输出率成负相关,相关系数为 0.4.

表 6 NAPI 来源与 TP 的通径系数

Table 6 The path coefficient between the sources of NAPI and TP

类别	对 TP 的直接作用	对 TP 的间接作用	对 TP 的总作用
P_{im}	0.257	-0.003(通过 P_{fer}) 0.139(通过 P_{nf})	0.393
P_{fer}	0.017	0.045(通过 P_{im}) 0.012(通过 P_{nf})	0.040
P_{nf}	0.203	0.176(通过 P_{im}) -0.001(通过 P_{fer})	0.380

表 7 NAPI 来源特征与磷输出率的通径系数

Table 7 The path coefficient between the source characteristics of NAPI and phosphorus output rate

类别	对磷输出率的直接作用	对磷输出率的间接作用	对磷输出率的总作用
P_{im} 比例(%)	0.379	0.026 (通过 P_{nf} 比例)	0.405
P_{nf} 比例(%)	0.058	0.173 (通过 P_{im} 比例)	0.231

3 讨论

3.1 三峡库区磷输入时空特征分析

三峡库区的重庆和宜昌的磷输入水平普遍较高,年均均在 4200.00kg/(km²·a)以上,且周边区县也具有较高磷输入量,这与其人口密度大,城镇化率高及经济相对发达有关,与 Zhang 等^[17]的研究结果一致;奉节县 NAPI 普遍较低,尽管人口密度为 179 人/km²,在三峡库区各区县处于中等水平,但城镇化率不足 50%且经济水平相对落后^[36]造成了这一结果.冗余分析的结果(图 13)表明,NAPI 受到土地利用结构及产业结构的影响,与建筑用地面积比例有最好的正相关关系,与第一产业比例有最好的负相关关系,进一步说明了区域经济发展水平影响着 NAPI.长寿、丰都、江津、开州和云阳 NAPI 随时间有较大幅度增长与乡村振兴政策、大力发展农业有关,在农业生

产中化肥施用量增长 2~8 倍,化肥磷输入的大量增加使得 NAPI 呈增加趋势。

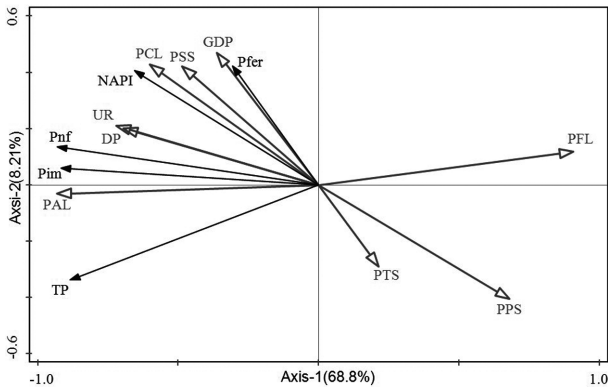


图 13 三峡库区 NAPI、TP 影响因素的 RDA 排序

Fig.13 RDA ordination of the relationships between NAPI/TP and impact factors in the TGRA

人口经济因素包括人口密度 DP(人/km²)、城镇化率(%)、国内生产总值 GDP(万元);土地利用因素包括耕地面积比例 PAL(%)、林地面积比例 PFL(%)、建筑用地面积比例 PCL(%);产业结构因素包括第一产业比例 PPS(%),第二产业比例 PSS(%),第三产业比例 PTS(%)。排序

图中两因素之间的夹角越小则相关性越好,投影长度越长则作用越大,同向为正相关,反向为负相关

三峡库区 2006~2021 年均 NAPI 为 2614.37kg/(km²·a),前人得出^[28]三峡库区 2006~2016 年均 NAPI 为 2741.00kg/(km²·a),与本文结果相差 4.84%,这是因为污染控制措施的采取导致 NAPI 持续减少;其研究所得时间变化趋势与本文研究结果一致,均呈先增加后减少的趋势,且峰值出现在 2015 年.与中国其他流域年均 NAPI 值相比,洞庭湖 913.5kg/(km²·a)^[9];千岛湖流域杭州段 2230kg/(km²·a)^[37];榆林 3641kg/(km²·a)^[38];河南省 7573.47kg/(km²·a)^[39],是目前研究 NAPI 输入水平最高的地区,这与其高人口密度带来的高食品磷需求和高非食品磷输入相关^[23],可见,三峡库区在全国范围内处于中等水平且中国年均 NAPI 分布差异性较大,王雨珊^[40]对中国七大流域 NAPI 的研究有相似发现,并得出长江流域年均 NAPI 为 1244.07kg/(km²·a),远低于位于长江上游的三峡库区,表明库区是长江流域磷输入较大的地区,易产生磷污染,应当引起生态保护重视.以上流域 NAPI 在 2015 年前后呈逐渐下降趋势,与三峡库区时间趋势变化节点一致,这与当时开展全面保护环境工作有关,并对生活污水持续控制,如生产无磷洗涤剂 and 污水除磷^[41].

