

洞庭湖流域氮磷污染风险评价与时空分布特征¹

胡光伟^{1,2,3} 冯海丽^{1,2} 马逸岚^{1,2} 周希^{1,2} 冯畅³ 黄丽媛^{1,2}

(1. 湖南工业大学城市与环境学院, 湖南株洲 412007;

2. 湖南工业大学农牧业废弃物资源化综合利用湖南省重点实验室, 湖南株洲 412007;

3. 衡阳师范学院城市与旅游学院, 湖南衡阳 421002)

【摘要】:洞庭湖农业面源污染日益严重,深入了解洞庭湖流域氮磷污染的时空分布特征,是促进洞庭湖流域面源污染治理需解决的科学问题。运用改进输出系数模型、等标污染负荷法对洞庭湖流域 25 个县(市、区)的 TN、TP 污染物负荷量进行计算,借助 GIS 软件绘制 TN、TP 污染负荷空间分布图,分析流域 TN、TP 污染负荷量的时空变化特征。结果表明:(1)从空间尺度上看,TN、TP 污染负荷量在空间排放上呈现明显的地域差异特征,安化县、桃源县、石门县、平江县、桃江县等县区是洞庭湖流域农业面源污染的重点防治区域,污染负荷较高的区域集中分布在流域的上游。(2)从时间尺度上看,2010、2015、2019 年 TN 污染负荷量分别为 11.95、10.90、6.95 万 t/a,TP 污染负荷量分别为 7.60、7.00、4.21 万 t/a,洞庭湖流域 TN、TP 污染物负荷量呈现明显减少趋势,TN 污染负荷量始终大于 TP 污染负荷量。(3)从畜禽养殖、土地利用和居民生活 3 个方面来看,TN、TP 污染负荷量也呈现出递减规律。(4)运用聚类分析方法将流域分为复合污染型、畜禽养殖污染型、土地利用污染型、居民生活污染型 4 种类型。最后,为推进洞庭湖流域氮磷污染的综合治理,结合 TN、TP 污染负荷量的时空分异特征,提出了有针对性的采取种植业科学施肥、合理规划畜禽养殖规模和分区、整治农村人居环境、切合实际发展生态农业等措施。

【关键词】:洞庭湖流域;农业面源污染;输出系数模型法;等标污染负荷法;时空分异

【中图分类号】:X524 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004- 8227(2023)01- 0162- 10

【DOI】:10.11870/c.jlyzyyhj202301015

农业面源污染主要由化肥、农药等有害物质、秸秆农膜等固体废弃物、畜禽养殖粪便、水产养殖饵料、农村生活垃圾等通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等形式进入水体环境所造成的水体污染^[1,2]。随着农村种植业、养殖业的飞速发展,以及城镇化的快速扩张,农药和化肥的过量施用对农业环境造成严重污染,农业面源成为环境污染的治理难点^[3]。尽管各级政府采取了整治农业面源污染的措施,但农业面源污染具有随机性、分散性、范围广等特点,农业面源污染成为导致江河湖泊等流域水质恶

¹ **【收稿日期】**:2022- 02- 11; **【修回日期】**:2022- 04- 18

【基金项目】:教育部人文社科基金项目(19YJJCZH053);湖南省教育厅一般项目(19C0592);湖南省社会科学成果评审委员会课题(XSP20YBC296);株洲市社科研究课题(ZZSK2021043);株洲市科技计划项目

【作者简介】:胡光伟(1983~),男,副教授,主要研究方向为湖泊水资源与水环境.E-mail:280452570@qq.com

化的关键因素。据调查,太湖流域 83%的 TN、TP 来自于非点源污染^[4]。根据第二次全国污染源普查结果显示,2017 年农业源 COD、NH₃-N、TN、TP 排放量分别为 1 067.13、21.62、141.49 和 21.20 万 t, 分别占全国水污染物排放总量的 49.8%、22.4%、46.5% 和 67.2%^[5]。

我国农业面源污染的研究开始于 20 世纪 80 年代,采用的方法主要有输出系数法^[6,7]、实测法^[7,8]、排污系数法^[9]、模型法^[10,11]、等标污染负荷法^[12]、清单法^[13,14]、调查法^[15,16]等,如, Jordan 等^[17]、陆建忠等^[18]、龙天渝等^[19]采用输出系数法对不同尺度的区域非点源污染负荷进行估算和预测。学者的研究区域集中在三峡库区^[20,21]、鄱阳湖^[22,23]、太湖^[24,25]、巢湖^[15,26]等流域农业面源污染的研究,针对洞庭湖的研究主要是关于污染现状分析^[27]、排放特征^[4]、防治政策^[28]、污染调查^[29,30]等方面。根据前人已有的研究,洞庭湖流域的耕地虽然呈减少趋势,但是畜禽养殖、化肥农药的过度施用、生活垃圾等造成的面源污染依然严重,洞庭湖区 TN、TP 年输出负荷总量呈上升趋势^[4]。因此,基于长时间序列统计面板数据和实地调查资料,以洞庭湖流域各县市区为研究对象,运用输出系数模型法、等标污染负荷法和 GIS 空间分析法,重点研究流域氮、磷污染负荷量及其时空分布特征,以期为洞庭湖流域农业面源污染防控提供科学依据。

