

苟 婷,裴德富,梁荣昌,等.基于输出系数法的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 R C, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources based on improved output coefficient method [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6539~6550.

基于输出系数法的农业面源氮磷排放特征分析

苟 婷¹,裴德富^{1,2},梁荣昌¹,余 磊¹,杨 琰³,马千里¹,赵学敏¹,赵 瑞¹,姚玲爱^{1*} (1.生态环境部华南环境科学研究所(生态环境部生态环境应急研究所),广东 广州 510535; 2.沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168; 3.太原师范学院经济与管理学院,山西 晋中 030619)

摘要:为研究东江源头区农业面源氮磷负荷情况,利用改进的输出系数模型(ECM)对2020年东江源头区农业面源氮磷排放特征进行了探讨。结果表明:(1)东江源头区农业面源污染物总氮(TN)和总磷(TP)负荷量分别是4884.23t/a和591.85t/a,TN污染负荷是TP污染负荷的8.25倍,其中高于源头区TN平均负荷量的乡镇依次为留车镇、文峰乡、晨光镇、南桥镇、吉潭镇、丹溪乡和澄江镇,高于源头区TP平均负荷量的乡镇依次为晨光镇、留车镇、南桥镇、文峰乡、丹溪乡、菖蒲乡和吉潭镇。(2)氮磷污染负荷强度与负荷量不同,且表现出一定的空间差异性。污染负荷量较高分别为留车镇和晨光镇,但负荷强度最高分别为南桥镇和菖蒲乡。TN负荷强度较高的依次为南桥镇、菖蒲乡、晨光镇、留车镇和项山乡,均高于源头区TN平均负荷强度2.88t/(km²·a);TP负荷强度较高的依次为菖蒲乡、南桥镇、晨光镇、丹溪乡、留车镇和罗珊乡,均高于源头区TP平均负荷强度0.36t/(km²·a)。(3)不同污染源类型对氮磷排放的贡献率不一致,TN污染表现为土地利用>农村生活>畜禽养殖,TP污染表现为畜禽养殖>土地利用>农村生活。其中氮源中土地利用污染占比为37.67%~80.29%,主要分布在长宁镇、桂竹帽镇、三标乡、水源乡、文峰乡等;磷源中畜禽养殖污染占比44.75%~70.71%,主要分布在菖蒲乡、晨光镇、罗珊乡、南桥镇、丹溪乡、龙廷乡和留车镇。东江源头区各乡镇氮磷面源污染特征不同,其治理手段和目标也不尽相同,对于菖蒲乡、晨光镇、南桥镇等需切实解决畜禽养殖规划性不强,部分养殖户选址不合理,粪污治理设施普及率和资源化利用水平低等问题;对于留车镇、澄江镇、吉潭镇等应大力推进小型农村污水处理设施建设,完善生活污水处理措施;对于文峰乡、三标乡、水源乡等乡镇需制定合理的施肥方案,避免化肥过量施用及利用率低的问题。

关键词: 改进输出系数法; 农业面源污染负荷; 畜禽养殖源; 农村生活源; 土地利用类型

中图分类号: X501 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)12-6539-12

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2023.0212

Analysis of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources based on improved output coefficient method. GOU Ting¹, PEI De-fu^{1,2}, LIANG Rong-chang¹, SHE Lei¹, YANG Jun³, MA Qian-li¹, ZHAO Xue-min¹, ZHAO Rui¹, YAO Ling-ai^{1*} (1.South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment (Research Institute of Eco-environmental Emergency, Ministry of Ecology and Environment), Guangzhou 510535, China; 2.School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang University of Architecture, Shenyang 110168, China; 3.School of Economics and management, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6539~6550

Abstract: To study the nitrogen and phosphorus loadings from agricultural surface sources in the source area of Dongjiang River, the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural surface sources in the source area of Dongjiang River in 2020 were explored using an improved output coefficient model (ECM). The results show that: (1) the loads of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of agricultural surface source pollutants in the source area of Dongjiang River were 4884.23t/a and 591.85t/a, respectively, and the TN pollution load was 8.25 times of the TP pollution load. Among the townships with higher than the average TN load were Liuche Township, Wenfeng Township, Chenguang Township, Nanqiao Township, Jitan Township, Danxi Township and Chengjiang Township, higher than the TP average load of the township were Chenguang, Liuche Township, Nanqiao Township, Wenfeng Township, Danxi Township, Calamus Township and Jitan Township. (2) Nitrogen and phosphorus pollution load intensity and load amount was different, and showed spatial variability. The higher pollution load was Liuche Township and Chenguang Township respectively, but the highest load intensity was Nanqiao Township and Calamus Township respectively. The higher TN load intensity was in the order of Nanqiao Township, Calamus Township, Chenguang Township, Liuche Township and Xiangshan Township, which all higher than the average TN load intensity of 2.88t/(km²·a) in the source area; the higher TP load intensity was in the order of Calamus Township, Nanqiao Township, Chenguang Township, Danxi Township, Liuche Township and Luoshan

收稿日期: 2023-04-19

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B110205004);国家自然科学基金资助项目(41977353);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-202204-075)

* 责任作者, 高级工程师, yaolingai@scies.org

Township, which all higher than the source area TP average load intensity of $0.36t/(km^2\cdot a)$. (3) The contribution of different source types to nitrogen and phosphorus emissions was not consistent, TN pollution was manifested as land use > rural life > livestock breeding, TP pollution was manifested as livestock breeding > land use > rural life. Among the nitrogen sources, land use pollution accounted for 37.67%~80.29%, mainly distributed in Changning Township, Guizhumat Township, Sanbiao Township, Water Source Township, Wenfeng Township; phosphorus sources of livestock breeding pollution accounted for 44.75%~70.71%, mainly distributed in Calamus Township, Chenguang Township, Luoshan Township, Nanqiao Township, Danxi Township, Longting Township and Liuche Township. Based on different characteristics of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in the source area of Dongjiang River, the treatment methods were also different. For the townships were seriously polluted by livestock breeding, which should solve the problems of poor planning of livestock breeding, unreasonable site selection and low level of resource utilization. The townships were seriously polluted by rural living pollution which should vigorously promote the construction of small rural sewage treatment facilities and improve the living sewage treatment measures. Other townships need to develop a reasonable fertilizer application program to avoid excessive application of chemical fertilizers. This study has important practical significance for improving the continuous emission reduction of agricultural non-point source pollution and ensuring the safety of water supply in Dongjiang River.

