及业环境计学学报 JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE

中文核心期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址: http://www.aes.org.cn

基于社会-经济因子修正的沱江流域农业面源总磷污染负荷时空演变研究

姚婧, 杨丽君, 肖宇婷, 樊敏, 谌书, 刘云峰, 王华伟, 陈雯, 邓粤, 王美玲

引用本文:

姚婧, 杨丽君, 肖宇婷, 樊敏, 谌书, 刘云峰, 王华伟, 陈雯, 邓粤, 王美玲. 基于社会-经济因子修正的沱江流域农业面源总磷污染负荷时空演变研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 1022-015-1.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1100

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

汉江流域农业面源污染的源解析

唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 常文倩, 唐新玥

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2242-2251 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1751

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

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174-184 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853

江西省农业面源污染时空特征及污染风险分析

熊昭昭, 王书月, 童雨, 程丽华, 徐新华

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2821-2828 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0149

农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评价研究 ——以淮河流域为例

宋大平, 左强, 刘本生, 邹国元, 刘东生

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1219-1231 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1374

林芝市农业面源污染负荷时空变化与分布特征

郝守宁,付意成

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1308-1315 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0499



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

姚婧,杨丽君,肖宇婷,等.基于社会-经济因子修正的沱江流域农业面源总磷污染负荷时空演变研究[J].农业环境科学学报,2022,41(5):1022-1035.

YAO J, YANG L J, XIAO Y T, et al. Spatial-temporal evolution of agricultural non-point sources of total phosphorus pollution loads in Tuojiang River watershed based on correction of social-economic factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 1022–1035



开放科学OSII

基于社会-经济因子修正的沱江流域农业面源总磷污染负荷时空演变研究

姚婧¹,杨丽君¹,肖宇婷¹,樊敏^{1*},谌书¹,刘云峰²,王华伟²,陈雯²,邓粤²,王美玲² (1.西南科技大学环境与资源学院,四川绵阳 621010; 2.成都市沱江流域投资发展集团有限公司,成都 611741)

摘 要:本研究选取沱江流域为研究区域,引入社会-经济因子,采用修正的排污系数法估算该流域污染负荷。首先基于流域28个区县2011—2017年的人口和农作物产量等相关数据,采用GM(1,1)预测法预测其在2021—2025年期间的变化趋势,其次采用修正的排污系数法计算各区县农业面源总磷(TP)污染负荷,最后利用探索性空间数据分析方法(ESDA)探索2025年各污染源TP污染负荷空间变化特征,结果表明:2021—2025年,TP污染负荷总体将呈逐年递增趋势,增量将为266.34 t,增幅将为2.18%,各污染源TP污染负荷贡献率将表现为畜禽养殖>农田固废>农田径流>农村生活污水>农村生活垃圾。与2017年相比,2025年农村生活污水和农村生活垃圾TP污染负荷较高的区县将减少,而农田径流、农田固废和畜禽养殖TP污染负荷较高的区县将增加。2017年与2025年修正后的各污染源TP污染负荷最大值出现的区县具有较大的差异。2025年,修正前后各污染源TP污染负荷局部集聚特征差异显著,且修正后的各污染源TP污染负荷将表现为同污染程度集聚。因此,基于沱江流域社会-经济因子修正的流域各农业面源TP污染负荷评估不仅能考虑排污系数的区域差异性,也能更深层地揭示TP污染负荷的空间集聚效应,且该修正方法具有所需参数少、操作简单的特点,能推广到其他相似流域的水环境管理与污染防治中。

关键词:农业面源污染;总磷;空间相关性;探索性空间数据分析(ESDA);沱江流域

中图分类号: X52; X71 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)05-1022-14 doi:10.11654/jaes.2021-1100

Spatial-temporal evolution of agricultural non-point sources of total phosphorus pollution loads in Tuojiang River watershed based on correction of social-economic factors

YAO Jing¹, YANG Lijun¹, XIAO Yuting¹, FAN Min^{1*}, CHEN Shu¹, LIU Yunfeng², WANG Huawei², CHEN Wen², DENG Yue², WANG Meiling² (1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Chengdu Tuojiang River Basin Investment Development Group Co., Ltd., Chengdu 611741, China)

Abstract: The traditional estimation of pollution loads ignores the impact of temporal-spatial heterogeneity of socio-economic factors on the calculation results, which do not objectively reflect the actual pollution situation. Therefore, the study selected the Tuojiang River watershed as the study site and adopted the corrected pollution discharge coefficient method based on socio-economic factors to estimate total phosphorus (TP) pollution loads in the watershed. First, based on statistical data (such as population and cultivated land area, crop production, and the number of livestock) of 28 counties located in the watershed from 2011 to 2017, the GM (1, 1) model was used to predict the variation trend from 2021 to 2025. This study then calculated the TP pollution loads of each district (county) from diverse

收稿日期:2021-09-24 录用日期:2021-12-29

作者简介:姚婧(1997—),女,甘肃平凉人,硕士研究生,从事流域水管理与规划研究。E-mail:1525517190@qq.com

^{*}通信作者:樊敏 E-mail:firstfanmin@hotmail.com

基金项目:四川省科技计划重点研发项目(2019YFS0057,2020YFS0306);国家自然科学基金项目(41601088)

pollution sources using the corrected pollution discharge coefficient method in the future. Finally, exploratory spatial data analysis (ESDA) was used to explore the spatial distribution variation of TP pollution loads from diverse pollution sources in 2025. The results are as follows: from 2021 to 2025, the total TP pollution loads will increase steadily by 2.18%, and the increment will be 266.34 t. Among them, TP pollution loads from rural domestic sewage, rural domestic waste, and livestock and poultry pollution sources will decrease gradually, whereas TP pollution loads from agricultural runoff and agricultural solid waste pollution sources will increase yearly. The contributions of TP pollution loads from diverse pollution sources to total TP pollution loads are as follows: livestock and poultry, agricultural solid waste, agricultural runoff, rural domestic sewage, and rural domestic waste. From a spatial perspective, compared with 2017, the number of districts (counties) with high TP pollution loads from rural domestic sewage and rural domestic waste pollution sources will decrease. However, agricultural runoff, agricultural solid waste, and livestock and poultry pollution sources will increase. Moreover, there are differences in the districts (counties) with the highest TP pollution loads in 2017 and 2025. In 2025, the difference in the local cluster patterns of uncorrected and corrected TP pollution loads will be prominent. After modification, TP pollution loads from diverse pollution sources show a pattern that is similar to the pollution level cluster. The evaluation of TP pollution loads from various pollution sources in the Tuojiang River watershed based on the correction of socio-economic factors not only considers the temporal-spatial differentiation of pollution discharge coefficients but also reveals the spatial cluster pattern of TP pollution loads. The method has the characteristics of fewer parameters and easy operation, which can be extended to water environment management and pollution prevention in other similar watersheds.