3.2 三峡库区磷输出时空特征分析

2006~2021 年重庆的年均磷输出量最大,且 16a 来增长幅度达 232.23%,这与其快速增长的人口数量和建筑用地面积有关,与李潇然等^[42]的研究一致.2012 年之后三峡库区库尾 TP 高于腹地,这主要是因为库区降雨分布不均,自 2012 年后高雨强地区由库区东北方向往西南方向转移.由于地表径流是区域磷流失的主要途径^[43],降雨量的增大导致区域水土流失增加,从而增大了区域磷输出量^[44],这也解释了江津在 2014 年后 TP 明显增大的现象.库区库首 TP 普遍较低,这与库首高林地面积比例相关,根据冗余分析的结果(图 13)可见 TP 与林地面积比例成高负相关性,表明林地可有效拦截磷输出,此结果印证了王业迪等^[45]土地利用结构影响着磷污染的结论.

本研究得出三峡库区年均 TP 达 46.43kg/(km²·a),前人考虑降水和地形因素改进输出系数模型^[46]得出三峡库区 1990~2015 年 TP 为 102.19~151.30kg/(km²·a),造成此数值差距的原因是本文还考虑了植被、土壤及径流对污染迁移的影响,使得入河系数更精确;有研究^[47]得到三峡库区石盘丘小流域 TP 实测值为 53.40kg/(km²·a),本文结果与其仅有 13% 的差异,由于三峡库区分布面积广,TP 分布有一定差异,因此本文基于入河系数的改进输出系数模型模拟得到的 TP 结果合理可靠,较接近真实值.与江西省 97.39kg/(km²·a)^[48]和泸沽湖 125.10kg/(km²·a)^[49]相比,三峡库区 TP 处于低水平位置,这主要是因为地区产业发展差异造成的,江西畜牧业发达,泸沽湖种植业发达,来自畜禽养殖和土地利用的磷输出量较大导致磷输出量偏大;其次,也可能是三峡库区的陆地系统对磷的遗留率较高造成磷输出量较低^[18].尽管库区磷输出量相对较低,但总体上仍呈现出增加的趋势,这与库区快速增长的人口和食物需求使得三峡库区人地矛盾更加突出,对土地不合理的利用方式以及更大规模的畜禽养殖促进了磷的流失,使输送到水体的磷污染量增加^[20].

3.3 三峡库区磷输入与磷输出的响应关系分析

三峡库区磷输出量随磷输入量增加呈线性增加趋势,这与大多数研究一致^[17],表明库区磷输出直接响应于磷输入.库区磷输出率在 1.18%~2.26%之间,与中国大多数流域输出率范围相一致^[50],但低于全球 3% 的磷输出率^[17].自 NAPI 呈下降趋势后年均

磷输出率反而升高了,说明库区在采取控制磷输入量的措施后水体磷含量并未减少,治理效果不佳,这通常被认为是磷遗留所带来的影响^[51],在人类活动净磷输入到磷输出的迁移过程中,由于气象、地形地势等影响因素,导致当年输入量不能完全输出而遗留在区域陆域系统.由输出率可知三峡库区遗留率超 97%,表明 NAPI 同时影响着区域陆地系统本身的磷养分状况,与流域内磷养分富集和生态环境变化密切相关^[52].根据 Liu 等^[53]研究计算出三峡库区 2007~2021 年的磷遗留量,可见库区磷遗留量呈线性增加(图 14),由 2007 年 2316.22kg/(km²·a)增加到 2021 年 38886.36kg/(km²·a),增长了 16.79 倍,平均每年增加 2612.15kg/(km²·a).当流域内磷遗留量不断增加,磷的遗留能力不断降低,同时遗留磷将持续不断地流向接纳水体^[54],最终导致河流潜在磷污染风险不断升高^[55].三峡库区 2006~2021 年磷输出率的升高也印证了这一结论.