Key words: improved output coefficient method; agricultural non-point source pollution; livestock breeding sources; rural living sources; land use types

随着人口快速增长及经济、工业迅猛发展,面源污染已成为水污染的重要来源,其中氮磷污染是面源污染的重要组成部分。同时,氮磷也是水生态系统必需的生源要素,过量的氮磷污染会导致水体富营养化加剧和藻类水华频发,威胁流域水生态安全。据报道,美国的面源污染占污染总量的2/3,其中农业面源污染贡献率占68%~83%^[1]。荷兰的农业面源污染产生的氮、磷污染分别占水污染总负荷的60%和40%~50%^[2]。在我国,氮、磷污染占水污染的比例已分别达到81%和93%^[3]。2020年《第二次全国污染源普查公报》显示,农业面源对水体氮、磷的贡献率分别高达46.5%和67.2%,且农业面源污染没有固定的排污口,具有分散性、隐蔽性、累积性和模糊性等特性^[4]。因此,准确掌握氮磷污染空间分布特征及污染物来源成为治理面源污染的关键技术难题^[5]。

目前研究面源污染最普遍的方法是Johnes^[6]等提出的输出系数模型法(ECM),它是通过一种“黑箱”的方法来对污染物输入输出进行模拟,模型主要利用区域水文气象参数,通过多元线性相关分析建立土地利用类型与污染输出负荷之间的关系,再基于污染物输出系数,将不同类型污染源的污染负荷相加,估算流域面源污染负荷总量。但该模型仅适用于降雨均匀的平原地区,具有使用范围局限的弊端,需要对该模型进行改进。利用引入降雨因子和流域损失系数、以及坡度对径流流量和流速的影响的方法改进输出系数模型可以成功提高了污染负荷结果的精度^[7-9]。引入降雨、地形因子(α, β)估算西南喀

斯特山区的北盘江流域的农业面源污染,结果显示北盘江流域农业面源氮、磷污染负荷呈现分布不均的特质,污染负荷局部集中,坡度较高和人口密度大的区域负荷量较高^[10]。利用改进的输出系数模型对妫水河流域农业面源污染负荷进行估算,并且通过分区、分类、分期的三分法对结果进行阐释,表明改进输出系数模型精确度较高^[11]。以上研究通过对ECM的有效改进,推进了其在农业面源污染负荷估算方面的应用,同时也为其他地区更好的采用ECM核算农业面源污染负荷奠定了基础。

东江是广州、深圳、香港及惠州等粤港澳大湾区的重要供水水源,保障了约4600万人的饮水安全。东江源头区地处江西省赣州市寻乌县,以农业活动为主,源头区排水直接流入东江,不仅影响东江流域水质,而且威胁东江的供水安全。因此无论是从保障东江供水安全的重要性,还是从东江源头区农业发展的生态经济性角度考虑,开展东江源头区的面源污染问题研究均显得尤为必要。但目前关于东江源头区面源污染仍没有相关的研究。因此,本研究通过收集东江源头区各乡镇的人口、畜禽养殖、土地利用和降雨量等数据,采用改进的ECM模型研究东江源头区氮磷污染问题,有助于准确掌握该地区氮磷面源污染分布特征,进而提出有效的面源污染防治对策。本研究对合理调整东江源头区农业结构布局、保障东江供水安全及促进粤港澳大湾区的经济繁荣与民生稳定具有重要的科学意义和社会价值。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

东江源头区位于江西省东南端寻乌县($115^{\circ}21'22''\sim115^{\circ}54'25''E, 24^{\circ}30'40''\sim25^{\circ}12'10''N$),居赣、闽、粤三省交界处。境内最大的水系是东江水系,流域面积 $1974km^2$,占全县流域总面积的83.7%。寻乌水是寻乌县唯一的主河,全长 $113.4km$,流域面积 $1744km^2$,占全县总面积的72.1%,流经三标乡、水源乡、澄江镇、吉潭镇、文峰乡、南桥镇、留车镇、龙廷乡8个乡(镇)。寻乌县东北、西北与东南部地势

高,且向西南部倾斜,地形以山地丘陵为主,仅沿河两岸呈狭小谷地,境内以山地为主,山地占总面积的75.62%。该地属于亚热带季风气候,温暖湿润,多年平均气温 $19.1^{\circ}C$,历年平均降雨量 $1605.7mm$ 。土壤主要是亚热带红壤区,土地肥力较好。土地利用类型主要有园地和耕地,园地以果园为主;耕地利用方式主要包括水田和旱地。

1.2 数据来源

本研究数据主要来自寻乌县数字高程模型(DEM)、2013~2020年的气象数据、2020年的土地利用和社会经济数据,如表1所列。

表1 研究数据及其来源

Table 1 Research data and its sources

数据类型	分辨率/比例/覆盖范围	用途	来源
DEM	$30m \times 30m$	地形影响分析	地理空间数据云
气象数据	寻乌县斗晏电站逐日降雨量数据(2013~2020年)	降水影响分析	水务局
土地利用	1:250000	土地利用类型(2020)	SPOT 卫星遥感数据解译
社会经济数据	寻乌县	农村生活、畜禽养殖污染计算分析	寻乌县统计年鉴

1.3 研究方法

1.3.1 输出系数模型 (1)改进的 ECM 模型综合考虑降雨和地形的影响对东江源头区面源氮磷输出进行模拟,具体公式如下:

$$L_i = \alpha\beta \sum_{j=1}^n E_{ij} A_j \quad (1)$$

式中: L_i 为第*i*种污染物的输出量, $kg/(hm^2 \cdot a)$; α 为降雨因子; β 为地形影响因子; E_{ij} 为第*i*种污染物第*j*个污染源的输出系数, $kg/(hm^2 \cdot a)$, $kg/(人 \cdot a)$ 或 $kg/(只 \cdot a)$; A_j 为流域中第*j*种土地利用类型的面积(hm^2)、畜禽养殖数量(头)或人口数量(人)。

(2)降雨因子取值主要通过降水的年际分布差异与空间分布差异共同确定,且流域年降雨量*r*与面源污染氮磷负荷*L*存在一定的相关关系^[12~13],可表达为:

$$\alpha = \frac{f(r)}{f(\bar{r})} \times \frac{r_j}{\bar{r}} = \frac{L}{\bar{L}} \times \frac{r_j}{\bar{r}} \quad (2)$$

式中: \bar{r} 为流域年平均降雨量, mm ; r_j 为第*j*年的降雨量, mm ; L 为流域污染物的面源污染负荷, kg ; \bar{L} 为污染物多年平均面源污染负荷的平均值, kg 。

考虑到缺少流域内污染物入河的监测数据,参考高田田等^[14]在巢湖烔炀河流域的研究成果,建立东江源头区降雨量*r*与污染负荷*L*之间的关系:

$$L_{TN}=0.0993r^2+9.503r+216.8, (R^2=0.86; P<0.05) \quad (3)$$

$$L_{TP}=0.01146r^2+0.3498r-16.69, (R^2=0.98; P<0.05) \quad (4)$$

根据2013~2020年降雨数据得到东江源头区多年平均降雨量为 $562.0mm$,由式(2)~(4)计算分析可以得出东江流域2020年TN的降雨影响因子为4.52、TP降水影响因子为4.54。

(3)地形影响因子 β 主要是通过影响径流量的大小来改变面源TN和TP污染的输出量^[8],其计算公式如下:

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

式中: θ_j 为研究区域内第*j*个空间单元坡度,(°); $\bar{\theta}$ 为整个研究区域的平均坡度,(°); c 、 d 为常数。参考相关文献[13] d 取值为0.6104,根据东江源头区DEM数据,采用ArcGis中坡度分析功能计算出东江源头区平均坡度为10.6899,由式(6)可以得出东江源头区地形影响因子 β 主要表达式如下:

$$\beta = \frac{\theta_j^{0.6104}}{10.6899^{0.6104}} \quad (6)$$

通过计算得到东江源头区地形影响因子为0.68~1.32。如图1所示,整体呈现流域坡度四周高中间低的趋势,这与流域四周多以山地丘陵为主地势较高,仅沿河两岸呈狭小谷地的现状吻合。