1 研究区域概况

洞庭湖坐落于长江干流荆江南岸(图 1),流域水体面积 2 625 km²,是中国第二大淡水湖泊,对长江中游调蓄洪水具有重要作用^[31]。洞庭湖流域包含长沙市望城区及岳阳、常德、益阳 3 市等下辖的 25 个县(市区)^[32],常住人口 1 514 万人,土地总面积 3.16 × 10⁴km², 占全省总面积的 15%。洞庭湖区作为中国的“鱼米之乡”,是全国商品粮生产基地,耕地总面积 97 × 10⁴hm², 占全省耕地面积的 30%,2020 年农业总产值 1 049 亿元,湖区农业发达,造成了流域严重的农业面源污染问题。

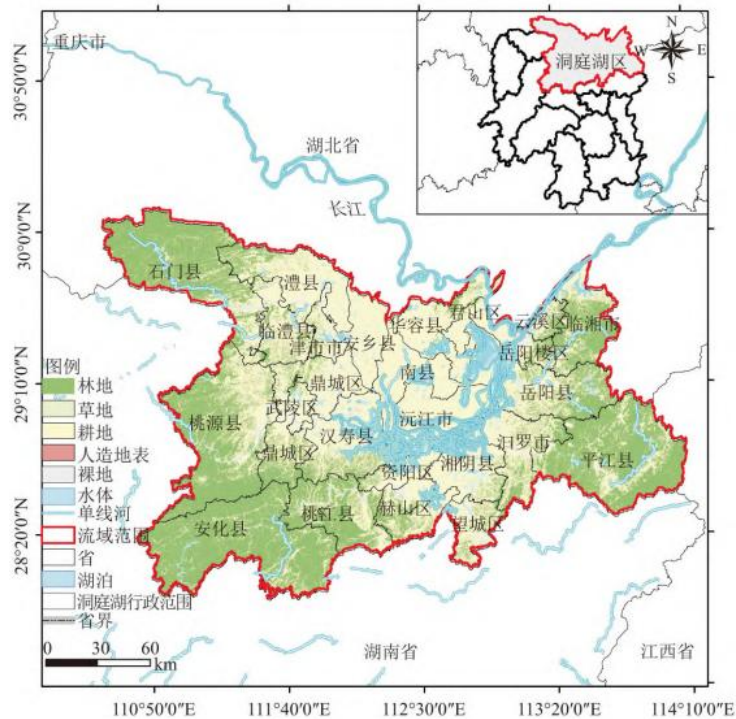


图 1 研究区位图

Fig. 1 Study scope of Dongting Lake Basin

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法及相关系数确定

2.1.1 改进的输出系数法模型

1966年,经典输出系数模型由Johnes^[33]首次提出,应用于研究土地利用-营养负荷-湖泊富营养化之间的关系,由于该模型因所需参数少、模型结构简单,被广泛应用于农村面源污染负荷的测算中^[34],计算公式如下:

$$L_j = \sum_{i=1}^n E_{ij} A_i \quad (1)$$

式中: L_j 为第 j 种污染物的总负荷量(kg/a); j 是指污染物类型; i 为畜禽养殖类型、人口及土地利用类型; E_{ij} 为第 j 种污染物在第 i 种土地利用类型、畜禽养殖类型或人口的输出系数(kg/hm²·a、kg/头·a或者kg/人·a); A_i 为第 i 种土地利用类型的面积(hm²)、畜禽养殖的数量(头/羽)或人口数量(人)。

上述模型在资料缺失的流域面源污染中得到大量推广,但未考虑降雨量大小对污染物负荷的影响,地表的起伏状态对污染物的迁移过程也未纳入计算,因此,针对洞庭湖流域降雨和地形的环境影响的差异性特征,在计算中增加地形和降雨两个修正系数,对上述模型进行修正。

改进的模型计算公式如下^[18,35]:

$$L_j = X \times Y \sum_{i=1}^n E_{ij} A_i \quad (2)$$

式中: X 指降雨修正系数; Y 指地形修正系数,其他同上。

$$X = X_1 X_2 = \frac{f(p)}{f(\bar{p})} \times \frac{C_i}{C} \quad (3)$$

式中: \bar{p} 指多年平均降雨量; p 指当年降雨量, C 指子单元多年平均降雨量; C_i 指子单元当年降雨量。

坡度对流域污染物负荷的影响主要通过径流的影响体现出来,根据前人的研究成果^[18,36],坡度与径流之间存在如下关系:

$$Q = a \times S^q \quad (4)$$

式中: Q 指径流量; S 指坡度; a 、 q 是常量。

地形修正系数公式:

$$Y = \frac{a \times s^q}{a \times \bar{s}^q} = \frac{s^q}{\bar{s}^q} \quad (5)$$

式中：s 指子单元的平均坡度， \bar{s} 指平均坡度，常量 $q=0.6104$ [18]。

2.1.2 相关系数的确定

污染输出系数值的确定是模型计算的关键，其取值的大小反映了流域面源污染的输出强度，一般采用单位时间单位面积污染物负荷量表示。由于地区差异影响输出系数的大小，论文参考相关流域文献^[4,37,38]、《农业源产排污系数手册》确定不同土地利用类型、畜禽养殖、农村生活等氮、磷的输出系数^[34,39]，系数取值见表 1。