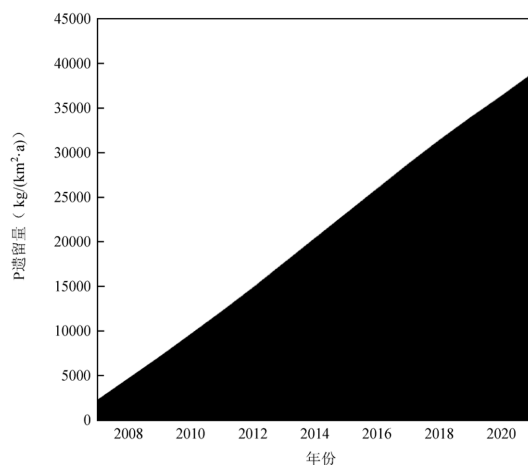


图 14 三峡库区 P 遗留量年际变化

Fig.14 Interannual variations of legacy phosphorus in the TGRA

本研究发现 P_{im} 对 TP 的作用最大,即当 P_{im} 、 P_{fer} 和 P_{nf} 输入变化量相等时,TP 随 P_{im} 变化的变化量更大,可知单位 P_{im} 较 P_{fer} 和 P_{nf} 流入接纳水体的量更大.磷输出率受 NAPI 来源特征影响,其中 P_{im} 比例对磷输出率的作用最大,即当 P_{im} 比例越大,区域磷输出率也将增大,表明 P_{im} 对河流潜在磷污染影响更明显,这主要是 P_{im} 通常以点源的形式输入,会减少区域对磷的滞留效果,从而导致较高磷输入量进入水体,与王雨珊^[40]的研究结果一致.因此,在进行水环境防治

工作时需考虑从源头上减少磷输入量,如降低磷肥的施用量,提高磷肥利用效率^[56];同时还需降低 P_{im} 的输出量,如健全污水排放与处理系统,以降低潜在磷污染风险.

4 结论

4.1 2006~2021 年,三峡库区 NAPI 具有较大的时空异质性,呈“库首库尾高,腹地低”的分布特点;NAPI 年均值为 2614.37kg/(km²·a),随时间变化先增大后减少,磷肥对 NAPI 的贡献率最大,年均达 64.62%.

4.2 三峡库区 TP 呈现“腹地库尾高,库首低”的分布特点,随时间变化在 2500t/a 上下波动呈缓慢增加趋势;旱地对 TP 的贡献率最大,年均达 41.25%.

4.3 NAPI 和 TP 受人口经济、土地利用和产业结构的影响,在人口密集区和经济发达区通常有较高的磷输入输出量.农业活动是三峡库区磷输入输出的主要途径,林地可有效拦截磷污染输出.

4.4 TP 随 NAPI 增加呈线性增加,磷输出率在 1.18%~2.26%之间,年均 1.78%.人类食品和动物饲料磷输入(P_{im})及其比例对 TP 及磷输出率的总作用最大, P_{fer} 比例与磷输出率呈负相关. P_{im} 对区域潜在磷污染风险威胁最大.超 97%的 NAPI 遗留在区域陆域系统,增加了区域磷潜在污染风险.在三峡库区水环境防治中须将农业活动、NAPI 来源特征及磷遗留综合考虑.

参考文献:

- [1] Chen D, Shen H, Hu M, et al. Legacy nutrient dynamics at the watershed scale: principles, modeling, and implications [J]. *Advances in agronomy*, 2018,149:237-313.
- [2] Bouwman L, Goldewijk K K, Van Der Hoek K W, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900~2050 period [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013,110(52): 20882-20887.
- [3] Grizzetti B, Passy P, Billen G, et al. The role of water nitrogen retention in integrated nutrient management: assessment in a large basin using different modelling approaches [J]. *Environmental Research Letters*, 2015,10(6):065008.
- [4] Mooney R J, Stanley E H, Rosenthal W C, et al. Outsized nutrient contributions from small tributaries to a Great Lake [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020,117(45):28175-28182.
- [5] 朱广伟,秦伯强,张运林,等.近 70 年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略 [J]. *湖泊科学*, 2021,33(4):957-973.
- Zhu G W, Qin B Q, Zhang Y L, et al. Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021,33(4):957-973.