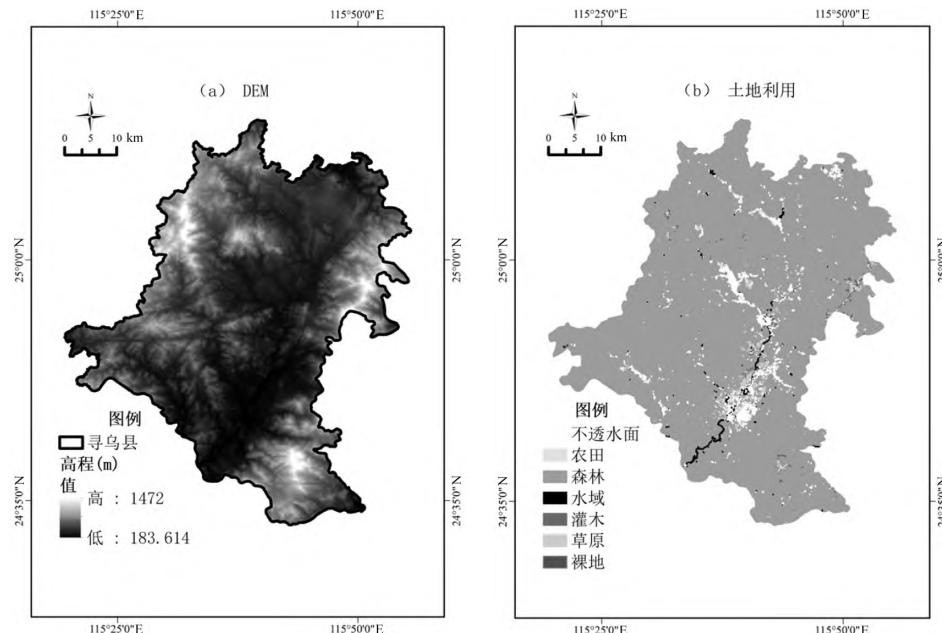


图1 东江源头区DEM(a)和土地利用图(b)

Fig.1 DEM (a) and land use type (b) of the Dongjiang River catchment

1.3.2 模型参数的确定 (1)基础数据的获取.由于东江源头区寻乌水流域面积占全县总面积的72.1%,考虑到数据资料的限制,本文在计算寻乌县的氮磷面源污染负荷基础上,使用面积修正法得

到东江源头区流域内的氮磷面源污染负荷.本次研究中农业面源污染源分为农村生活污染源、畜禽养殖污染源及土地利用污染源.具体结果如表2所示.

表2 东江源头区流域农村人口、牲畜数量及土地利用

Table 2 Rural population, livestock population and land use in the watershed of the source area of Dongjiang River

乡、镇	面积(km ²)	农村人口(10 ³ 人)	畜禽养殖(头/羽)				土地利用类型(km ²)				
			牛	羊	猪	家禽	耕地	林地	草地	水域	建设用地
菖蒲乡	80.11	14.78	70	0	6028	1600	12.69	65.81	0.00	0.30	0.00
晨光镇	183.21	26.71	193	0	7884	5100	23.37	157.80	0.00	0.56	0.00
澄江镇	180.71	30.77	46	335	1135	610	27.26	151.28	0.01	1.27	0.00
丹溪乡	163.79	14.59	0	300	4200	0	9.10	151.82	0.33	0.13	0.00
桂竹帽镇	232.97	12.07	0	0	35	600	8.32	222.46	0.02	0.15	0.00
吉潭镇	249.72	26.16	104	364	180	2052	31.59	214.77	0.23	0.56	0.01
留车镇	230.88	32.08	150	0	4679	3342	42.36	183.35	0.29	3.59	0.00
龙廷乡	77.04	3.53	0	0	1494	0	5.90	69.41	0.00	0.72	0.00
罗珊乡	128.63	10.01	0	0	3970	0	8.66	118.23	0.00	0.51	0.00
南桥镇	143.52	31.55	949	99	1559	11355	41.73	97.83	0.82	2.64	0.02
三标乡	212.38	12.78	0	0	0	0	9.28	201.27	0.11	0.20	0.00
水源乡	112.76	10.82	0	0	0	0	10.34	101.65	0.01	0.39	0.00
文峰乡	262.50	27.51	40	0	3083	4000	49.39	221.36	1.15	7.19	0.54
项山乡	74.66	6.66	117	402	0	0	4.67	68.51	0.36	0.08	0.00
长宁镇	18.68	1.19	0	0	0	2900	4.60	10.73	0.09	3.18	0.00

(2)土地利用输出系数的确定一般可采用研究试验或文献调研的方法确定^[14-15].Beaulac等^[16]和Frink^[17]通过调查不同土地利用方式下氮磷输出系数的变化范围,取其平均值作为所研究流域的输出

系数.由于缺乏研究区域的输出系数试验数据,因此本文中寻乌县各种土地利用类型的输出系数,参考国内相似自然条件下的其他地区的研究结果而取其平均值确定^[10,13,18-26].不同土地利用类型的参考

输出系数和取值结果见表 3.

表 3 不同土地利用类型的输出系数取值[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]

Table 3 Output coefficients for various types of land utilization [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]

研究区域	污染物	土地利用类型					文献来源
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	
张家口市清水河流域	TN	16.85	3.02	6.67	15.00	11.84	[18]
	TP	1.69	0.34	0.58	0.36	0.50	
东北地区嫩江流域	TN	13.03	4.22	6.30	15.00	11.00	[19]
	TP	1.61	0.72	0.59	3.60	0.24	
贵州红枫湖保护区流域	TN	2.90	0.25	1.05	—	1.21	[20]
	TP	0.18	0.03	0.04	—	0.03	
四川射洪县	TN	2.60	0.24	1.13	1.10	1.61	[21]
	TP	0.10	0.05	0.02	1.22	0.11	
四川琼江流域	TN	2.90	0.24	1.00	—	—	[22]
	TP	0.09	0.02	0.02	—	—	
南四湖流域	TN	25.95	11.5	16.56	15	11	[23]
	TP	0.7	0.16	0.21	0.36	0.24	
云南洱海流域	TN	2.68	1.24	—	—	—	[24]
	TP	0.59	0.26	—	—	—	
长春地区	TN	11.20	4.22	6.30	—	3.24	[25]
	TP	1.54	0.59	0.72	—	0.10	
北京地区	TN	2.97	0.240	1.570	—	—	[26]
	TP	0.04	0.001	0.013	—	—	
巢湖流域	TN	29.00	3.27	10.0	17.33	11.00	[13]
	TP	0.60	0.15	0.20	1.18	0.51	
贵州北盘江流域	TN	2.32	0.25	0.60	1.10	1.30	[10]
	TP	0.16	0.02	0.07	0.02	0.05	
本研究取值	TN	10.22	2.61	5.12	10.76	6.53	本研究
	TP	0.66	0.21	0.25	1.12	0.22	

注: “-”表示无数据

(3) 畜禽养殖和农村生活面源污染物输出系数分别采用生态环境部发布的排泄系数和人口输出系数, 畜禽养殖业的总氮和总磷输出系数分别取为各自排泄系数的 10%^[2]. 其取值分别见表 4.