Keywords: agricultural non-point source pollution; total phosphorous; spatial correlation; exploratory spatial data analysis (ESDA); Tuojiang River watershed

农业面源污染是指在农村生活和农业生产活动 中溶解的或固体的污染物(如生活垃圾、农田中的化 肥和畜禽粪便等),在降雨和径流的冲刷下,从非特定 的地域进入受纳水体而引起的污染,其具有形成过程 复杂、随机性大、分布范围广以及潜伏期长等特 点[1-2]。随着工业和城市点源污染逐步得到治理和控 制,农业面源污染对水环境的影响日益凸显[3],我国 《第二次全国污染源普查公报》显示,2017年农业源总 磷(TP)排放量为2.120×105t,占全国总TP排放量的 67.22%,农业面源TP污染已成为导致流域水环境恶 化的主要原因之一,同时也是制约农业经济可持续发 展和农村水环境质量改善的重要原因[4]。因此,农业 面源污染负荷未来变化趋势、时空分布特征分析及其 空间相关性探索研究对流域水环境质量改善具有重 要意义,可以为环保部门制定相关政策提供重要科学 依据。

目前,国内外学者针对面源污染开展了一系列研 究,主要围绕污染负荷估算方法及源解析[5]、时空分布 特征分析[6]、评价方法[7]、污染类型划分[8]及防治[9-10]等 内容。污染负荷估算方法从总体上可分为集总式水 文模型和分布式模型[11]。集总式水文模型主要包括水 质水量法[12]、输出系数法[13]和平均浓度法等[14],其中应 用较为广泛的输出系数模型计算原理简单,所需参数 少,且具有一定的精度,适合于估算大中尺度流域面源

污染的年负荷量[15]:分布式模型主要包括ANSWERS[16]、 BASINS[17]、SWAT[18]和 AnnAGNPS[19]等,此类模型所需 参数多,建模要求高,同时模拟精度也较高。在估算 出污染负荷的基础上进行时空分布研究,有助于识别 出研究区污染高负荷区域,从而可制定针对性治理政 策。目前,污染负荷时空分布研究方法主要有多元统 计分析法[20]、GIS技术[21]、Kernel 密度估计法[22]等。综 合评价污染源对水环境的影响是进行污染物总量控 制的重要依据,污染源评价方法大致可分为单一评价 法、综合评价法和经济技术评价法3类,其中,应用较 广泛的是综合评价法中的等标污染负荷法[23],该方法 简单、可操作性强,且具有较好的综合性。

沱江是长江上游的一级支流,其水质对整个长江 流域水环境有着至关重要的作用。近年来,流域磷矿 开采活动的不断开展、畜禽养殖规模的扩大以及农田 农药化肥用量的增加,导致流域TP污染问题非常突 出。2016年, 沱江TP平均浓度为0.274 mg·L⁻¹, 在长 江一级支流中最高[24]。对此,四川省开展了一系列磷 污染排放攻坚工作,但成效有限,TP污染问题依旧严 峻。综合国内外和沱江流域污染负荷的研究现状,发 现排污系数法在流域面源污染负荷估算中广泛应用, 但该方法忽略了社会-经济因子时空差异对污染负 荷估算结果的影响,并不能反映流域实际污染状况。 因此,本文以沱江流域为研究区域,基于历史社会- 经济因子在该流域28个区县和四川省的时空变化特征及其比例关系,采用修正的排污系数法预测各污染源TP污染负荷,分析其时空变化趋势,识别主要污染源及污染区县,为相关部门精准治污提供科学依据,进而促进流域水环境持续健康发展。

1 研究区域概况

沱江位于四川省中部,发源于绵竹市清平镇,流经简阳市、资阳市、资中县、内江市、自贡市和富顺县等,全长627.4 km,流域面积为2.76×10⁴ km²,其中,四川境内流域面积为2.55×10⁴ km²,地理坐标为28°49′17″~31°42′03″N,103°40′57″~105°42′50″E^[25](图1)。沱江流域是四川省人口密度最大、城市分布最密集、经济社会发展最好、工农业生产最发达的地区,承载了全省30.8%的经济总量和26.2%的人口,流域内工业、城镇生活、畜禽养殖和农业种植等各类污染源众多^[26],粮食和经济作物种植力度大、畜禽养殖规模大、土地利用强度大等因素导致流域TP超标严重^[25],严重影响流域内人民的生产生活,制约着整个流域的社会经济发展。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

本研究所采用的相关基础统计数据主要源于统 计年鉴和网络数据平台,详细信息见表1。

2.2 农业面源核算基础数据预测

考虑到数据的可获取性,本研究采用GM(1,1)模型^[27]分3部分进行相关社会-经济数据的预测:第一部分是分别将2011—2015年和2016—2017年沱江流域各区县旱地和水田面积、作物产量(稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类和油料)作为GM(1,1)模型的校核和验证,预测2021—2025年变化趋势;第二部分是分别将2011—2017年和2018—2019年沱江流域各区县

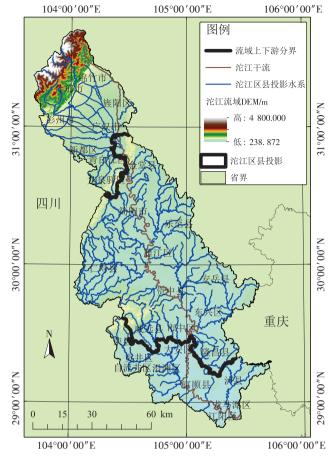


图1 沱江流域空间地理图

Figure 1 Spatial geographical map of Tuojiang River watershed

农村人口数、畜禽年末出栏头数(生猪、牛、羊、家禽)和第一产业GDP作为GM(1,1)模型的校核和验证,预测2021—2025年变化趋势;第三部分是分别将2011—2017年和2018—2019年四川省农、牧业及第一产业GDP作为GM(1,1)模型的校核和验证,预测2021—2025年变化趋势。

2.3 各区县TP污染负荷估算

本研究采用排污系数法^[6],综合相关文献和沱江 流域实际地理环境状况,确定各污染源TP污染负荷

表1 数据来源信息

Table 1 Data sources

| 数据类型 Data type | 数据来源 Data source | 用途 Application | |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|--|
| 沱江流域 DEM 栅格数据 | 地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/) | 用于沱江流域空间地理图的绘制 | |
| 沱江流域区县矢量边界 | 地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/) | 用于沱江流域空间地理图的绘制 | |
| 2011—2017年沱江流域各区县农村人口数 | 2011—2017年《四川统计年鉴》 | 用于农村生活污水和农村生活垃圾污染源TP 污染负荷计算 | |
| 2011—2017年沱江流域各区县旱地和水田面积、粮食和经济作物产量、畜禽年末出栏头数 | 2011—2017年《四川省农业统计年鉴》 | 用于农田径流、农田固废和畜禽养殖污染源TP 污染负荷计算 | |
| 沱江流域各区县面积 | 四川省水利厅 | 用于修正系数计算 | |
| 2011—2017年四川省农、牧业和第一产业GDP | 2011—2017年《四川统计年鉴》 | 用于沱江流域农牧业GDP的计算 | |

产污系数,具体计算公式及参数值见表2。

2.4 TP污染负荷预测修正

人口、农业 GDP 和牧业 GDP 分别是驱动农村生 活类(农村生活污水和农村生活垃圾)、农业种植类 (农田径流和农田固废)和畜禽养殖类污染负荷变化 的主要因素[43-45]。传统排污系数法估算污染负荷时 忽略了这些因素,其估算结果可能会低估(高估)部分 农业人口较多(少)或农牧业发达(落后)区县的污染 负荷。因此,本文首先引入人口因子对农村生活污水 和农村生活垃圾污染源产污系数进行修正,其次引入 农业GDP对农田径流和农田固废污染源产污系数进 行修正,最后引入牧业GDP对畜禽养殖污染源产污 系数进行修正,进而得到修正的各污染源TP污染负 荷。沱江流域各区县人口数据可以直接获取,因此直 接基于各区县人口数据计算各区县的人口修正系数 α_{ii} ,其详细计算过程见图 2 和表 3 中的公式 (6)。鉴于 该流域28个区县2011—2017年农、牧业GDP统计数 据的可获取性及沱江流域涉及行政区域对四川省社 会经济发展的贡献性(沱江流域以仅占全省3.5%的 水资源支撑了全省30.8%的经济总量和26.2%的人 口[26]),首先,基于四川省2011—2017年第一产业和 农、牧业GDP数据,采用GM(1,1)模型预测其2021— 2025年变化趋势, 计算其农、牧业 GDP 比例系数 ω 和 Ψ , 其次将 2021—2025 年沱江流域各区县第一产业 GDP 值乘以相应的农、牧业比例系数 ω_i 和 Ψ_i ,得到各 区县2021-2025年农、牧业GDP值,最后计算农业修 正系数 β_{ii} 和牧业修正系数 γ_{ii} ,详细计算过程见图2和 表3中的公式(7)~公式(12)。