表 1 输出系数分类和取值表

污染物类型		输出系数	
		TN	TP
土地利用类型 [kg/(hm ² ·a)]	水田	21.67	1.61
	旱地	17.235	2.85
	园地	11.92	2.42
	林地	2.58	0.35
	草地	2.65	0.55
	建设用地	6.81	0.46
畜禽养殖 [kg/(头/羽·a)]	大牲畜	6.11	1.01
	猪	0.45	0.17
	羊	0.255	0.02475
	家禽	0.015 15	0.006 35
居民生活 [kg/(人·a)]	农村人口	1.68	0.15
	城镇人口	2.48	0.25

地形修正系数的求解，借助于 ArcGIS10.8 软件对 DEM 进行坡度分析，分区统计各县市区的平均坡度，再代入公式(5)计算

出系数 Y;对洞庭湖流域 16 个国家气象站年降雨量数据进行插值,再分区统计,代入公式(3)计算得到系数 X,修正系数如表 2 所示。

表 2 地形和降雨修正系数

系数	望城	岳阳楼	云溪	君山	岳阳	华容	湘阴	平江	汨罗	临湘	武陵	鼎城	安乡
降雨修正系数 X	0.845	0.771	0.767	0.774	0.817	0.808	0.787	0.851	0.807	0.775	0.868	0.889	0.852
地形修正系数 Y	0.873	0.953	1.014	0.486	0.920	0.577	0.577	1.627	0.931	1.306	0.651	0.780	0.444
系数	汉寿	澧县	临澧	桃源	石门	津市	资阳	赫山	南县	桃江	安化	沅江	
降雨修正系数 X	0.898	0.829	0.825	0.912	0.823	0.850	0.901	0.886	0.837	0.919	0.971	0.866	
地形修正	0.616	0.868	0.885	1.445	1.939	0.712	0.588	0.868	0.390	1.449	2.053	0.425	

系数 Y													
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

2.2 数据来源

DEM 数字地形模型 (30 m×30 m) 来源于地理空间数据云, 土地利用数据来源于中国科学院空天信息创新研究院发布的全球 30 m 地表覆盖精细分类产品; 畜禽养殖、农药和化肥施用量、塑料薄膜、水产养殖、人口等数据来源于《湖南统计年鉴 2020》《湖南农村统计年鉴 2020》《常德统计年鉴 2020》《益阳统计年鉴 2020》《岳阳统计年鉴 2020》《长沙统计年鉴 2020》和各县(市区)国民经济和社会发展统计公报; 降雨量数据来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>)。

3 结果与分析

基于改进输出系数模型, 在考虑降雨和地形因素对氮、磷污染负荷的影响, 计算出洞庭湖流域 25 个县市区 2010、2015 和 2019 年不同污染类型所产生的 TN、TP 污染负荷量。

3.1 流域内氮、磷总污染负荷分析

针对洞庭湖流域农业面源污染的来源现状, 从土地利用、畜禽养殖和居民生活 3 个方面进行的计算, 为了方便比较 TN、TP 两种污染物, 采用等标污染负荷方法^[34]对两种污染物进行换算, 计算结果见表 3。

表 3 洞庭湖流域污染负荷综合计算表

污染物类型	TN (t/a)	TP (t/a)	等标污染负荷(t/a)			负荷占比(%)		
			TN	TP	总计	TN	TP	总计
水田	12 583.73	934.92	12 583.73	4 674.62	17 258.35	18.12	11.10	15.47
旱地	2 765.57	457.32	2 765.57	2 286.59	5 052.15	3.98	5.43	4.53
种植园地	1 761.49	357.62	1 761.49	1 788.09	3 549.59	2.54	4.25	3.18
林地	6 512.75	883.51	6 512.75	4 417.56	10 930.31	9.38	10.49	9.80
草地	136.44	28.32	136.44	141.59	278.03	0.20	0.34	0.25

建设用地	6 269.19	423.47	6 269.19	2 117.35	8 386.53	9.03	5.03	7.52
畜禽养殖	9 900.97	2 486.68	9 900.97	12 433.39	22 334.36	14.25	29.52	20.02
居民生活	29 531.01	2 851.29	29 531.01	14 256.44	43 787.44	42.51	33.85	39.24
总计	69 461.14	8 423.12	69 461.14	42 115.62	111 576.77	100.00	100.00	100.00

根据表 3 的计算结果, TN 的总污染负荷量为 6.95 万 t/a, 其中, 居民生活污染负荷量为 2.95 万 t/a, 占比为 42.51%, 畜禽养殖污染负荷量为 0.99 万 t/a, 占比为 14.25%, 土地利用污染负荷量为 3.00 万 t/a, 占比为 43.23%; 影响 TN 负荷量的主要污染源排序为: 居民生活>水田>畜禽养殖>林地>建设用地>旱地>园地。TP 的总污染负荷量为 4.21 万 t/a, 其中, 居民生活污染负荷量为 1.43 万 t/a, 占比为 33.85%, 畜禽养殖污染负荷量为 1.24 万 t/a, 占比为 29.52%, 土地利用污染负荷量为 1.54 万 t/a, 占比为 36.63%; 影响 TP 负荷量的主要污染源排序为: 居民生活>畜禽养殖>水田>林地>旱地>建设用地>园地。