表 4 东江源头区流域畜禽养殖和农村生活污染输出系数

Table 4 Pollution output coefficient of livestock and poultry breeding and rural living in the source area of Dongjiang River

污染物	农村生活输出系数 [$\text{kg}/(\text{人}\cdot\text{a})$]	畜禽养殖输出系数 [$\text{kg}/(\text{头}\cdot\text{a})$]			
		牛	羊	猪	家禽
TN	1.58	61.10	2.30	4.50	0.28
TP	0.16	10.10	0.45	1.70	0.12

2 结果与分析

2.1 东江源头区氮磷负荷量

根据东江源头区 15 个乡镇的土地利用、畜禽养殖和农村生活 3 大类面源数据, 计算得出 TN 和 TP 污染负荷量, 结果见图 2 所示。源头区 TN 负荷量为 4884.23t/a, TP 负荷量为 591.85t/a, TN 负荷量是 TP 负荷量的 8.25 倍。TN 和 TP 负荷量分布呈现较大的空间差异性, 其中 TN 负荷量最高的乡镇为留车镇 771.43t/a, 贡献率为 11.39%, 其次为文峰乡 TN 负荷量为 759.97t/a, 贡献率为 11.22%, 此外 TN 负荷量较高的乡镇依次为晨光镇、南桥镇、吉潭镇、丹溪乡和澄江镇, 均高于源头区 TN 的平均负荷量 451.62t/a; 其他乡镇 TN 负荷量相对较低, 长宁镇负荷量最低为 41.80t/a, 贡献率为 0.62%。TP 负荷量最高的乡镇为晨光镇 119.38t/a, 贡献率为 14.54%; 其次为留车镇 TP 负荷量为 96.56t/a, 贡献率为 11.76%, TP 负荷量较高的乡镇依次为南桥镇、文峰乡、丹溪乡、菖蒲乡和吉潭镇, 均高于源头区 TP 负荷量的均值 54.72t/a, 其他乡镇 TP 负荷量相对较低, 负荷量最低为长宁镇 4.38t/a, 贡献率为 0.53%。

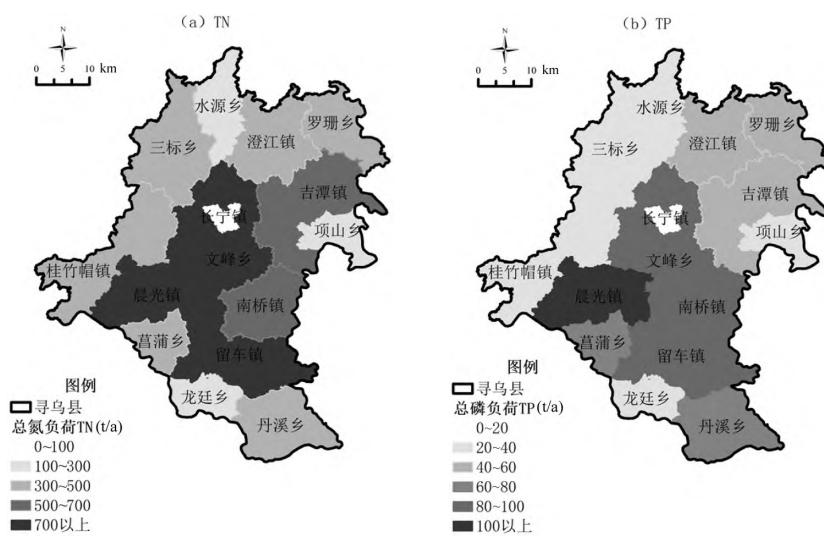


图 2 东江源头区农业面源污染输出负荷量分布

Fig.2 Distribution of agricultural non-point source pollution output load in the source area of Dongjiang River

2.2 东江源头区氮磷负荷强度

根据东江源头区 TN 和 TP 污染负荷强度的数据分析,农业面源污染的 TN 负荷强度大于 TP 负荷强度,前者是后者的 8.87 倍。各乡镇 TN 和 TP 负荷强度存在明显的空间差异性(图 3)。TN 负荷强度最高的乡镇为南桥镇,负荷强度为 $5.03\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,其他较高乡镇依次为菖蒲乡($4.38\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)、晨光镇($3.52\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)、留车镇($3.34\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)和项山乡($3.02\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$),均高于源头区 TN 平均负荷强度 $2.88\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,其他乡镇均低于源头区平均负荷强度,桂竹帽镇排放负荷强度最低为 $1.82\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。不同污染源类型中除菖蒲乡呈现畜禽养殖负荷强度最高外,其

他乡镇均呈现土地利用排放强度最高。

TP 负荷强度最高的乡镇为菖蒲乡,负荷强度为 $0.81\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,其他负荷强度较高的乡镇依次为南桥镇($0.63\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)、晨光镇($0.57\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)、丹溪乡($0.42\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)、留车镇($0.42\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$)和罗珊乡($0.39\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$),均高于源头区 TP 平均负荷强度 $0.36\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,其他乡镇均低于源头区平均负荷强度,负荷强度最低的为桂竹帽镇,负荷强度为 $0.16\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。不同污染源类型呈现部分乡镇的畜禽养殖强度较高,依次包括菖蒲乡、南桥镇、晨光镇、罗珊乡、丹溪乡和留车镇,其他乡镇则土地利用排放较高(图 4)。

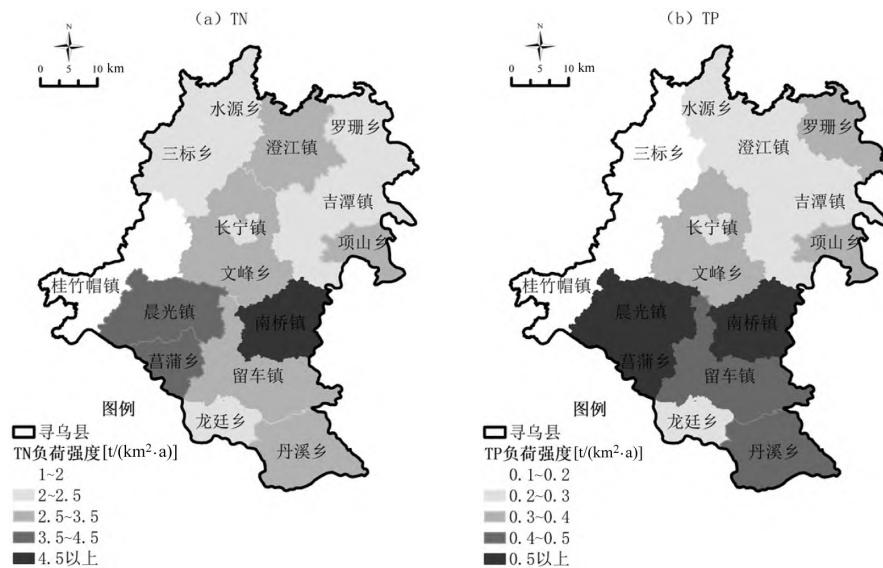


图 3 东江源头区各乡镇农业面源污染物总氮、总磷负荷强度

Fig.3 Load intensity of total nitrogen and phosphorus of agricultural non-point source pollutants in the source of Dongjiang River