表2 各污染源TP污染负荷计算所需参数

Table 2 The required parameters for calculating TP pollution loads from diverse pollution sources

| 污染源 | 计算公式 | | 参数说明 | 参数值 |
|------------------|--|-----|--|--|
| Pollution source | Calculation formula | | Parameter | Parameter value |
| 农村生活污水 | $L=p\times(\alpha_{ij}\times_C)\times l$ | (1) | 式中: L 为农村生活污水 TP 污染负荷, t ; p 为农村人口数,人; c 为人均产污系数, g ·人 $^{-1}$ · d ⁻¹ ; l 为人河系数; α_{ij} 为修正人均产污系数 c 的人口修正系数。 | 参考相关文献[28-29]并结合沱江流域农村生活污水排放实际情况,确定 c 为 $0.7~g$ ·人 $^{-1}$ · d^{-1} ;参考相关文献[20-31]及沱江流域农村居民住宅区与周围水体的距离,确定 l 为 0.3 。 |
| 农村生活垃圾 | $L=p\times \underbrace{w\times a}_{(\alpha_{ij}\times c)} \times l$ | (2) | 式中: L 为农村生活垃圾 TP 污染负荷, $t;p$ 为农村人口数,人; w 为人均垃圾产生量, $kg \cdot \Lambda^{-1} \cdot d^{-1}$; a 为垃圾渗滤液中 TP 平均含量, $kg \cdot t^{-1} \cdot d^{-1}$; d 为人为产污系数, $g \cdot \Lambda^{-1} \cdot d^{-1}$; d 为人河系数; α_{ij} 为修正人均产污系数 c 的人口修正系数。 | |
| 农田径流 | $L = \sum_{i=1}^{n} (\beta_{ij} \times c) \times \{s \times t \times r \times m_{i} \times f\} \times A_{i} \times l$ | (3) | 地面积, hm^2 ; c 为标准农田产污系数, kg · hm^{-2} · a^{-1} ; s 为坡度修正系数; t 为土壤修正 | c 为6.9 kg·hm ⁻² ·a ⁻¹ ;结合沱江流域地形、气象和农田用地类型等实际情况分别确定 s 为 1.2, t 为 1.0, r 为 1.1, m_i 为 1.5(水田)和 1.0(早地), f 为 1.1 ^[26,28] ;参考相关文献 ^[36] 对凯江流域农田径流的研究,确定 l 为 0.05。 |
| 农田固废 | $L = \sum_{i=1}^{n} p_{i} \times \underbrace{\sigma_{i}}_{i} \times \tau_{i} \times l$ $(\beta_{ij} \times c_{i})$ | (4) | 式中: L 为农田固废TP污染负荷, ι ; n 为作物种类; p _{i} 为作物 i 产量, ι ; σ _{i} 为农作物 i 秸秆固废产量比, \mathcal{C} ; τ _{i} 为农作物 i 固废TP含量, g : ι ^{i} ; c _{i} 为产污系数; l 为入河系数; β _{i} 为修正产污系数 c _{i} 的农业GDP修正系数。 | 参考相关文献[37-38],确定稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类和油料(花生、油菜)的秸秆固废产量比分别为 0.97%、1.03%、1.37%、1.71%、0.61% 和 2.26%,秸秆固废的 TP 含量分别为 0.42、0.90、2.39、2.24、0.67 $\mathrm{g}\cdot\mathrm{t}^{-1}$ 和 3.06 $\mathrm{g}\cdot\mathrm{t}^{-1}$ 参考相关文献[39-40],确定 l 为 0.073 4。 |
| 畜禽养殖 | $L=n \times \left(\underbrace{\frac{e_i \times a_j}{(\gamma_{ij} \times c_i)} \times l_i + \underbrace{e_j \times a_j}_{(\gamma_{ij} \times c_j)} \times l_j}_{(\gamma_{ij} \times c_i)} \right)$ | (5) | 式中: L 为畜禽养殖TP污染负荷, t ; n 为畜禽年末出栏头数,头; e 。为畜禽粪便排泄系数, $kg \cdot y^{-1} \cdot a^{-1}$; a 。为畜禽粪便中TP平均含量, $kg \cdot t^{-1}$; c 。为产污系数; t 。为畜禽粪便污染物人河系数; e 。为畜禽尿液排泄系数, $kg \cdot y^{-1} \cdot a^{-1}$; a ,为畜禽尿液中TP平均含量, $kg \cdot t^{-1}$; c ,为产污系数, t ,为畜禽尿液行染物人河系数; y 。为修正产污系数 t ,和 t | 参考相关文献 ^[41] ,确定猪、牛、羊和家禽的粪便排泄系数分别为 398、7 300、950 kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹ 和 26.3 kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹ ,粪便中TP平均含量分别为 3.41、1.18、0.47 kg·t ⁻¹ 和 5.79 kg·t ⁻¹ ;猪和牛的尿液排泄系数分别为 656.7 kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹ 和 3 650 kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹ ,尿液中TP平均含量分别为 0.52 kg·t ⁻¹ 和 0.40 kg·t ⁻¹ ;参考相关文献 ^[42] ,确定 l_i 和 l_i 均为 0.5。 |

注:未修正的各污染源TP污染负荷计算时,与产污系数c相关的修正系数均取值为1;修正的各污染源TP污染负荷计算时,与产污系数c相关 的修正系数确定过程详见2.4小节。

Note: When estimating uncorrected TP pollution loads, the corrected parameters related to pollutant generation coefficients are equivalent to 1. However, when estimating corrected TP pollution loads, the corrected parameters related to pollutant generation coefficients are determined by the following process (section 2.4).

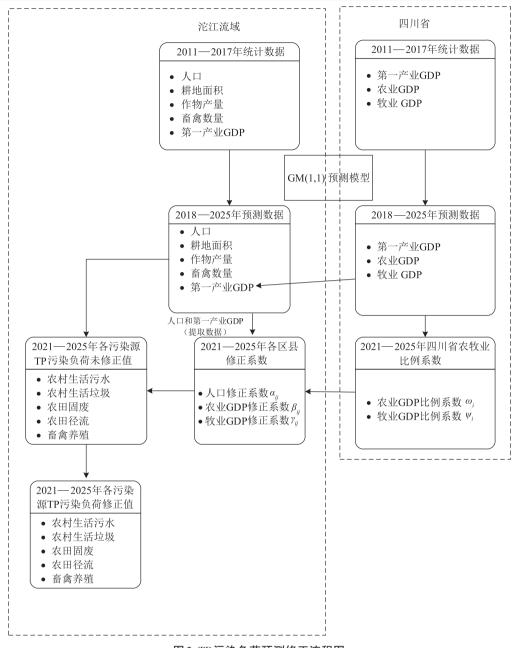


图2 TP污染负荷预测修正流程图

Figure 2 Flow chart of prediction and correction of TP pollution loads

2.5 局部空间相关性分析

局部空间自相关可反映一个区域单元上的某种 地理现象或某一属性值与邻近区域单元上同一现象 或属性值的相关程度^[46],该方法能够描述空间对象分 布中所存在的局部特征差异,常用Local Moran's I 衡 量,具体计算公式为:

$$I_{i} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} W_{ij} Z_{i} Z_{j}$$
(13)

式中: Z_i 和 Z_j 为观测值的均值标准化; W_i 为空间邻接矩阵的标准化形式,即 $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}=n$ 。根据 I_i 和 Z_i

值的变化,可以将局部空间自相关分为4种类型: H-H型、H-L型、L-H型和L-L型。为使这些聚类结果具有实际意义[47],本研究将以上4种集聚类型的区县依次重新定义为较高、高、低和较低污染风险地区。