- [6] Fernandes A C P, Sanches Fernandes L F, Terêncio D P S, et al. Seasonal and scale effects of anthropogenic pressures on water quality and ecological integrity: a study in the Sabor River Basin (NE Portugal) using partial least squares-path modeling [J]. *Water*, 2019,11(9):1941.
- [7] Yu S, Du X, Lei Q, et al. Long-term variations of water quality and nutrient load inputs in a large shallow lake of Yellow River Basin: Implications for lake water quality improvements [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,900:165776.
- [8] Russell M J, Weller D E, Jordan T E, et al. Net anthropogenic phosphorus inputs: spatial and temporal variability in the Chesapeake Bay region [J]. *Biogeochemistry*, 2008,88:285-304.
- [9] 刘艳萍,肖雅倩,张颖. 洞庭湖流域人类活动净磷输入及其空间分布 [J]. *应用生态学报*, 2019,30(7):2404-2414.
Liu Y P, Xiao Y Q, Zhang Y. Spatial distribution of the net anthropogenic phosphorus input (NAPI) to the Dongting Lake basin, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019,30(7):2404-2414.
- [10] 彭畅,朱平,牛红红,等. 农田氮磷流失与农业非点源污染及其防治 [J]. *土壤通报*, 2010,41(2):508-512.
Peng C, Zhu P, Niu H H, et al. Nitrogen and phosphorus loss of farmland agricultural non-point source pollution and its prevention [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010,41(2):508-512.
- [11] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算 [J]. *环境科学*, 2009,30(3):668-672.
Li Z F, Yang G S, Li H P. Estimated nutrient export loads based on improved export coefficient model in xitaoxi watershed [J]. *Environmental Science*, 2009,30(3):668-672.
- [12] Skrabal S A, Donat J R, Burdige D J. Pore water distributions of dissolved copper and copper-complexing ligands in estuarine and coastal marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000,64(11):1843-1857.
- [13] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制 [J]. *环境科学*, 1998,19(5):87-91.
He C S, Fu B J, Chen L D. Non-point source pollution control and management [J]. *Environmental Science*, 1998,19(5):87-91.
- [14] 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.
- [15] 李华林,张守红,于佩丹,等. 基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别:以北运河上游流域为例 [J]. *环境科学*, 2023, 44(11):6194-6204.
Li H L, Zhang S H, Yu P D, et al. Estimation and critical source area identification of non-point source pollution based on improved export coefficient source pollution based on improved export coefficient [J]. *Environmental Science*, 2023,44(11):6194-6204.
- [16] Hong B, Swaney D P, Mörth C M, et al. Evaluating regional variation of net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs (NANI/NAPI), major drivers, nutrient retention pattern and management implications in the multinational areas of Baltic Sea basin [J]. *Ecological Modelling*, 2012,227:117-135.
- [17] Zhang X, Yi Y, Yang Z. Nitrogen and phosphorus retention budgets of a semiarid plain basin under different human activity intensity [J]. *Science of The Total Environment*, 2020,703:134813.
- [18] Chen D, Zhang Y, Shen H, et al. Decreased buffering capacity and increased recovery time for legacy phosphorus in a typical watershed in eastern China between 1960 and 2010 [J]. *Biogeochemistry*, 2019, 144:273-290.
- [19] 李丹青,王云琦,王震,等. 三峡库区 N_2O 时空分布差异及减排潜力分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2024,33(1):150-162.
Li D Q, Wang Y Q, Wang Z, et al. Differences in N_2O spatio-temporal distribution and emission reduction potential in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024,33(1):150-162.
- [20] 刘娟. 基于改进输出系数模型的三峡库区非点源氮、磷污染负荷研究 [D]. 重庆:西南大学, 2019.
Liu J. Study on the nitrogen and phosphorus load of Non-point source pollution in Three Gorges Reservoir Area by using the improved Export Coefficient Model [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [21] Wang Z, Wang Y, Ding X, et al. Evaluation of net anthropogenic nitrogen inputs in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Ecological Indicators*, 2022,139:108922.
- [22] Yan Z, Wang Y, Wang Z, et al. Spatiotemporal analysis of landscape ecological risk and driving factors: a case study in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Remote Sensing*, 2023,15(19):4884.
- [23] Han Y, Yu X, Wang X, et al. Net anthropogenic phosphorus inputs (NAPI) index application in Mainland China [J]. *Chemosphere*, 2013,90(2):329-337.
- [24] 第一次全国污染源普查资料篡委员会. 污染源普查产排污系数手册(上) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2011:6-30.
The First National Committee for the Survey of Pollution Sources. The Handbook of Pollution Coefficients from the General Survey of Pollution Sources (I) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2011:6-30.
- [25] Boyer E W, Goodale C L, Jaworski N A, et al. Anthropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern USA [J]. *Biogeochemistry*, 2002,57:137-169.
- [26] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响 [D]. 北京:中国农业科学院, 2005.
Wu S X. The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.
- [27] 杨月欣,王光亚. 中国食物成分表 [M]. 北京:北京大学医学出版社, 2009.
Yang Y X, Wang G Y. China food ingredients table [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2009.
- [28] 丁雪坤. 三峡库区面源污染人类活动输入及潜在风险评价 [D]. 北京:北京林业大学, 2019.
Ding X K. Net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs and non-point source pollution risk analysis of the Three Gorges reservoir Region [D]. Beijing: Beijing Forest University, 2019.
- [29] 张卫峰,李亮科,陈新平等. 我国复合肥发展现状及存在的问题 [J]. *磷肥与复肥*, 2009,24(2):14-16.
Zhang W F, Li L K, Chen X P, et al. The present status and existing problems in China's compound fertilizer development [J]. *Phosphate Compound Fertilizer*, 2009,24:14-16.
- [30] 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.
- [31] Ma X, Li Y, Zhang M, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2011,412:154-161.
- [32] 杨彦兰,申丽娟,谢德体,等. 基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2015,37