从 TN、TP 的总负荷比来看, 土地利用污染负荷占比达到 40.74%, 居民生活污染负荷占比为 39.24%, 畜禽养殖污染负荷占比为 20.02%, 可以看出, 土地利用污染负荷量最大, 畜禽养殖污染负荷量最小, 其中土地利用包括水田、旱地、林地、园地和草地等土地利用类型, 这与卢少勇等人的研究结果基本一致^[4]。TN 的污染负荷总量是 TP 的污染负荷总量的 1.65 倍, 是洞庭湖流域的主要污染物。TN 污染负荷比 TP 污染负荷要大, 主要原因是氮的输出系数比磷的输出系数要大, 表现为土壤等的固氮作用要比固磷的作用弱。在土地利用污染负荷中, 水田污染负荷量为 1.73 万 t/a, 占比为 15.47%, 是土地利用中污染负荷最大的一种类型, 旱地污染负荷量为 0.51 万 t/a, 占比为 4.53%, 种植园地污染负荷量为 0.35 万 t/a, 占比为 3.18%, 林地污染负荷量为 1.09 万 t/a, 占比为 9.80%, 草地污染负荷量为 0.03 万 t/a, 占比为 0.25%, 建设用地污染负荷量为 0.84 万 t/a, 占比为 7.52%。

3.2 各县市区氮、磷污染负荷空间分布

从 TN 污染负荷量计算结果看(图 2), 各县市区 TN 污染负荷量大小排序依次为桃源县、安化县、平江县、石门县、桃江县、鼎城区、澧县、岳阳县、临湘市、汨罗市、汉寿县、赫山区、岳阳楼区、望城区、华容县、临澧县、湘阴县、武陵区、沅江市、安乡县、南县、津市市、资阳区、云溪区、君山区, 其中桃源县污染负荷最大, TN 污染负荷量为 0.82 万 t/a, 占比 11.79%, 其次是安化县, TN 污染负荷量为 0.78 万 t/a, 占比 11.16%, 云溪区和君山区污染负荷量最小, 分别为 0.06 万 t/a 和 0.05 万 t/a, 占比分别为 0.86%和 0.71%。桃源县、安化县、平江县、石门县、桃江县、鼎城区等县 TN 总污染负荷量占比为 53.26%, 超过洞庭湖流域的一半。通过分析氮污染源, 影响各县市区 TN 总污染负荷量空间差异的原因主要是土地利用类型和农业人口数量的差异, 以桃源县为例, 桃源县的土地利用的 TN 污染负荷为 0.43 万 t/a, 在 25 个县市区中最大, 是影响 TN 总污染负荷的关键因素, 特别是水田的 TN 污染负荷(0.23 万 t/a)最大, 因此, 耕地是造成氮污染的重要来源; 其次居民生活也是重要影响因素, 桃源县、安化县和平江县都是农业人口密集的县。

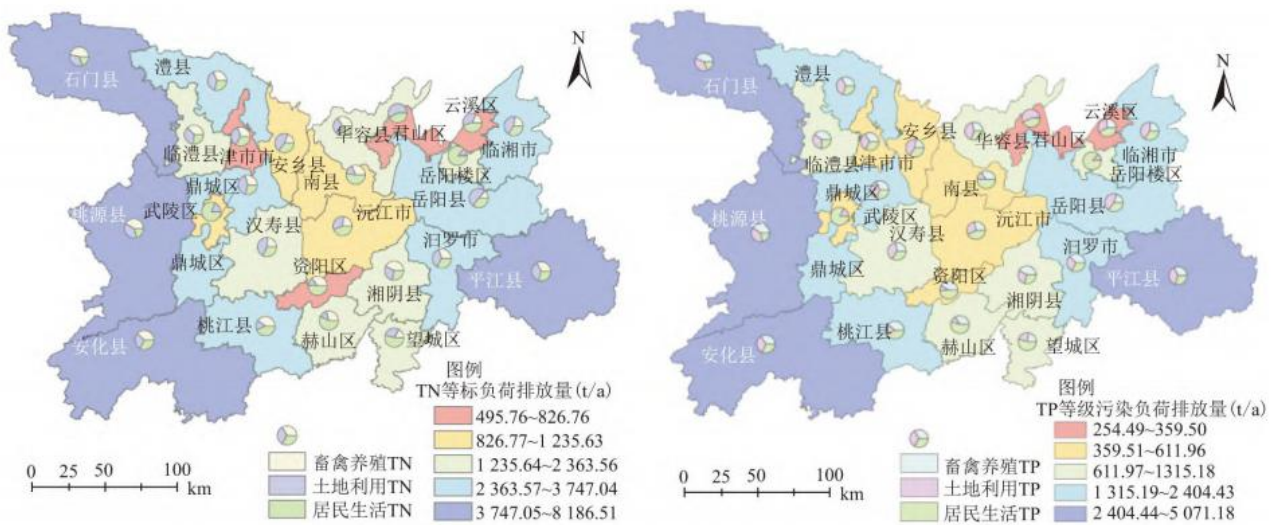


图 2 洞庭湖流域各县市区 TN、TP 等标负荷排放量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of TN and TP equal standard pollution emissions in counties and cities of Dongting Lake Basin