3 结果与分析

3.1 GM(1,1)模型及修正的排污系数法验证

本文将2016年和2017年沱江流域各区县耕地面积、作物产量实际数据与其预测数据分别进行比较(表4),同时将2018年和2019年沱江流域各区县农

表3 各污染源污染负荷修正系数

Table 3 The modified coefficients of pollution loads from various pollution sources

| 修正系数 Modified coefficient | 计算公式 Formula | | 相关参数说明 Relevant parameter | 用途 Application |
|---------------------------------------|---|------|---|-----------------------------------|
| 人口修正系数 $lpha_{ij}$ | $\alpha_{ij} = \frac{\left(\frac{i \mp \underline{\text{EB}} j \times \overline{\text{rh}} \underline{\text{LD}}}{\underline{\text{EB}} j \underline{\text{m}} \Re}\right)}{\left(\frac{i \mp 28 \underline{\text{rh}} \underline{\text{EB}} \otimes \overline{\text{rh}} \underline{\text{LD}}}{28 \underline{\text{rh}} \underline{\text{EB}} \underline{\text{m}} \Re}\right)}$ | (6) | 式中: α_{i} 为 i 年区县 j 人口修正系数; i 为年份; j 为沱江流域28个区县中某一区县。 | 用于农村生活污水和 农村生活垃圾污染源 产污系数修正。 |
| 四川省农业 GDP 比例系数 ω _i | ω _i = <u></u> i年四川省农业GDP i年四川省第一产业GDP | (7) | 式中: ω_i 为 i 年四川省农业 GDP比例系数, i 为年份。 | 用于沱江流域农业 GDP计算。 |
| 四川省牧业 GDP 比例系数ψ _i | ψ _i = <u>i</u> 年四川省牧业GDP i年四川省第一产业GDP | (8) | 式中: ψ_i 为 i 年四川省牧业 GDP 比例系数, i 为年份。 | 用于沱江流域牧业 GDP计算。 |
| 各区县农业 GDP | 农业 GDP _{ij} =ω _i ×i 年区县j第一产业 GDP | (9) | 式中: ω_i 为 i 年四川省农业GDP比例系数; i 为年份; j 为沱江流域28个区县中某一区县。 | 用于农业GDP修正系 数计算。 |
| 各区县牧业GDP | 牧业GDP _{ij} =ψ,×i年区县j第一产业GDP | (10) | 式中: ψ_i 为 i 年四川省牧业GDP比例系数; i 为年份; j 为沱江流域28个区县中某一区县。 | 用于牧业 GDP 修正系数计算。 |
| 农业 GDP修正 系数 <i>β</i> _{ij} | $eta_{ij} = rac{\left(rac{i \mp \mathbb{G} \pm j / \infty + \omega \text{GDP}}{\mathbb{K} \pm j / \infty} ight)}{\left(rac{i \mp 28 \cap \mathbb{K} \pm \delta \times \psi \text{GDP}}{28 \cap \mathbb{K} \pm \delta \text{im}} ight)}$ | (11) | 式中: β_i 为 i 年区县 j 农业GDP修正系数; i 为年份; j 为沱江流域28个区县中某一区县。 | 用于农田径流和农田 固废污染源产污系数 修正。 |
| 牧业 GDP修正 系数 γ _ϋ | $\gamma_{ij} = \frac{\left(rac{i \mp \omega \underline{H} y \psi u \mathrm{GDP}}{\mathrm{E} \underline{H} i \mathrm{E} \mathrm{E} \underline{H} \mathrm{E} \mathrm{DP}}\right)}{\left(rac{i \Xi 28 \gamma \mathrm{E} \underline{H} \psi u \mathrm{GDP}}{28 \gamma \mathrm{E} \underline{H} \mathrm{E} \mathrm{E} \mathrm{E} \mathrm{E} \mathrm{E} \mathrm{E}}\right)}$ | (12) | 式中: γ_i 为 i 年区县 j 牧业GDP修正系数; i 为年份; j 为沱江流域28个区县中某一区县。 | 用于畜禽养殖污染源 产污系数修正。 |

村人口、畜禽年末出栏头数和第一产业GDP及四川省农、牧业和第一产业GDP实际数据与其预测数据分别进行比较(表5),其最大误差低于10%,表明此方法具有较高的计算精度,计算结果可信,可以将该模型应用到2021—2025年社会-经济数据预测和TP污染负荷修正。

此外,本文比较了基于传统排污系数法和修正排污系数法的TP污染负荷估算结果,进一步验证了本研究提出的基于社会-经济因子修正TP污染负荷计算方法的可行性。本研究首先基于2011—2016年沱江流域各区县农业人口、耕地面积、作物产量和畜禽年末出栏头数等数据,采用GM(1,1)预测其2017年

表4 耕地面积-作物产量的GM(1,1)模型验证

Table 4 GM(1,1) model validation of cultivated land area and crop yield

| 项 | 目 Item | 2016年 | 2017年 |
|------|---------|---------------|---------------|
| 耕地面积 | 真实值/hm² | 34 503 945.00 | 36 732 886.60 |
| | 预测值/hm² | 34 427 366.10 | 34 538 051.70 |
| | 误差/% | -0.22 | -5.98 |
| 作物产量 | 真实值/t | 9 435 307.00 | 9 460 302.18 |
| | 预测值/t | 9 094 159.09 | 9 172 946.88 |
| | 误差/% | -3.62 | -3.04 |

变化趋势,其次分别采用传统排污系数法和修正排污 系数法计算不同污染源TP污染负荷,并将其与前人

表5 其他社会-经济数据的GM(1,1)模型验证

Table 5 GM(1,1) model validation of other socio-economic data

| 项目Item | | 2018年 | 2019年 | |
|-----------------|--------|---------------|---------------|--|
| 农村人口 | 真实值/人 | 920.50 | 891.60 | |
| | 预测值/人 | 935.91 | 918.23 | |
| | 误差/% | 1.67 | 2.99 | |
| 畜禽 | 真实值/头 | 19 398.64 | 21 828.05 | |
| | 预测值/头 | 19 944.05 | 20 200.27 | |
| | 误差/% | 2.81 | -7.46 | |
| 第一产业 | 真实值/万元 | 10 788 545.00 | 12 016 519.00 | |
| GDP | 预测值/万元 | 10 680 444.15 | 11 073 489.66 | |
| | 误差/% | -1.00 | -7.85 | |
| 四川省第一 产业 GDP | 真实值/亿元 | 7 006.47 | 7 678.61 | |
| | 预测值/亿元 | 7 436.94 | 7 850.39 | |
| | 误差/% | 6.14 | 2.24 | |
| 四川省农业 | 真实值/亿元 | 4 153.71 | 4 395.04 | |
| GDP | 预测值/亿元 | 4 287.79 | 4 637.88 | |
| | 误差/% | 3.23 | 5.53 | |
| 四川省牧业 | 真实值/亿元 | 2 246.08 | 2 647.88 | |
| GDP | 预测值/亿元 | 2 362.86 | 2 389.66 | |
| | 误差/% | 5.20 | -9.75 | |

研究结果[48]进行对比分析,结果见表6。各污染源TP 污染负荷预测值与前人研究结果相对误差保持在5% 以内,农村生活污水、农村生活垃圾、农田径流和农田 固废TP污染负荷修正值与前人研究结果相对误差保 持在10%左右,修正结果在可接受范围内。畜禽养 殖TP污染负荷修正值与前人研究结果相对误差保持 在15%左右,修正结果偏高。统计年鉴中未反映出 各区县畜禽死亡淘汰数,这部分产出粪尿未计入粪尿 总量中,导致估算结果偏小[49],因此,本研究修正后的 畜禽养殖TP污染负荷可大体反映该流域未来污染状 况。同时,污染负荷估算参数应是动态数据[49],而传 统排污系数法估算污染负荷时取静态值,其估算值未 能如实反映各地区污染物排放量的时空差异。修正 的TP污染负荷与未修正TP污染负荷的误差是由基 于四川省农、牧业 GDP 与第一产业 GDP 比例系数估 算得到的沱江流域各区县农、牧业 GDP 数据与其实 际值之间的差异导致的,鉴于沱江流域涉及行政区域 对四川省社会经济发展的贡献性,四川省农、牧业 GDP数据仍可用于沱江流域各区县农、牧业GDP的 估算。综上分析,修正排污系数法更为合理,其估算 值可客观地反映流域未来污染状况。