- (3):112-119.
Yang Y L, Shen L J, Xie D T, et al. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Three Gorges Reservoir Area (Chongqing) based on the export coefficient modeling approach [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2015,37(3):112-119.
- [33] 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.
- [34] Shi Z H, Chen L D, Fang N F, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China [J]. *Catena*, 2009,77(1):1-7.
- [35] Hong B, Swaney D P, Howarth R W. Estimating net anthropogenic nitrogen inputs to US watersheds: comparison of methodologies [J]. *Environmental science & technology*, 2013,47(10):5199-5207.
- [36] 周凡力.重庆市奉节县乡村人口-土地-产业要素耦合协调研究 [D]. 重庆:西南大学, 2021.
Zhou F L. Research on the coupling and coordination of rural population-land-industry factors in Fengjie County, Chongqing City [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [37] 缪今典,张晓明,魏天兴,等.千岛湖流域杭州段人类活动净氮、净磷输入时空分布 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(6):2831-2842.
Miao J D, Zhang X M, Wei T X. Temporal and spatial distribution characteristics of net nitrogen and phosphorus input from human activity: A case study of Hangzhou section of Qiandao Lake Basin [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(6):2831-2842.
- [38] 盛强.榆林市净氮净磷输入及面源污染潜在风险研究 [D]. 西安:长安大学, 2022.
Sheng Q. Study on net nitrogen and net phosphorus input and Potential risk of non-point source pollution in Yulin City [D]. Xi'an: Chang An University, 2022.
- [39] 马华,雷秋良,杜新忠,等.河南省人类活动净磷输入的时空变化与影响参数 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(3):1318-1326.
Ma H, Lei Q L, Du X Z, et al. Spatio-temporal variation and the impacts from parameters analysis of net anthropogenic phosphorus inputs in Henan province [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42:1318-1326.
- [40] 王雨珊.中国七大流域人为净磷输入及河流入海磷通量研究 [D]. 北京:北京林业大学, 2020.
Wang Y S. Net anthropogenic phosphorus inputs in seven major river basins in China and corresponding phosphorus fluxes into the sea [D]. Beijing: Beijing Forest University, 2020.
- [41] 王金南,董战峰,蒋洪强,等.中国环境保护战略政策 70 年历史变迁与改革方向 [J]. *环境科学研究*, 2019,32(10):1636-1644.
Wang J N, Dong Z F, Jiang H Q, et al. Historical evolution and reform of China's environmental strategy and policy during the past seventy years (1949-2019) [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019,32 (10):1636-1644.
- [42] 李潇然,李阳兵,邵景安.非点源污染输出对土地利用和社会经济变化响应的案例研究 [J]. *生态学报*, 2016,36(19):6050-6061.
Li X R, Li Y B, Shao J A. A study on the response of non-point source pollution to the variation of land use and social economy [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(19):6050-6061.
- [43] 李慧赞,王裕成,单亮,等.暴雨径流对新安江入库总磷负荷量的影响 [J]. *环境科学研究*, 2022,35(4):887-895.
Li H Y, Wang Y C, Shan L, et al. Effect of rainstorm runoff on total phosphorus load in xin'anjiang [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022.
- [44] 曾立雄,肖文发,黄志霖,等.三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征 [J]. *环境科学*, 2013,34(8):3035-3042.