从 TP 污染负荷量计算结果看(图 2), 各县市区 TP 污染负荷量大小排序依次为安化县、桃源县、石门县、平江县、桃江县、鼎城区、澧县、汨罗市、临湘市、岳阳县、赫山区、汉寿县、临澧县、华容县、湘阴县、望城区、岳阳楼区、武陵区、沅江市、安乡县、南县、津市市、资阳区、云溪区、君山区, 安化县 TP 污染负荷量最大, 为 0.507 万 t/a, 占比 12.04%, 其次桃源县为 0.506 万 t/a, 占比 12.01%, 云溪区和君山区污染负荷量最小, 分别为 0.04 和 0.03 万 t/a, 占比分别为 0.85% 和 0.60%。安化县、桃源县、石门县、平江县、桃江县等县区 TP 总污染负荷量占比为 51.28%, 超过洞庭湖流域的一半。因此, 综合来看, 安化县、桃源县、石门县、平江县、桃江县等县区是洞庭湖流域农业面源污染的重点防治区域, 污染负荷较高的区域集中分布在流域的上游。

另外, 从畜禽养殖、土地利用、居民生活等 3 个主要污染源评价结果来看, 土地利用是 TN 污染负荷主要来源, 污染负荷量为 3.0 万 t/a, 其次为居民生活、畜禽养殖, 污染负荷量分别为 2.95、0.99 万 t/a; 同样, 土地利用是 TP 污染负荷的主要来源, 污染负荷量为 1.54 万 t/a, 其次为居民生活、畜禽养殖, 污染负荷量分别为 1.43、1.24 万 t/a。洞庭湖流域氮磷污染负荷在空间上差异明显, 各县市区在不同污染类型上的氮磷污染负荷大小和占比也存在差异。

3.3 各县市区氮磷污染负荷时间变化

借助于改进的输出系数模型计算 2010、2015、2019 年洞庭湖流域各县市区氮磷污染负荷量, 统计各县市区氮磷污染负荷量的时序变化规律, 计算结果见表 4、图 3。

表 4 不同年份 TN、TP 等标污染负荷构成

污染类型(t/a)		2010a	2015a	2019a
畜禽养殖	TN	22 550.437	21 363.187	9 900.973 4
土地利用		54 164.526	47 740.552	30 029.166

居民生活		42 811.123	39 917.572	29 531.006
总计		119 526.09	109 021.31	69 461.145
畜禽养殖	TP	28 337.274	26 669.986	12 433.39
土地利用		27 326.362	24 166.545	15 425.799
居民生活		20 326.437	19 136.491	14 256.436
总计		75 990.073	69 973.022	42 115.625

从各县市区氮磷污染负荷时间变化上来分析,各县市区总氮负荷量始终大于总磷负荷量,2010、2015、2019年TN污染负荷量分别为11.95、10.90、6.95万t/a,TP污染负荷量分别为7.60、7.00、4.21万t/a,氮磷污染负荷量随时间变化,呈现出递减规律。通过对畜禽养殖、土地利用、居民生活等3种主要污染源数据进行对比分析发现,2010、2015、2019年TN、TP污染负荷量也呈现出递减规律,表明洞庭湖流域的氮磷污染负荷有明显的减轻趋势;主要原因是各县市区的氮磷污染负荷均有不同程度的减轻趋势,但是各县市区畜禽养殖、土地利用、居民生活等3种主要污染源减轻的程度不一致。如,安化县、安乡县、鼎城区、汉寿县、华容县、津市市、君山区、澧县、临澧县、临湘市、汨罗市、南县、平江县、石门县、桃源县、湘阴县、岳阳县、云溪区、资阳区等县市区3种主要污染源同步呈减少趋势,主要影响因素是农村人口转移到城镇、农业种植结构的调整、畜禽养殖政策等;而赫山区、桃江县、望城区、武陵区、沅江市、岳阳楼区等县市区3种主要污染源有增有减,在时间变化来看,没有特定规律。

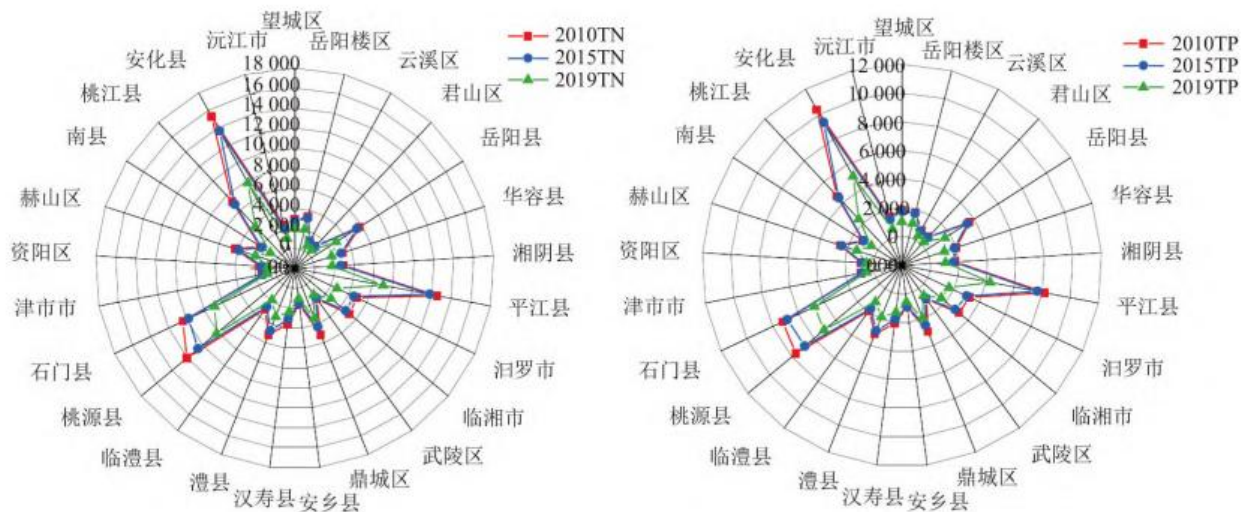


图3 洞庭湖流域各县市区TN、TP等标污染排放量

Fig.3 Equivalent pollution emissions of TN and TP in counties and cities of Dongting Lake Basin