3.2 TP污染负荷时间变化分析

如图 3a 所示, 2021—2025年, 沱江流域总 TP 污染负荷由 12 194.92 t增加至 12 461.26 t, 将增加 266.34 t,增幅为 2.18%; 如图 3b~图 3d 所示, 农村生活污水、农村生活垃圾和畜禽养殖的 TP 污染负荷均呈逐年递减趋势, 其将分别减少 94.24、77.90 t和 86.52 t,降幅分别为 16.92%、16.92%和 1.10%; 如图 3e 和图

3f所示,农田径流和农田固废的TP污染负荷均呈逐年递增趋势,将分别增加74.52 t和450.49 t,增幅分别为4.82%和19.64%。各污染源TP污染负荷的绝对变化量将表现为农田固废>农村生活污水=农村生活垃圾>农田径流>畜禽养殖。2021—2025年沱江流域各污染源TP污染负荷贡献率如图4所示,畜禽养殖贡献率将最高,在60%以上,将成为沱江流域主要污染源,农村生活垃圾贡献率将最低,低于4%。各污染源TP污染负荷贡献率将表现为畜禽养殖>农田固废>农田径流>农村生活污水>农村生活垃圾。

3.3 TP污染负荷空间演变分析

本研究选取 2017年和 2025年各污染源 TP 污染负荷数据,探究空间分布演变规律(图5)。农村生活污水和农村生活垃圾 TP 污染负荷空间分布特征较为相似(图5a和图5b)。2017年,农村生活污水、农村生活垃圾 TP 污染负荷较高的区县均位于中游的仁寿县、资中县和安岳县以及下游的泸县,2025年将位于上游的新都区和龙泉驿区。2017年,农田径流 TP 污染负荷较高的区县位于中游的安岳县,2025年将位于中游的安岳县和下游的荣县和江阳区(图5c)。2017年中游安岳县的农田固废 TP 污染负荷较高,2025年中游的安岳县和东兴区以及下游的泸县和荣县的农田固废 TP 污染负荷较高(图5d)。2017年,畜禽养殖 TP 污染负荷较高的区县位于中游的安岳县和下游的泸县,2025年将位于中游的仁寿县和安岳县以及下游的泸县,2025年将位于中游的仁寿县和安岳县以及下游的荣县、泸县和江阳区(图5e)。

3.4 TP污染负荷空间集聚效应分析

为进一步揭示社会-经济因子对TP污染负荷空

表6 排污系数法与修正的排污系数法验证

Table 6 The verification of corrected and uncorrected pollution discharge coefficient method

| 污染源 Pollution source | 前人研究结果 Previous research result | 预测值 Predicted value | 修正值 Corrected value | 误差 1 Error 1/% | 误差2 Error 2/% | 误差3 Error 3/% |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 农村生活污水 | 730.14 | 728.45 | 817.38 | -0.23 | 11.95 | 12.21 |
| 农村生活垃圾 | 603.59 | 602.18 | 675.70 | -0.23 | 11.95 | 12.21 |
| 农田径流 | 1 344.95 | 1 289.06 | 1 441.23 | -4.16 | 7.16 | 11.80 |
| 农田固废 | 1 394.86 | 1 423.30 | 1 539.85 | 2.04 | 10.39 | 8.19 |
| 畜禽养殖 | 4 638.87 | 4 782.23 | 5 384.49 | 3.09 | 16.07 | 12.59 |

注:前人研究结果为前人基于实际基础数据,采用传统排污系数法计算得到的污染负荷值,预测值为传统排污系数法计算得到的研究结果,修正值为修正的排污系数计算得到的研究结果;误差1为预测值与前人研究结果的相对误差,误差2为修正值与前人研究结果的相对误差,误差3为修正值与预测值的相对误差。

Note: The previous research results are pollution loads calculated by the traditional pollution discharge coefficient method based on the actual basic data, the predicted value is the research results calculated by the traditional pollution discharge coefficient method, and the corrected value is the research results calculated by the modified pollution discharge coefficient. Error 1 is the relative error between the predicted value and the previous research results, and error 3 is the relative error between the corrected value and the predicted value.

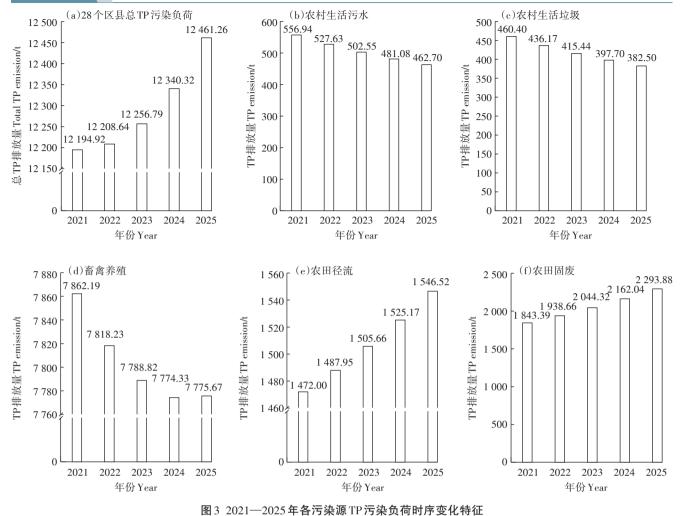


Figure 3 Temporal variation of TP pollution loads from diverse pollution sources from 2021 to 2025

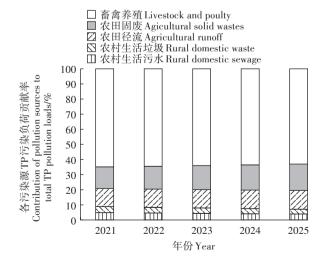


图 4 各污染源 TP 污染负荷贡献率

Figure 4 Contribution rate of TP pollution loads from diverse pollution sources to summed TP pollution loads from all pollution sources across whole Tuojiang River watershed

间分异格局的影响,本研究将修正前后各污染源TP 污染负荷局部自相关集聚图进行对比,结果如图6所 示。农村生活污水和农村生活垃圾TP污染负荷修正 后较高、较低污染风险区县数量将增加,高污染风险 区县将消失(图 6a 和图 6b),修正后较高污染风险区 为新都区,低污染风险区为青白江区,较低污染风险 区为泸县。农田径流TP污染负荷修正后较高、较低 污染风险区县数量均将减少(图 6c),修正后较高污 染风险区为资中县,较低污染风险区为新都区和广汉 市。农田固废TP污染负荷修正后较高污染风险区县 数量将减少,较低污染风险区县数量将增加(图6d), 修正后较高污染风险区为雁江区、资中县和安岳县, 较低污染风险区为什邡市、彭州市、广汉市、新都区、 青白江区和旌阳区。畜禽养殖TP污染负荷修正后较 高、较低污染风险区县均将减少(图6e),修正后低污 染风险区为龙马潭区,较低污染风险区为自流井区。