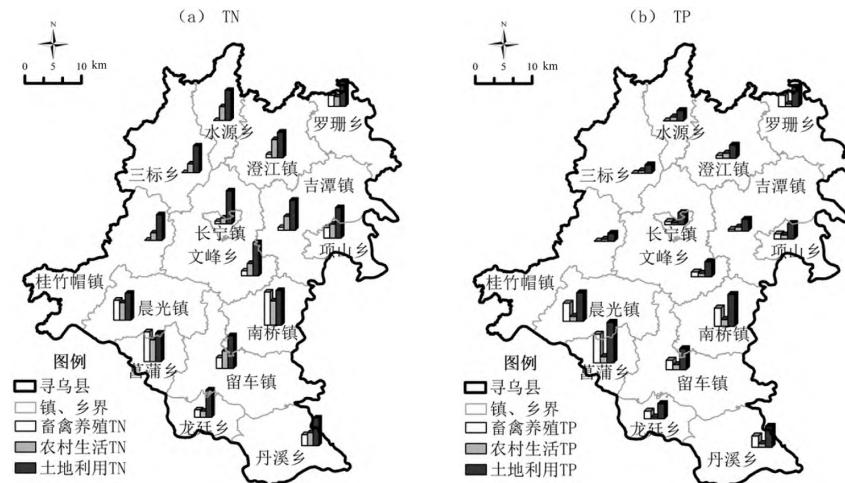


图 4 东江源头区各乡镇不同污染类型的总氮、总磷负荷强度

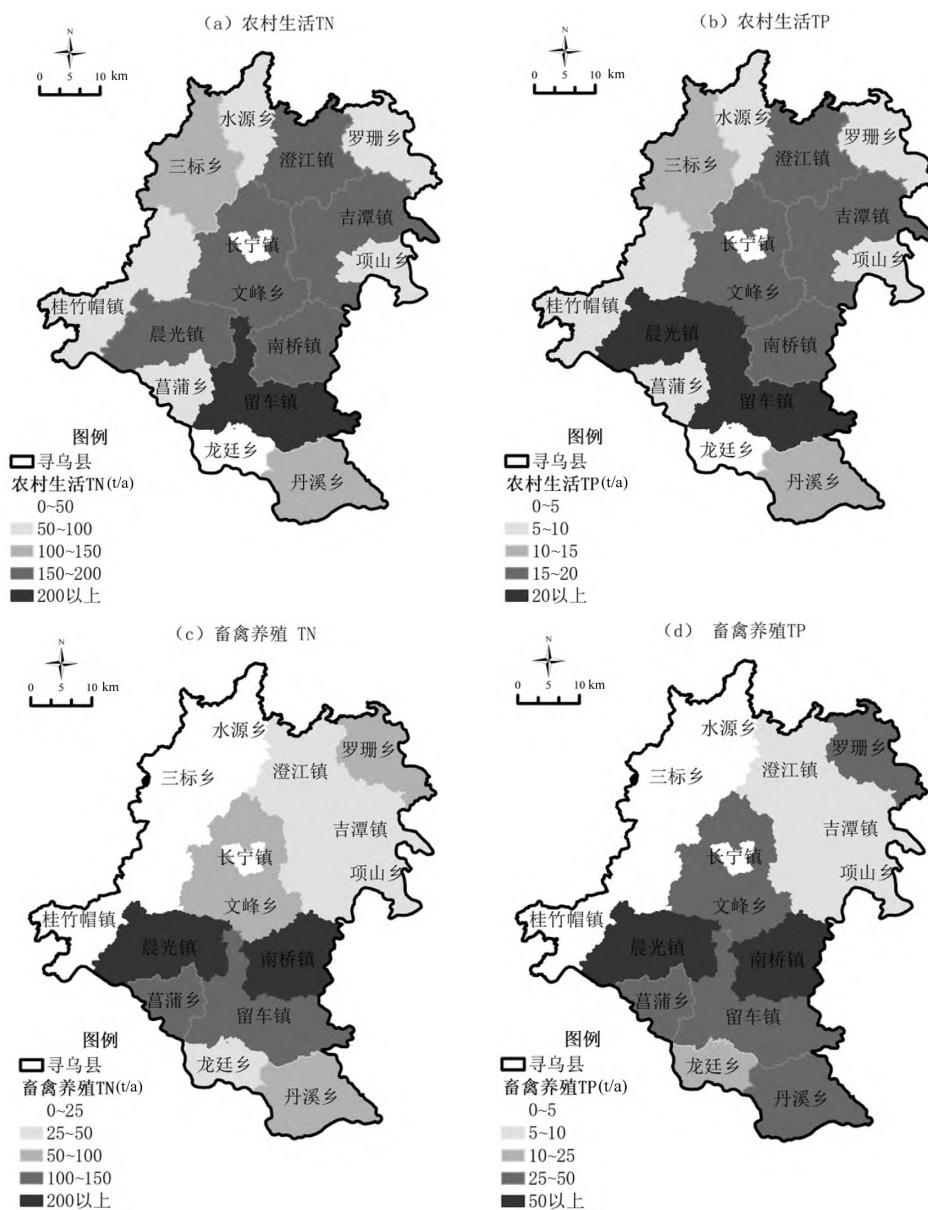
Fig.4 Load intensity of total nitrogen and total phosphorus of different pollution types in the area of Dongjiang River

2.3 不同污染源类型对氮磷污染的贡献率

东江源头区不同污染源类型对 TN 和 TP 负荷量的贡献情况如图 5 所示。污染源类型对 TN 的贡献率整体呈现土地利用>农村生活>畜禽养殖,且土地利用以耕地和林地为主。各乡镇污染源类型 TN 贡献率中,除菖蒲乡呈现为畜禽养殖(37.18%)>土地利用(35.56%)>农村生活(27.26%),其他乡镇均呈现为土地利用贡献率最大,占比在 37.67%~80.29%,其中南桥镇(36.06%)、晨光镇(31.10%)、罗珊乡(24.16%)和丹溪乡(21.32%)的畜禽养殖>农村生活,且南桥镇畜禽养殖以牛为主,其他乡镇以猪为主;其余 10 个乡镇则表现为农村生活>畜禽养殖,其中农村生活污染较严重的乡镇有澄江镇

(38.53%)、水源乡(31.30%)、吉潭镇(29.74%)和留车镇(28.64%)。

不同污染源类型对 TP 贡献率与 TN 的规律不一致,呈现畜禽养殖>土地利用>农村生活的特点,其中菖蒲乡、晨光镇、罗珊乡、南桥镇、丹溪乡、龙廷乡和留车镇 7 个乡镇呈现为畜禽养殖污染占主导,占比在 44.75%~70.71%,但三标乡和水源乡无畜禽养殖污染。土地利用 TP 贡献率较大的乡镇有 8 个,依次为桂竹帽镇、三标乡、水源乡、长宁镇、吉潭镇、文峰乡、项山乡和澄江镇,占比在 40.43%~71.75%,另外 TP 农村生活污染较严重的乡镇有澄江镇(38.89%)、水源乡(37.70%)、吉潭镇(33.18%)和三标乡(29.60%)。