3.4 流域氮磷污染负荷聚类分析

借助于SPSS软件,对洞庭湖流域25个县市区的等标污染负荷量进行聚类分析,结果如图4所示。

从图 4 中可以看出，洞庭湖流域 25 个县市区氮磷等标污染负荷量分成 3 种类型，其中第一种重度污染型包括平江县、石门县、桃源县和安化县 4 个县，桃源县等标污染负荷量最大，为 0.92 万 t/a，平均等标污染负荷量为 0.84 万 t/a；主要原因是这些县是农业生产发达区域，耕地集中，农村人口较多，所以氮磷污染排放量较大，特别是桃源县是著名的粮食生产大县，农业总产值较高，另外，其还是湖南省的畜禽养殖集中的区域；第二种中度污染型包括鼎城区、澧县、汨罗市、临湘市、岳阳县、桃江县等 6 个县市区，平均等标污染负荷量为 0.35 万 t/a；第三种轻度型包括安乡县、沅江市、武陵区、云溪区、君山区、津市市、南县、资阳区、华容县、临澧县、望城区、岳阳楼区、湘阴县、汉寿县、赫山区等 15 个县市区，平均等标污染负荷量为 0.16 万 t/a；其中，君山区氮磷总污染负荷量最低，为 0.055 万 t/a。综合来看，TN、TP 污染负荷量在空间上的分布基本是一致的。

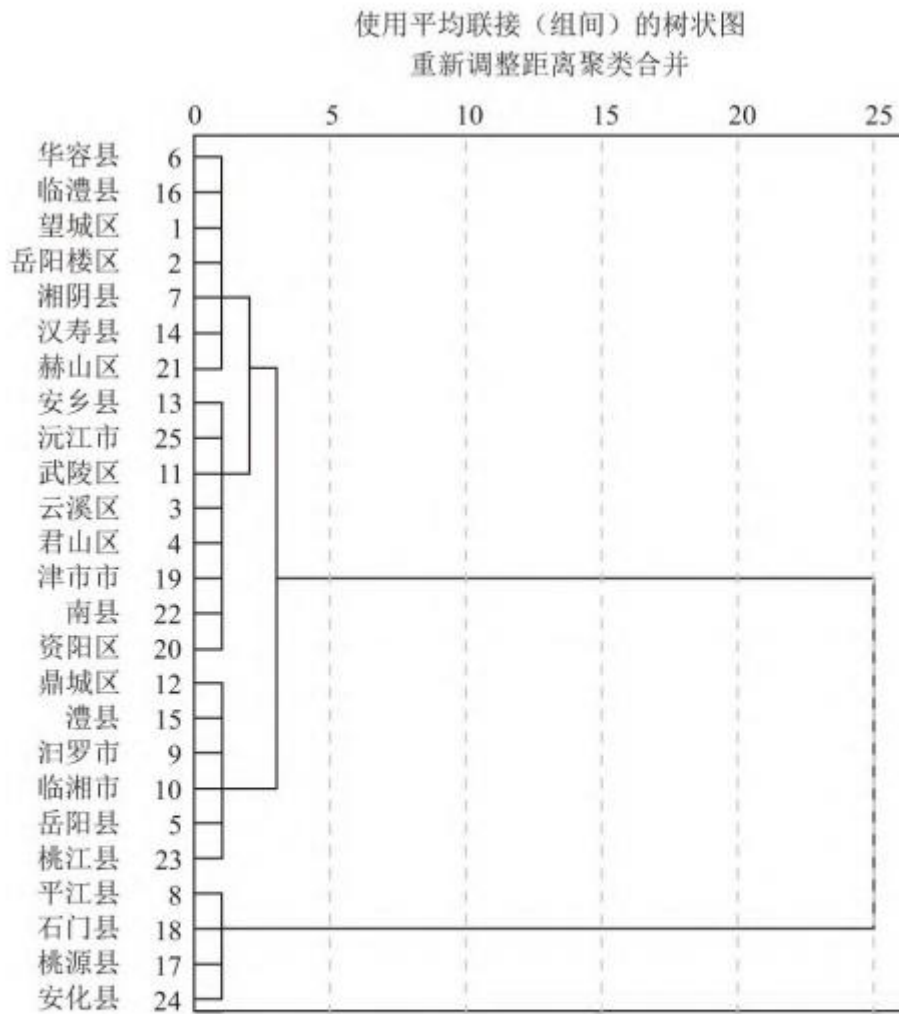


图 4 2019 年洞庭湖流域各县市区
等标污染负荷聚类树状图

Fig. 4 Constant pollution load clustering tree diagram of
counties and cities in Dongting Lake Basin in 2019

4 结论与建议

4.1 结论

(1)洞庭湖流域 TN 的总污染负荷量为 6.95 万 t/a, TP 的总污染负荷量为 4.21 万 t/a, 从 TN、TP 的总负荷比来看, 土地利用污染负荷占比达到 40.74%, 土地利用污染负荷量最大, 畜禽养殖负荷量最小。TN 的污染负荷总量是 TP 的污染负荷总量的 1.65 倍, 是洞庭湖流域的主要污染物。