农业环境科学学报 第41卷第5期

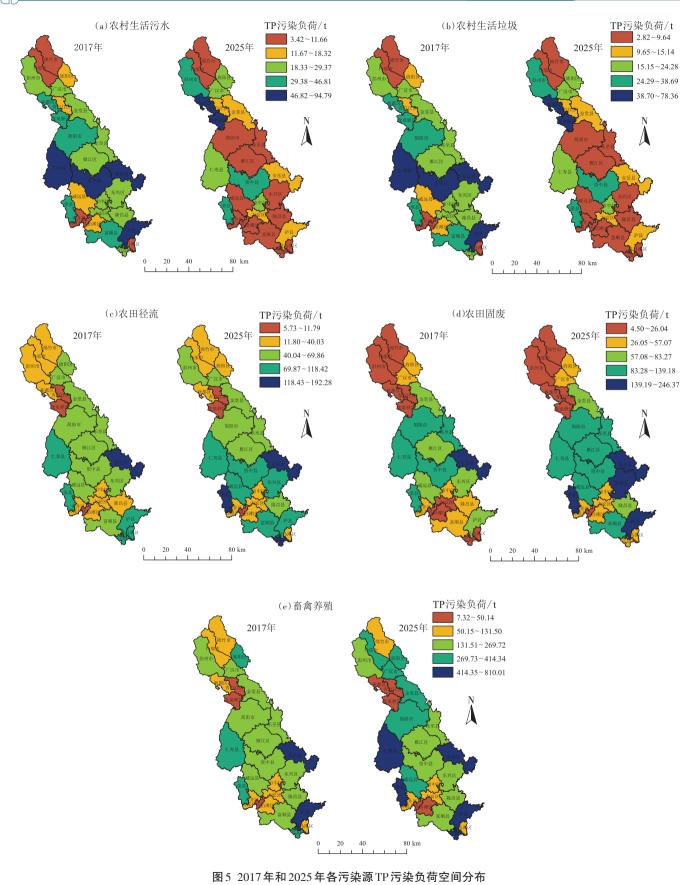
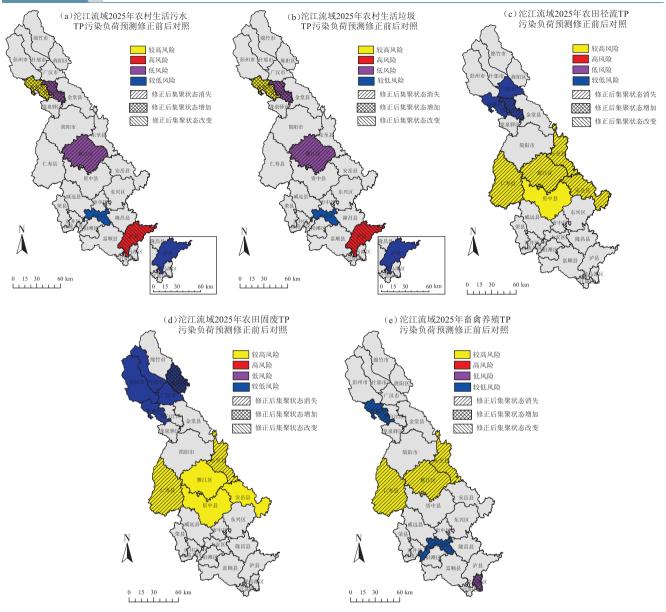


Figure 5 Spatial distribution of TP pollution loads from diverse pollution sources in 2017 and 2025



(a)和(b)的局部放大图为修正后集聚状态发生改变的区县,其颜色代表修正后该区域TP污染负荷的集聚状态The local enlarged drawing in figure (a) and (b) are the districts(counties) whose cluster status changed after correcting, whose color represent cluster state of TP pollution loads in the districts(counties) after correction

图 6 各污染源 TP 污染负荷修正前后局部自相关集聚对比图

Figure 6 Contrast of local autocorrelation cluster diagram of uncorrected and corrected TP pollution loads from diverse pollution sources

4 讨论

4.1 沱江流域 TP 污染负荷时空变化特征

2021—2025年,沱江流域TP污染负荷呈逐年增加趋势,其中,农村生活类和畜禽养殖类TP污染负荷呈逐年减少趋势,农业种植类TP污染负荷呈逐年增加趋势(图3)。农村生活类TP污染负荷的减少与人口的减少、生活污水处理设施的完善及生活垃圾的集中处理有关[50]。沱江流域畜禽养殖业逐渐由散养向

专业化养殖转变,产污系数较大的畜禽数量将逐年减少,畜禽粪便的处理效率不断提升,畜禽排泄物对环境的污染日趋减缓^[51]。农业种植源污染负荷的增加主要与农药化肥的不合理施用有关。此外,畜禽养殖、农田径流和农田固废将是主要污染源。胡芸芸等^[10]也发现沱江流域农业面源污染主要来自于畜禽养殖和种植类污染,杜明等^[52]研究发现沱江流域TP超标严重,畜禽养殖、农田径流和农村生活是其主要污染源。长期粗放的农业生产方式、畜禽养殖废水废

物的肆意排放和农村生活废水的低处理率促使沱江 流域发展为生产型污染,即种植业生产与畜禽污染。 未来水环境治理应侧重于科学有效地使用化肥农药, 减少不合理的用量,提高农业生产的效率和效益,同 时推动畜禽粪便、农作物秸秆、农膜资源化利用,加强 种养结合和农牧循环[51]。农村生活污水和农村生活 垃圾TP污染负荷的空间差异主要与各地区人口有 关。城市化进程的不断推进使得隶属于成都市的新 都区和龙泉驿区以及彭州市人口增加,生活用水量增 大,TP污染负荷增加(图5a和图5b)。农田径流和农 田固废的TP污染负荷主要与化肥和农药的不合理使 用以及农业生产固体废弃物的低效率处理有关。减 征或免征农业税政策的实施使得农户种粮积极性高 涨,粮食及经济作物产量增加,同时农药化肥使用量 和农作物固体废弃物增加,使得TP污染负荷将增加, 这种变化在沱江中游地区尤为明显(图5c和图5d)。 畜禽养殖TP污染负荷的差异性分布与其各地区畜禽 种类和数量密切相关(图5e)。

4.2 各污染源 TP 污染负荷空间集聚特征

农村生活污水和农村生活垃圾TP污染负荷修正 后,较高、较低污染风险区县数量将增加,高污染风险 区县将消失(图 6a 和图 6b),这与修正的排污系数法 基于每个区县人口与整个流域人口的比例重新分配 污染负荷有关。修正后农村人口较多区县的TP污染 负荷将增加,人口较少的区县TP污染负荷将减少。 农田径流TP污染负荷修正后,较高、较低污染风险区 县数量均将减少,农田固废TP污染负荷较高污染风 险区县数量将减少,较低污染风险区县数量将增加 (图 6c 和图 6d),这与修正的排污系数法基于各区县农 业GDP与整个流域总农业GDP的比例重新分配各区 县的这两种污染源TP污染负荷有关,修正后农业GDP 值较高区县的TP污染负荷将增加,较少区县的TP污 染负荷将减少。畜禽养殖TP污染负荷修正后较高、较 低污染风险区县均将减少(图 6e),这与修正的排污系 数法基于各区县牧业GDP与整个流域牧业GDP的比 例重新分配各区县TP污染负荷有关,修正后牧业GDP 较高区县的TP污染负荷将增加,较少的TP污染负荷 将减少。

基于以上结论,就不同污染风险等级区县而言,较高污染风险区县及其周围区县的TP污染负荷均处于较高水平,因此,未来地方政府应采取一系列强有力的污染防治措施以减缓当地TP污染,遏制高污染负荷区县的扩散,例如完善农村地区地下水管网设

施,建立农村生活垃圾收集、运输和处理系统;优化农业种植模式,减少农药化肥的施用量;提高畜禽养殖废弃物的处理效率等。高污染风险区县TP污染负荷高,而其周围区县低,因此未来高污染风险区县可以经济补偿的方式将部分污染物转移到邻近污染负荷较低的区县。低污染风险区县TP污染负荷低,易于受到邻近TP污染负荷较高区县溢出效应的影响,因此今后决策者应加强低污染风险区县污染治理,密切关注邻近区县污染负荷发展动向,防止其污染负荷反向溢流。较低污染风险区县及其周围区县TP污染负荷较低,建议该地区实施"预测为主,治理为辅"的治理政策,使其污染负荷稳于较低水平。

综上所述,本研究提出的基于社会-经济因子修正的流域污染负荷预测框架,结构简单、计算方便,有效降低了各污染源产污系数时空变化对预测结果的影响,凸显出不同行政单元之间TP污染负荷的空间异质性,可以推广到其他流域类似的污染负荷时空变化趋势研究,拓展了流域污染负荷预测的研究范畴。但本研究中排污系数法的参数取值部分是通过查阅文献获得,在今后的研究中,应尽量结合现场调研与试验,获取更为准确的参数值,以提高预测精度,从而为水环境污染的预防和管理提供正确方向。