Zeng L X, Xiao W F, Huang Z L, et al. Characteristics of nutrient loss of Lanlingxi watershed in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2013,34(8):3035-3042.
- [45] 王业迪,贾珺杰,陆瑶,等.鄱阳湖 2010-2019 年氮磷收支及其富营养化影响 [J]. *环境科学学报*, 2024,44(6):151-160.
Wang Y D, Jia J J, Lu Y, et al. Nitrogen and phosphorus budget and eutrophication impacts in Poyang Lake from 2010 to 2019 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024,44(6):151-160.
- [46] 李明龙,贾梦丹,孙天成.三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2021,42(4):1839-1846.
Li M L, Jia M D, Sun T C, et al. Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2021,42(4):1839-1846.
- [47] 陈仕奇,龙翼,严冬春,等.三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 [J]. *环境科学*, 2020,41(3):1276-1285.
Chen S Q, Long Y, Yan D C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus output and loss flux in the shipanqiu watershed, three gorges reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2020,41(3):1276-1285.
- [48] 陈毓迪.基于改进输出系数模型的江西省农业面源污染时空分析 [D]. 南昌:南昌大学, 2023.
Chen Y D. Spatiotemporal analysis of agricultural non-point source pollution in Jiangxi province based on improved output coefficient model [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [49] 于浩冉.泸沽湖氮磷时空分布及内外源污染负荷研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2022.
Yu H R. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus and pollution loads from internal and external sources in Lugu Lake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [50] Zheng Y, Wang Q, Zhang X, et al. Nitrogen and phosphorus retention risk assessment in a drinking water source area under anthropogenic activities [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(9):2070.
- [51] Van Meter K J, Basu N B. Time lags in watershed-scale nutrient transport: an exploration of dominant controls [J]. *Environmental Research Letters*, 2017,12(8):084017.
- [52] Kusmer A S, Goyette J O, MacDonald G K, et al. Watershed buffering of legacy phosphorus pressure at a regional scale: a comparison across space and time [J]. *Ecosystems*, 2019,22:91-109.
- [53] Liu J, Gu W, Liu Y, et al. Dynamic characteristics of net anthropogenic phosphorus input and legacy phosphorus reserves under high human activity-A case study in the Jiangnan Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,836:155287.
- [54] Hong B, Swaney D P, McCrackin M, et al. Advances in NANI and NAPI accounting for the Baltic drainage basin: spatial and temporal trends and relationships to watershed TN and TP fluxes [J]. *Biogeochemistry*, 2017,133:245-261.
- [55] Chen D, Hu M, Guo Y, et al. Influence of legacy phosphorus, land use, and climate change on anthropogenic phosphorus inputs and riverine export dynamics [J]. *Biogeochemistry*, 2015,123:99-116.
- [56] Zhong W, Wang S, Dong Y, et al. Trends of the response-relationship between net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs (NANI/NAPI) and TN/TP export fluxes in Raohe basin, China [J]. *Chemosphere*, 2022,286:131662.

作者简介:郭玉静(2000-),女,湖南郴州人,北京林业大学水土保持学院硕士研究生,主要研究水土保持工程学.发表论 1 篇.
guoyujing818@163.com.