(2)2010、2015、2019 年 TN 污染负荷量分别为 11.95、10.90、6.95 万 t/a, TP 污染负荷量分别为 7.60、7.00、4.21 万 t/a, 氮磷污染负荷量随时间变化, 呈现出递减规律。

(3)安化县、桃源县、石门县、平江县、桃江县等县区是洞庭湖流域农业面源污染的重点防治区域, 污染负荷较高的区域集中分布在流域的上游。从畜禽养殖、土地利用、居民生活等 3 个主要污染源评价结果来看, 土地利用是 TN、TP 污染负荷主要来源。各县市区在不同污染类型上的氮、磷污染负荷大小和占比也存在差异。

(4)应用聚类分析法将流域 25 个县市区氮磷等标污染负荷量分成重度污染、中度污染、轻度污染 3 种类型, 按照污染源进一步将其分为复合污染型、畜禽养殖污染型、土地利用污染型和居民生活污染型等。

4.2 建议

便于有针对性的提出各县市区氮、磷污染的治理对策, 根据畜禽养殖、土地利用和居民生活 3 个方面的 TN、TP 污染负荷量的计算结果, 分别进行聚类分析, 将流域 25 个县市区分为四种类型, 复合污染型: 安化县、平江县、桃江县、桃源县、石门县, 畜禽养殖污染型: 鼎城区、澧县、湘阴县、汨罗市、华容县、赫山区, 土地利用污染型: 岳阳县、临湘市、汉寿县、临澧县、望城区、安乡县, 居民生活污染型: 岳阳楼区、武陵区、南县、沅江市、资阳区、津市市、云溪区、君山区, 如图 5 所示。

复合污染型: 是流域 TN、TP 污染负荷量最大的区域, 主要污染源土地利用、畜禽养殖和居民生活均占有较大比例, 治理难度也是最大的区域。必须采取全面的面源污染治理措施, 从建立管控农业面源污染治理体系入手, 大力整治农村生活垃圾, 扎实开展农村人居环境整治行动; 改善养殖业结构和模式, 合理规划养殖区域和规模, 采取预防措施控制该区畜禽养殖产生的污染; 大力发展生态农业, 实现农业绿色发展, 提高土地利用效率, 转变农业发展方式, 提升农产品品质。



图 5 洞庭湖流域不同污染类型空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of different pollution types in Dongting Lake Basin

畜禽养殖污染型：该区域的主要污染来源是畜禽养殖，主要从科学划分养殖区域，提高畜禽粪便的资源化利用水平，实现畜禽粪便无害化率达 100%，区分规模养殖和散户养殖，推广农村畜禽养殖沼气化改造技术，全面提高规模化养殖生物发酵养殖技术。

土地利用污染型：土地利用是农业面源污染最大的影响因素，化肥农药的过度施用是氮磷的主要来源，该区域农业发达，化肥农药施用强度高，应提高土地利用效率，集约节约利用土地，推广测土配方施肥技术，推广使用有机肥料，减少氮肥的施用面积，合理规划农业种植结构，改造农田水利设施，推动科学施肥与农药减量化。

居民生活污染型：该区域人口集中，人口基数大，特别是农村生活污水处理率不高，应采取居民生活垃圾无害化处理，健全农村生活污水集中生态化处理设施等措施，利用生态绿地、生物滞留池、人工湿地等生态措施对农村生活污水进行末端拦截处理。

参考文献

[1] 杨滨键, 尚杰, 于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2):236-245. YANG B J, SHANG J, YU F W. Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2):236-245.

-
- [2] 杨善莲, 郑梦蕾, 刘纯宇, 等. 农业面源污染模型研究进展[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3):8-13. YANG S L, ZHENG M L, LIU C Y, et al. Research progress on agricultural non-point source pollution model [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, 32(3):8-13.
- [3] 王一格, 王海燕, 郑永林, 等. 农业面源污染研究方法与控制技术研究进展 [J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1):25-33. WANG Y G, WANG H Y, ZHENG Y L, et al. Advances in research methods and control technologies of agricultural non-point source pollution:A review [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1):25-33.
- [4] 卢少勇, 张萍, 潘成荣, 等. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(6):2278-2286. LU S Y, ZHANG P, PAN C R, et al. Agricultural non-point source pollution discharge characteristic and its control measures of Dongtinghu Lake [J]. China Environmental Science, 2017, 37(6):2278-2286.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 第二次全国污染源普查公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm, 2020-06-08. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin of the Second National Pollution Source Census [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm, 2020-06-08.
- [6] LIU J, ZHANG L, ZHANG Y, et al. Validation of an agricultural non-point source (AGNPS) pollution model for a catchment in the Jiulong River watershed, China [J]. J Environ Sci (China), 2008, 20(5):599-606.
- [7] 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]. Sci Total Environ, 2011 Dec 15;412-413:154-61.
- [8] 纪丁愈, 王庆安, 余红英, 等. 川中丘陵地区小流域农业面源污染特征及水环境容量研究——以黄腊溪小流域为例 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4):81-84. JI D Y, WANG Q G, SHE H Y, et al. Research on the agricultural non-point pollution characteristic and water environment capacity in hilly area of central Sichuan basin:A case study of Huang Laxi small watershed [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(4):81-84.
- [9] 严婷婷, 王红华, 孙治旭, 等. 滇池流域农村生活污水产排污系数研究 [J]. 环境科学导刊, 2010, 29(4):46-48. YAN T T, WANG H H, SUN Z X, et al. Research on coefficients of producing and discharging pollutants of domestic wastewater in rural areas in Dianchi Lake [J]. Environmental Science Survey, 2010, 29(4):46-48.
- [10] 周艳文, 闵兴华, 俞欣, 等. 基于 SWAT 模型的石臼湖流域面源污染特征分析 [J]. 四川环境, 2021, 40(5):186-191. ZHOU Y W, MIN X H, YU X, et al. Characteristics of non-point source pollution in Shijiu Lake basin based on SWAT model [J]. Sichuan Environment, 2021, 40(5):186-191.
- [11] 冯青郁, 陈利顶, 杨磊. APEX 模型在我国农业面源污染研究中的应用前景综述 [J]. 生态学报, 2022, 42(5):1-14. FENG Q Y, CHEN L D, YANG L. Review on the potential of applying the APEX model for non-point source pollution in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5):1-14.
- [12] 钱秀红. 杭嘉湖平原农业非点源污染的调查评价及控制对策研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001. QIAN X H. Investigation, evaluation and control countermeasures of agricultural non-point source pollution in hanghu