5 结论

(1)沱江流域TP污染负荷总体呈逐年递增的趋势,由2021年的12 194.92 t增加至2025年的12 461.26 t,将增加266.34 t,增幅为2.18%。农村生活污水、农村生活垃圾和畜禽养殖的TP污染负荷呈逐年递减的趋势,将分别减少94.24、77.90 t和86.52 t,降幅分别为16.92%、16.92%和1.10%;农田径流和农田固废的TP污染负荷呈逐年递增的趋势,将分别增加74.52 t和450.49 t,增幅为4.82%和19.64%。各污染源TP污染负荷贡献率将表现为:畜禽养殖>农田固废>农田径流>农村生活污水>农村生活垃圾。

(2)2017年,农村生活污水、农村生活垃圾TP污染负荷较高的区县均位于中游的仁寿县、资中县和安岳县以及下游的泸县,2025年,较高的区县将位于上游的新都区和龙泉驿区;2017年,农田径流TP污染负荷较高的区县位于中游的安岳县,2025年,较高的区县将位于中游的安岳县和下游的荣县和江阳区;2017年中游安岳县的农田固废TP污染负荷较高,2025年中游的安岳县和东兴区以及下游的泸县和荣县的农田固废TP污染负荷将较高;2017年,畜禽养殖TP污

染负荷较高的区县位于中游的安岳县和下游的泸县, 2025年较高的区县将位于中游的仁寿县和安岳县以 及下游的荣县、泸县和江阳区。

(3)2025年修正前后各污染源TP污染负荷集聚 区域分布差异显著。农村生活污水和农村生活垃圾 TP污染负荷修正后较高、较低污染风险区县数量将 增加,高污染风险区县将消失;农田径流TP污染负荷 修正后较高、较低污染风险区县数量均将减少;农田 固废TP污染负荷修正后较高污染风险区县数量将减 少,较低污染风险区县数量将增加:畜禽养殖TP污染 负荷修正后较高、较低污染风险区县均将减少。

参考文献:

- [1] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 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. Spatio-temporal 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.
- [2] 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): 88-92, 97. HE C S, FU B J, CHEN L D. Non-point source pollution control and management[J]. Environmental Science, 1998, 19(5):88-92, 97.
- [3] 马恩朴, 蔡建明, 林静, 等. 近30年中国农业源氮磷排放的格局特 征与水环境影响[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3):752-770. MA E P, CAI J M, LIN J, et al. Spatial pattern and water environmental impact of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural sources in China in recent 30 years[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36 (3):752-770.
- [4] 刘菊, 傅斌, 王玉宽, 等. 四川山区农村面源污染负荷估算与评价 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 218-225. LIU J, FU B, WANG Y K, et al. Estimation and evaluation of non-point source pollutants loads in mountainous area of Sichuan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(24):218-225.
- [5] 李悦昭, 陈海洋, 孙文超. 白洋淀流域氮、磷、COD负荷估算及来源 解析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 366-376. LIYZ, CHEN H Y, SUN W C. Load estimation and source apportionment of nitrogen, phosphorus and COD in the basin of Lake Baiyang[J]. China Environmental Science, 2021, 41(1):366-376.
- [6] 熊昭昭, 王书月, 童雨, 等. 江西省农业面源污染时空特征及污染风 险分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2821-2828. XIONG Z Z, WANG S Y, TONG Y, et al. Analysis on spatio-temporal characteristics of agricultural non-point sources pollution and pollution risk in Jiangxi Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12):2821-2828.
- [7] 李舒, 李家科, 郝改瑞. 陕西省丹汉江流域非点源污染负荷估算及 评价[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(增刊2): 243-249. LIS, LIJ K, HAO G R. Estimation and evaluation of non-point source pollution load in Dan-Han River basin, Shaanxi Province[J]. Environmental Sci-

- ence & Technology, 2020, 43(Suppl 2):243-249.
- [8] 段华平. 农业非点源污染控制区划方法及其应用研究[D]. 南京:南 京农业大学, 2010. DUAN H P. Regionalization method and its application of non-point source pollution control[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [9] 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控 制对策[J]. 环境科学, 2018, 39(1):77-88. CHEN X K, LIU X B, PENG W O, et al. Estimation of and control strategies for pollution loads from non-point sources in the Chenghai watershed[J]. Environmental Science, 2018, 39(1):77-88.
- [10] 胡芸芸, 王永东, 李廷轩, 等. 沱江流域农业面源污染排放特征解 析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3654-3665. HU Y Y, WANG Y D, LI T X, et al. Characteristics analysis of agricultural non-point source pollution on Tuojiang River basin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18):3654-3665.
- [11] 杜娟, 赵湘璧, 李怀恩. 流域非点源污染负荷估算模型的研究[J]. 价值工程, 2015, 34(25): 247-248. DU J, ZHAO X B, LI H E. Research of non-point source pollution loads estimation models in watershed[J]. Value Engineering, 2015, 34(25):247-248.
- [12] 洪小康, 李怀恩. 水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应 用[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(4): 384-386. HONG X K, LI H E. Correlation method of water quality and quantity and its application to load estimation of non-point source pollution[J]. Journal of Xi' an University of Technology, 2000, 16(4):384-386.
- [13] 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 nonpoint source in Baoxianghe watershed based, Yunnan Province on improved export coefficient model[J]. China Environmental Science, 2015, 35(8):2400-2408.
- [14] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科 学学报, 2000, 20(4): 397-400. LI H E. Mean concentration method for estimation of non-point source load and its application[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(4):397-400.
- [15] IERODIACONOU D, LAURENSON L, LEBLANC M, et al. The consequences of land use change on nutrient exports: A regional scale assessment in south-west Victoria, Australia[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 74(4):305-316.
- [16] 张玉斌, 郑粉莉. ANSWERS 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11 (4): 165-168. ZHANG Y B, ZHENG F L. ANSWERS model and its application[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4):165-168.
- [17] 杨旭. 基于BASINS模型系统的青龙河流域水质模拟[J]. 黑龙江水 利科技, 2020, 48(11):47-51, 106. YANG X. Water quality simulation of Qinglong River basin based on basins model system[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48 (11): 47-51, 106
- [18] 杜娟, 李怀恩, 赵湘璧, 等. 基于SWAT模型的渭河流域污染控制 效果模拟[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4):563-569. DU J, LI H E, ZHAO X B, et al. Simulation of pollution control effect in the Weihe River valley with SWAT model[J]. Journal of Ecology and Ru-

REA

ral Environment, 2016, 32(4):563-569.