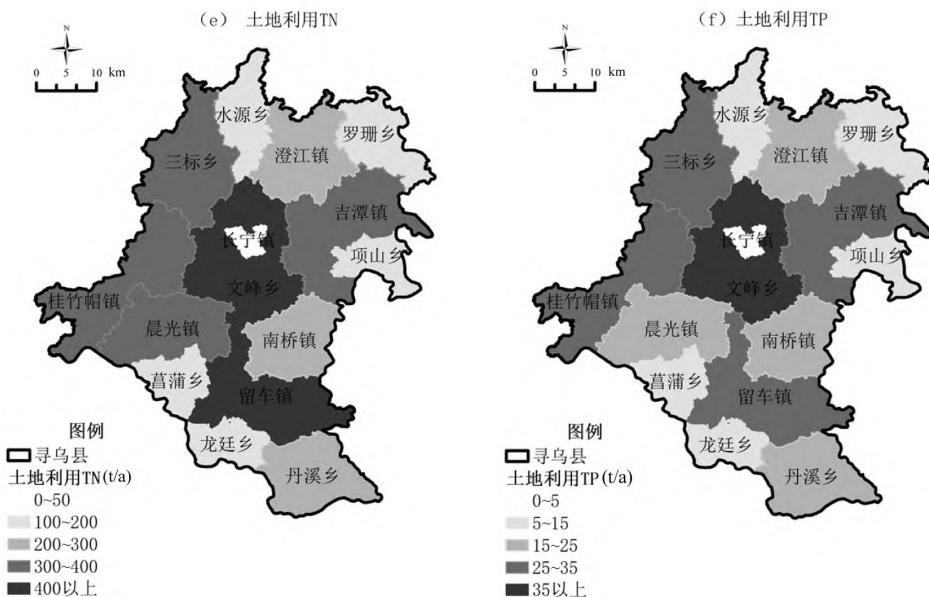


图 5 东江源头区不同污染源的氮磷输出空间分布

Fig.5 Spatial distribution of nitrogen and phosphorus of different pollution sources in the source of Dongjiang River

3 讨论

3.1 流域氮磷污染负荷来源解析

不同区域因其发展方式的差异,面源污染源类型的贡献率会呈现显著的时空异质性。已有研究显示,洱海流域^[27]农业面源污染中土地利用对面源污染的贡献率影响最显著,TN 和 TP 的排放量均主要来自于种植业;洞庭湖流域^[1]面源污染负荷 TN 的排放负荷来自种植业,而 TP 的排放负荷主要来自于畜禽养殖。伊通河流域^[28]的面源污染不同土地利用类型污染物流失浓度呈现旱田>水田>草地>林地。沱江流域^[29]TP 污染主要是畜禽养殖,成为影响沱江水环境的首要污染源。此外宋晓明等^[30]研究发现湖南省 46 个区县 TN 污染的主要来源为农村生活污水和畜禽养殖,TP 污染的主要来源为农村生活污水。

本研究东江源头区氮磷面源污染负荷主要来源分别为土地利用和畜禽养殖,这与洞庭湖流域^[1]、妫水河流域^[11]、滇池流域^[31]等的研究结果一致,农业种植为农业面源污染 TN 的主要污染源、畜禽养殖为农业面源污染 TP 的主要污染源^[32~33]。究其原因东江源头区寻乌县作为农业种植大县,是我国重要的水果(尤其是柑橘和脐橙)生产基地,种植柑橘和脐橙是当地农民脱贫致富的途径之一。果树种植面积的迅速增加导致大量山体遭到开发,坡度大于 15°,甚至超过 25°的山体用于种植果树,山

体水土流失严重,导致土壤中的氮、磷等营养盐进入地表水体。寻乌县农区 2020 年化肥投入强度约为 34kg^[34],高于全国平均水平 22kg^[35],且主要以尿素为主,过高的氮素投入和低的作物吸收率导致农田土壤氮的大量累积,土壤中累积的氮素会随着降雨形成地表径流汇入流域中,导致农业种植成为总氮污染的主要来源。另外,资料显示^[36]寻乌县畜禽以生猪为主,2020 年底全县生猪出栏量为 13.5 万头,占养殖总量的 39.68%,虽已逐步引进大规模养猪场,但农村散养畜禽亦呈加速发展的趋势,且养殖户主要位于农村居住区周边或临河而建,环保设施不完善,其中 28.2% 养户未设置污水处理设施,导致畜禽养殖产生的粪污水经简单处理后直排入河。而且由于猪禽饲料中,总磷的 60%~70% 是以植酸的形式存在^[37],而猪等单胃动物体内缺乏有效降解植酸的消化酶类,对植酸磷的利用率极低,不被消化的植酸磷排出体外导致水环境污染^[38],因此畜禽养殖是导致总磷污染的主要来源。

3.2 流域氮磷污染负荷空间解析

虽然东江源头区农业面源污染以土地利用和畜禽养殖为主,但各乡镇氮磷污染负荷存在明显的空间异质性。其中 TN 污染负荷高值区主要集中分布在南部的留车镇、晨光镇和中部的文峰乡,TP 污染负荷最高值区分布在南部的晨光镇,其次主要集中在留车镇、南桥镇和文峰乡,而两者污染的低值区均

零散的分布在中部的长宁镇、北部的水源乡、南部的龙廷乡和东部的项山乡。污染负荷高值区由于农业活动密集导致污染负荷随之增加^[11],但不同乡镇的污染类型的贡献率有所差异。其中留车镇、澄江镇、吉潭镇、水源乡和丹溪乡农村生活污染面源污染较严重,主要原因是乡镇的农村人口数庞大,且对于农村生活污水无集中处理;而菖蒲乡、晨光镇、南桥镇、罗珊乡和龙廷乡的畜禽养殖数量较多,由此产生的污染源贡献率较大,且畜禽养殖结构以大牲畜牛、猪为主;文峰乡、三标乡、水源乡、长宁镇、桂竹帽镇由土地利用引起的氮磷负荷最高,主要原因是农业种植面积尤其是耕地面积较大,而土地利用类型中耕地的固氮磷能力较差,耕地化肥利用率不高^[39-40],是氮磷流失最主要的土地利用类型,且耕地的氮磷输出系数为林地的3~4倍。尽管留车镇的TN污染负荷量和晨光镇的TP污染负荷量分别呈现最大,但污染强度并不是最高,TN负荷强度最高为南桥镇,而TP负荷强度最高为菖蒲乡。因此,在污染防治上,需综合考虑污染负荷量和负荷强度来进行面源整治。

3.3 流域农业面源污染源控制措施探讨

东江源头区各乡镇的污染特征不同,其治理手段和目标有所侧重,对于畜禽养殖大镇菖蒲乡、晨光镇、南桥镇等实施以源头防控与重点治理相结合,着力改善现有农业生态环境,切实解决畜禽养殖规划性不强,部分养殖户选址不合理,污染防治技术体系薄弱,粪污治理设施普及率和资源化利用水平低等问题。资料显示^[37]寻乌县规模养殖场均采用干清粪方式处理,但养殖户中仅10%采用干清粪方式,90%采用水冲粪方式处理,而水冲粪的方式存在耗水量大、污水产生量大、舍内有害气体含量高、产生的污水有机污染物浓度高等问题^[41-42],因此改变养殖户粪肥处理方式,鼓励养殖户采用干清粪、机械清粪方式,逐步淘汰水冲粪清粪方式,减少养殖过程中用水量和污水排放压力的有效途径。另外由于寻乌县的畜禽养殖结构以牛和猪为主,建设规模化畜禽养殖场可推广生物发酵床养殖技术^[43],不仅可以提高畜禽的免疫力,降低养殖成本,还可有效的处理畜禽粪污,同时结合源头区域“柑桔种植优势区”的特点,建设畜禽养殖-果业开发生态经济循环圈,按照“资源化、无害化、生态化”的原则,利用资源化

治理工程和配套措施处理规模化畜禽养殖有机污染,实现畜禽粪便资源化无害化利用和种植与养殖的良性循环。

对于农村生活污染较严重的留车镇、澄江镇、吉潭镇等大力推进小型农村污水处理设施建设,完善生活污水处理措施^[31,44-45],如建立沼气池、垃圾分类站等,杜绝污染物直接进入水体。另外对于山区边远乡镇如丹溪乡、三标乡、桂竹帽镇等基于人口较少、社会活动水平较低、山地丘陵地形为主的特点,可采取户用化粪池、沼气池等进行分散治理,建设污水储存罐用于冬季储存,结合农业化肥减量增效、水肥一体化等,引导林果种植、农业合作社、家庭农场等现代农业经营主体将治理后的污水作为有机肥水使用,实现无害化处理、资源化利用。