- [19] 田耀武, 黄志霖, 肖文发. 基于 Ann AGNPS 模型的三峡库区秭归县 非点源污染输出评价[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4568-4578. TIAN Y W, HUANG Z L, XIAO W F. Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges reservoir area using the AnnAGNPS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16):4568-4578.
- [20] 王刚, 李兆富, 万荣荣, 等. 基于多元统计分析方法的西苕溪流域 水质时空变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1797-1803. WANG G, LI Z F, WAN R R, et al. Analysis of temporal and spatial variations in water quality of Xitiaoxi watershed using multivariate statistical techniques[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(9):1797-1803.
- [21] 邓春梅, 李玉萍, 李茂芬, 等. 基于GIS的海南省农业面源污染时 空分异研究[J]. 南方农业学报, 2020, 51(10): 2580-2587. DENG C M, LI Y P, LI M F, et al. Spatio-temporal variation of agriculture non-point source pollution based on GIS technology in Hainan Province[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(10):2580-2587.
- [22] 萧凌波. 基于核密度估计的清代中国自然灾害时空分布特征[J]. 灾害学, 2019, 34(4):92-99. XIAO L B. Spatio-temporal distribution of natural disasters in China during 1644-1911 based on kernel density estimation[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4):92 -99.
- [23] 钟定胜, 张宏伟. 等标污染负荷法评价污染源对水环境的影响[J]. 中国给水排水, 2005, 21(5):101-103. ZHONG D S, ZHANG H W. Equal standard pollution load method for evaluating the effect of pollution source on aquatic environment[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(5):101-103.
- [24] 秦延文, 马迎群. 沱江上游(德阳段)磷污染特征及影响因素分析 [J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(8):15-18. QIN Y W, MA Y Q. Characteristics and effecting factors of phosphorus pollution in upstream of Tuojiang River (Deyang section) [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(8):15-18.
- [25] 肖宇婷, 姚婧, 谌书, 等. 沱江流域总氮面源污染负荷时空演变[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3773-3784. XIAO YT, YAO J, CHEN S, et al. Temporal and spatial evolution of non-point source pollution load of total nitrogen in Tuojiang River basin[J]. Environmental Science, 2021, 42(8):3773-3784.
- [26] 许静, 王永桂, 陈岩, 等. 长江上游沱江流域地表水环境质量时空 变化特征[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1937-1947. XU J, WANG Y G, CHEN Y, et al. Characteristics on spatio-temporal variations of surface water environmental quality in Tuojiang River in upper reaches of Yangtze River basin[J]. Earth Science, 2020, 45(6):1937-1947.
- [27] 杨国华, 颜艳, 杨慧中. GM(1,1)灰色预测模型的改进与应用[J]. 南京理工大学学报, 2020, 44(5):575-582. YANG GH, YAN Y, YANG H Z. Application of improved GM(1, 1) grey prediction model [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44 (5).575-582
- [28] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R]. 北京:中国 环境规划院, 2003. Chinese Academy of Environmental Planning. National water environmental capacity verification manual[R]. Bei-

- jing: Chinese Academy of Environmental Planning, 2003.
- [29] 住房与城乡建设部. 西南地区农村生活污水处理技术指南[R]. 北 京:住房与城乡建设部, 2010. Ministry of Housing and Urban Rural Development. Technical guide for rural domestic sewage treatment in southwest China[R]. Beijing: Ministry of Housing and Urban Rural Development, 2010.
- [30] 国家环保总局. 主要水污染物总量分配指导意见[M]. 北京:中国 环境科学出版社, 2006. State Environmental Protection Administration. Guidance on total amount allocation of major water pollutants [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [31] 钱秀红, 徐建民, 施加春, 等. 杭嘉湖水网平原农业非点源污染的 综合调查和评价[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28 (2):31-34. QIAN X H, XU J M, SHI J C, et al. Comprehensive survey and evaluation of agricultural non - point source pollution in Hang-Jia-Hu water-net plain[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2002, 28(2):31-34.
- [32] 韩智勇, 费勇强, 刘丹, 等. 中国农村生活垃圾的产生量与物理特 性分析及处理建议[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15):1-14. HAN Z Y, FEI Y Q, LIU D, et al. Yield and physical characteristics analysis of domestic waste in rural areas of China and its disposal proposal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15):1-14.
- [33] 岳波, 张志彬, 孙英杰, 等. 我国农村生活垃圾的产生特征研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(6): 129-134. YUE B, ZHANG ZB, SUN Y J, et al. Characteristics of rural household solid wastes in China[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(6):129-134.
- [34] 王志国. 基于 GIS 技术的农村生活垃圾收集布点方法研究[D]. 哈 尔滨:东北林业大学, 2013. WANG Z G. Research of the rural domestic refuse collection point distribution based on GIS technology [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [35] 李杰霞, 杨志敏, 陈庆华, 等. 重庆市农业面源污染负荷的空间分 布特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(7):145-151. LI J X, YANG Z M, CHEN Q H, et al. Spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2008, 30 (7): 145-151.
- [36] 张鹏远, 苟楚璇, 巫杨, 等. 四川凯江流域农村非点源污染特征分 析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 398-404. ZHANG PY, GOU C X, WU Y, et al. Characteristics of rural non-point source pollution in Kaijiang basin of Sichuan Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(5):398-404.
- [37] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87-91. HAN L J, YAN Q J, LIU X Y, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(3):
- [38] 李茂松, 汪亚峰. 近20年中国主要农作物秸秆资源动态及现状 [C]//全国农业面源污染与综合防治学术研讨会论文集. 北京:中 国农学会, 2004:151-154. LI M S, WANG Y F. Quantity and Distributing of mostly crop straw in our country[C]//Proceedings of the National Symposium on Agricultural Non-point Source Pollution and

- Comprehensive Prevention and Control. Beijing; China Association of Agricultural Science Society, 2004; 151-154.
- [39] 赖斯芸, 杜鵬飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(9):1184-1187. LAISY, DUPF, CHENJN. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(9):1184-1187.
- [40] 李占斌, 张秦岭, 李鹏, 等. 丹汉江流域水土流失非点源污染过程与调控研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017. LI Z B, ZHANG Q L, LI P, et al. Study on the process and regulation of non-point source pollution of soil erosion in Danhan River basin[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [41] 国家环保总局. 关于减免家禽业排污费等有关问题的通知[R]. 北京: 国家环保总局, 2004. State Environmental Protection Administration. Notice on reduction and exemption of sewage charges for poultry industry[R]. Beijing: State Environmental Protection Administration, 2004.
- [42] 郭珊珊, 张涵, 杨汝馨. 基于耕地承载力的畜禽养殖污染负荷及环境风险研究——以四川省为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 226-232. GUO S S, ZHANG H, YANG R X. Pollutant loads and environmental risks of livestock production based on arable land carrying capacity: A case study in Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1):226-232.
- [43] XU R H, CAI Y P, WANG X, et al. Agricultural nitrogen flow in a reservoir watershed and its implications for water pollution mitigation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267:122034.
- [44] CHEN L, XU J J, WANG G B, et al. Influence of rainfall data scarcity on non-point source pollution prediction: Implications for physically based models[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562:1–16.
- [45] SHEN Z Y, HONG Q, YU H, et al. Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(8):1971-1978.
- [46] 陈斐, 杜道生. 空间统计分析与 GIS 在区域经济分析中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(4): 391-396. CHEN F,

- DU D S. Application of the integration of spatial statistical analysis with GIS to the analysis of regional economy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(4):391–396.
- [47] POUDYAL N C, ELKINS D, NIBBELINK N, et al. An exploratory spatial analysis of projected hotspots of population growth, natural land loss, and climate change in the conterminous United States[J]. Land Use Policy, 2016, 51:325-334.
- [48] 肖宇婷, 谌书, 樊敏. 沱江流域污染负荷时空变化特征研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1981-1995. XIAO Y T, CHEN S, FAN M. Temporally and spatially varied characteristics of pollution load in Tuojiang River basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 1981-1995.
- [49] 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1):288-292. PENG L, WANG D Y. Estimation of annual quantity of total excretion from livestock and poultry in Chongqing Municipality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1):288-292.
- [50] 肖新成, 倪九派, 何丙辉, 等. 三峡库区重庆段农业面源污染负荷的区域分异与预测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 634-646. XIAO X C, NI J P, HE B H, et al. Estimation of agricultural nonpoint source pollution loads and its regional differentiation in Chongqing section of the Three Gorges reservoir region[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(4): 634-646.
- [51] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 等. 基于"压力—响应"态势的重庆市农业面源污染的源解析[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2362-2369. CHEN Y C, YANG Z M, CHEN Q H, et al. Source apportionment of agricultural non-point source pollution in Chongqing based on pressure-response system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(8): 2362-2369.
- [52] 杜明, 柳强, 罗彬, 等. 岷、沱江流域水环境质量现状评价及分析 [J]. 四川环境, 2016, 35(5): 20-25. DU M, LIU Q, LUO B, et al. Evaluation and analysis of present water environment quality of Minjiang & Tuojiang River basins[J]. Sichuan Environment, 2016, 35(5): 20-25.

(责任编辑:宋潇)