对于农业种植污染较严重的文峰乡、三标乡、水源乡等乡镇需制定合理的施肥方案,避免化肥过量施用以及利用率低的问题^[46-48],控制旱地总氮径流流失应侧重于降低径流量和土壤氮含量,而水田则应同时减低径流量和施氮量,加大推广节水灌溉技术和循环灌溉方法,将土壤氮作为作物生产的潜在氮源予以再利用,并进一步推广应用测土配方施肥技术,减少土壤氮过量积累及流失。另外需在深入了解各乡镇施肥习惯的基础上,科学计算化肥施用量,实行以产定肥,平衡施用有机肥、新型肥料以及无机肥^[44]。提倡应用新型肥料,同时对农药进行减量控制,优先选择生物措施或物理措施,合理轮作,减缓污染。

4 结论

4.1 研究期间,东江源头区农业面源污染物TN和TP负荷量分别是4884.23和591.85t/a,TN负荷量是TP负荷量的8.25倍,不同乡镇的污染负荷量呈现较大的空间异质性。TN负荷量较高的乡镇依次为留车镇、文峰乡、晨光镇、南桥镇、吉潭镇、丹溪乡和澄江镇;TP负荷量较高的乡镇依次为晨光镇、留车镇、南桥镇、文峰乡、丹溪乡、菖蒲乡和吉潭镇。

4.2 源头区氮磷负荷强度与负荷量表现出一定的空间差异性。TN和TP污染负荷量较高分别为留车镇和晨光镇,但负荷强度最高分别为南桥镇和菖蒲乡。其中TN负荷强度高于源头区TN平均负荷强度的依次为南桥镇、菖蒲乡、晨光镇、留车镇和项山

乡;TP 负荷强度高于源头区 TP 负荷强度均值的依次为菖蒲乡、南桥镇、晨光镇、丹溪乡、留车镇和罗珊乡。

4.3 不同农业面源污染源类型对 TN 和 TP 污染负荷的贡献率不同,其中 TN 负荷量主要受土地利用影响,且土地利用污染占比为 37.67%~80.29%,主要分布在长宁镇、桂竹帽镇、三标乡、水源乡、文峰乡等;而 TP 负荷量主要受畜禽养殖影响,畜禽养殖污染占比 44.75%~70.71%,主要分布在菖蒲乡、晨光镇、罗珊乡、南桥镇、丹溪乡、龙廷乡和留车镇。

4.4 东江源头区各乡镇氮磷面源污染特征不同,其治理手段和目标也不尽相同.对于畜禽养殖大镇菖蒲乡、晨光镇、南桥镇等以源头防控与重点治理相结合,切实解决畜禽养殖规划性不强,部分养殖户选址不合理,污染防治技术体系薄弱,粪污治理设施普及率和资源化利用水平低等问题;对于农村生活污染较严重的留车镇、澄江镇、吉潭镇等大力推进小型农村污水处理设施建设,完善生活污水治理措施;对于农业种植污染较严重的文峰乡、三标乡、水源乡等乡镇需制定合理的施肥方案,尽量避免化肥过量施用以及利用率低的问题.

参考文献:

- [1] Nguyen H H, Recknagel F, Meyer W, et al. Comparison of the alternative models SOURCE and SWAT for predicting catchment streamflow, sediment and nutrient loads under the effect of land use changes [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,662:254–265.
- [2] 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.
- [3] Cheng X, Chen L D, Sun R H, et al. An improved export coefficient model to estimate non-point source phosphorus pollution risks under complex precipitation and terrain conditions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018,25(21):20946–20955.
- [4] 刘彬,吴卿,高辉巧.SWAT 模型在香溪河流域非点源污染研究中的应用现状及进展 [J]. *水资源开发与管理*, 2018,(11):28–31.
Liu B, Wu Q, Gao H Q. Application progress of SWAT model in non-point source pollution research in Xiangxi River Basin [J]. *Water Resources Development and Management*, 2018,(11):28–31.
- [5] Cheng X, Chen L, Sun R, et al. Identification of regional water resource stress based on water quantity and quality: A case study in a rapid urbanization region of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,209:216–223.
- [6] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus land delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach [J]. *Journal of Hydrology*, 1996,183(3/4):323–349.
- [7] 蔡明,李怀恩,庄咏涛,等.改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用 [J]. *水利学报*, 2004,7(6):40–45.
Cai M, Li H E, Zhuang Y T, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004,7(6):40–45.
- [8] Ding X W, Shen Z Y, 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):233–244.
- [9] 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]. *China Environmental Science*, 2015,35(8):2400–2408.
- [10] 贺赟,杨爱江,陈蔚洁,等.西南喀斯特山区典型流域农业非点源污染负荷及分布特征 [J]. *水土保持研究*, 2022,29(1):148–152.
He Y, Yang A J, Chen W J, et al. Research on spatial characteristic sand the load of agricultural non-point source pollution in Karst area of southwestern China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(1):148–152.
- [11] 丁洋,赵进勇,董飞,等.妫水河流域农业非点源污染负荷估算与分析 [J]. *水利水电技术*, 2020,51(1):139–146.
Ding Y, Zhao J Y, Dong F, et al. Estimation and analysis of agricultural non-point source pollution load in Guishui River Watershed [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020,51(1):139–146.
- [12] Chen X, Liu X, Peng W, et al. Non-Point Source Nitrogen and Phosphorus Assessment and Management Plan with an Improved Method in Data-Poor Regions [J]. *Water*, 2017,10(1):17.
- [13] Shen Z, 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.
- [14] 高田田,谢晖,万能胜,等.巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析 [J]. *农业环境科学学报*, 2022,41(11):2428–2438.
Gao T T, Xie H, Wan N S, et al. Simulation and source analysis of nonpoint source nitrogen and phosphorus pollution export in a typical agricultural catchment draining to Chaohu Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022,41(11):2428–2438.
- [15] 薛利红,杨林章.面源污染物输出系数模型的研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2009,28(4):755–761.
Xue L H, Yang L Z. Research advances of export coefficient model for non-point source pollution [J]. *Journal of Ecology*, 2009,28(4):755–761.
- [16] Beaulac M N, Reckhow K H. An examination of land use nutrient export relationships [J]. *Water Resource Bulletin*, 1982,18(6):1013–1024.
- [17] Frink C R. Estimating nutrient exports to estuaries [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991,20(4):717–724.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李政道,刘鸿雁,姜 畅,等.基于输出系数模型的红枫湖保护区非点源污染负荷研究 [J]. 水土保持通报, 2020,40(2):193–198,325.
Li Z D, Liu H Y, Jiang C, et al. Non-point source pollution load of Hong Feng Lake reserve based on export coefficient model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(2):193–198.
- [21] 胡富昶,敖天其,胡 正,等.改进的输出系数模型在射洪县的非点源污染应用研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019,(6):78–82,92.
Hu F C, Ao T Q, Hu Z, et al. Applied research on the improved export coefficient model in non-point source pollution in Shehong County [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019,(6):78–82,92.
- [22] 杨 雯,敖天其,王文章,等.基于输出系数模型的琼江流域(安居段)农村非点源污染负荷评估 [J]. 环境工程, 2018,36(10):140–144.
Yang W, Ao T Q, Wang W Z, et al. Estimation of pollution loads from rural non-point sources in Qiongjiang River basin (Anju district) based on export coefficient modeling approach [J]. Environmental Engineering, 2018,36(10):140–144.
- [23] 荆延德,张华美,孙笑笑.基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染输出风险评估 [J]. 水土保持通报, 2017,37(3):270–274,278.
Jing Y D, Zhang H M, Sun X X. Risk assessment of non-point source pollution in Nansihu Lake basin using output coefficient model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(3):270–274,278.
- [24] 张 辰,陆建忠,陈晓玲.基于输出系数模型的云南洱海流域农业非点源污染研究 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2017,51(1):108–114.
Zhang C, Lu J Z, Chen X L. Study of pollution from agricultural non-point sources in Lake Erhai watershed in Yunnan province based on export coefficient mode [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2017,51(1):108–114.
- [25] 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.
- [26] 邢宝秀,陈 贺.北京市农业面源污染负荷及入河系数估算 [J]. 中国水土保持, 2016,(5):34–37,77.
Xing B X, Chen H. Estimation on agricultural non-point source pollution loads and inflow coefficient of Beijing [J]. Soil And Water Conservation in China, 2016,(5):34–37,77.
- [27] 项 颂,吴 越,吕兴菊,等.洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略 [J]. 环境科学研究, 2020,33(11):2474–2483.
Xiang S, Wu Y, Lv X J, et al. Characteristics and spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake Basin and its classified control strategy [J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(11):2474–2483.
- [28] 张 正.伊通河流域非点源污染的模拟与预测 [D]. 长春:吉林大学, 2014.
Zhang Z. Simulation and prediction of non-point source pollution in Yitong river watershed [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [29] 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.
- [30] 宋晓明,柳王荣,姜 珊,等.湖南省农业面源污染与农村水环境质量的响应关系分析 [J]. 农业环境科学学报, 2022,41(7):1509–1519.
Song X M, Liu W R, Jiang S, et al. Analysis on response relationship between agricultural non-point source pollution and rural water environmental quality in Hunan Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(7):1509–1519.
- [31] 胡 晴,郭怀成,王雨琪,等.基于改进输出系数模型的农业源污染物负荷核算 [J]. 北京大学学报((自然科学版)), 2021,57(4):739–748.
Hu Q, Guo H C, Wang Y Q, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution loads based on improved export coefficient model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021,57(4):739–748.
- [32] 唐肖阳,唐德善,鲁佳慧,等.汉江流域农业面源污染的源解析 [J]. 农业环境科学学报, 2018,37(10):2242–2251.
Tang X Y, Tang D S, Lu J H, et al. Source apportionment of agricultural nonpoint source pollution in the Hanjiang River Basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018,37(10):2242–2251.
- [33] 王 坚,王 坚,倪 坚,等.三峡库区不同土地利用条件下氮磷输出量的模拟 [J]. 环境科学: 过程与影响, 2015,17(11):1976–1989.
Wang J, Wang D, Ni J, 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.
- [34] 寻乌县统计局.2020 年寻乌县统计年鉴 [M]. 赣州:寻乌县统计局, 2020 年.
Statistical yearbook in 2020 of Xunwu County [M]. Ganzhou: Xunwu County Bureau of Statistics, 2020.
- [35] 宋红梅,李廷亮,刘 洋,等.我国近 20 年主要粮食作物产量、进出口及化肥投入变化特征 [J]. 水土保持学报, 2023,37(1):332–339.
Song H M, Li T L, Liu Y, et al. Temporal variation of main grain crops yield, import and export and fertilizer consumption of CHINA in the past 20 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):332–339.
- [36] 寻乌县人民政府.《寻乌县“十四五”农业面源污染防治规划》(寻府发〔2022〕21号)[Z].
People's Government of Xun Wu County. The “14th Five-Year Plan” for the prevention and control of agricultural non-point source pollution in Xunwu County, (Xunfu〔2022〕No.21) [Z].
- [37] Reddy N R, Sathe S K, Salunkhe D K. Phytates in legumes and cereals [J]. Advances in food research, 1982,28:1–92.
- [38] 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. C1in *Pichia pastoris* [J]. Biotechnology Bulletin, 2020,36(2):134–141.
- [39] 张 瞻,欧阳真程,赵小敏,等.江西省不同农田利用方式对土壤碳、氮和碳氮比的影响 [J]. 环境科学学报, 2018,38(6):2486–2497.
Zhang H, Ouyang Z C, Zhao X M, et al. Effects of different land use types on soil organic carbon, nitrogen and ratio of carbon to nitrogen in the plow layer of farmland soil in Jiangxi Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(6):2486–2497.
- [40] 李家科,彭 凯,郝改瑞,等.黄河流域非点源污染负荷定量化与控制研究进展 [J]. 水资源保护, 2021,37(1):90–102.
Li J K, Peng K, Hao G R, et al. Research progress on quantification and control of non-point source pollution load in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):90–102.
- [41] 刘安芳,阮蓉丹,李厅厅,等.猪舍内粪污废弃物和有害气体减量化工程研究 [J]. 农业工程学报, 2019,35(15):200–210.
Liu A F, Ruan R D, Li T T, et al. Research progress of in-house reduce engineering technology for piggery manure wastes and poisonous gas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019,35(15):200–210.
- [42] 周海滨,丁京涛,孟海波,等.中国畜禽粪污资源化利用技术应用调研与发展分析 [J]. 农业工程学报, 2022,38(9):237–246.
Zhou H B, Ding J T, Meng H B, et al. Survey and development analysis of resource utilization technology of livestock and poultry wastes in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(9):237–246.
- [43] 刘爱瑜,任二军,高玉红,等.冬季发酵床养羊的应用效果研究 [J]. 家畜生态学报, 2022,43(5):73–77.
- Liu A Y, Ren E J, Gao Y H, et al. Analysis of fattening effect of raising sheep in fermentation bed in winter [J]. *Acta Ecologiae Animalis Domestici*, 2022,43(5):73–77.
- [44] Liu R, Xu F, Zhang P, et al. Identifying non-point source critical source areas based on multi-factors at a basin scale with SWAT [J]. Journal of Hydrology, 2016,533:379–388.
- [45] Yasarer L M W, Lohani S, Bingner R L, et al. Assessment of the soil vulnerability index and comparison with AnnAGNPS in two lower Mississippi River Basin watersheds [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,75(1):53–61.
- [46] Zuo L, Gao J. Investigating the compounding effects of environmental factors on ecosystem services relationships for Ecological Conservation Red Line areas [J]. Land Degradation & Development, 2021,32(16):4609–4623.
- [47] 陶 园,徐 静,任贺婧,等.黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析 [J]. 农业工程学报, 2021,37(4):257–264.
Tao Y, Xu J, Ren H J, et al. Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37(4):257–264.
- [48] 丘丽清,吴根义,李 想,等.基于等标污染负荷强度的海南省农村面源污染特征研究 [J]. 农业资源与环境学报, 2023,40(1):55–63.
Qiu L Q, Wu G Y, Li X, et al. Characteristics of agricultural non-point source pollution in Hainan rural area based on equal standard pollution load intensity [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023,40(1):55–63.

作者简介: 荀 婷(1988–),女,甘肃白银人,工程师,硕士,主要从事水污染防治研究.发表论文 18 篇.gouting@scies.org.