plain[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.

[13] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6):751-755. CHEN M P, CHEN J N, LAI S Y. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. China Environmental Science, 2006, 26(6):751-755.

[14] 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 nonpoint source pollution on Tuojiang River Basin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18):3654-3665.

[15] 武升, 张俊森, 管飞, 等. 安徽省巢湖流域众兴水库小流域农业面源污染调查与评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2):198-203. WU S, ZHANG J S, GUAN F, et al. Investigation and evaluation of agricultural non-point source pollution in Zhongxing Reservoir small watershed of Chaohu Lake basin, Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2):198-203.

[16] ZHANG P, LU H, CHEN Y, et al. Impact of agricultural labor transfer on agricultural nonpoint source pollution: A case study of Jiangxi, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(3):358-366.

[17] JORDAN C, MCGUCKIN S O, SMITH R V. Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations[J]. Soil Use and Management, 2000, 16(1):27-35.

[18] 陆建忠, 陈晓玲, 肖靖靖, 等. 改进的输出系数法在农业污染源估算中的应用[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2012, 46(3):373-378. LU J Z, CHEN X L, XIAO J J, et al. Application of improved Export Coefficient Model in estimation of agricultural source pollutant[J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences), 2012, 46(3):373-378.

[19] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3):574-581. LONG T Y, LIANG C D, LI J C, et al. Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3):574-581.

[20] 张广纳, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7):1197-1209. ZHANG G N, SHAO J A, WANG J L, et al. Spatial and temporal variations of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7):1197-1209.

[21] 王金亮, 陈成龙, 倪九派, 等. 小流域农业面源污染阻力评价及“源-汇”风险空间格局[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10):216-224, 306. WANG J L, CHEN C L, NI J P, et al. Resistance evaluation and “source-sink” risk spatial pattern of agricultural non-point source pollution in small catchment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10):216-224, 306.

[22] 马广文, 王圣瑞, 王业耀, 等. 鄱阳湖流域面源污染负荷模拟与氮和磷时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5):1285-1291. MA G W, WANG S R, WANG Y Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus and diffuse source pollution load simulation of Poyang Lake Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5):1285-1291.

-
- [23] 邓红波, 庄晓杰, 郑冲祥, 等. 鄱阳湖流域农业面源污染治理技术研究进展[J]. 资源节约与环保, 2020(6):25-26. DENG H B, ZHUANG X J, ZHENG C X, et al. Research progress of agricultural non-point source pollution control technology in Poyang Lake basin[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2020(6):25-26.
- [24] 李翠梅, 张绍广, 姚文平, 等. 太湖流域苏州片区农业面源污染负荷研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3):354-359. LI C M, ZHANG S G, YAO W P, et al. Study on agricultural nonpoint source pollution load of Taihu Lake basin in Suzhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3):354-359.
- [25] 陆沈钧, 姚俊, 曹翔. 浅析太湖流域农业面源污染现状、成因及对策[J]. 水利发展研究, 2020, 20(2):40-44, 53. LU S J, YAO J, CAO X. Analysis on the present situation, causes and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Taihu Basin[J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(2):40-44, 53.
- [26] 甘曼琴, 茆力, 黄瑜, 等. 合肥市环巢湖地区种植业面源污染监测与评价[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(1):28-32. GAN M Q, JIA L, HUANG Y, et al. Monitoring and evaluation of non-point source pollution of planting industry in Chaohu Lake area of Hefei[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, 33(1):28-32.
- [27] 范美蓉, 罗琳, 周凤霞, 等. 洞庭湖区农业面源污染现状及防治对策[J]. 农业环境与发展, 2008, 25(2):88-91. FAN M R, LUO L, ZHOU F X, et al. Present situation and control countermeasures of agricultural non-point source pollution in Dongting Lake area[J]. Agro-Environment & Development, 2008, 25(2):88-91.
- [28] 肖顺勇, 唐建初, 黄新, 等. 洞庭湖区农业面源污染分析及其防治对策[J]. 农业环境与发展, 2008, 25(3):72-75. XIAO S Y, TANG J C, HUANG X, et al. Analysis of agricultural non-point source pollution in Dongting Lake area and its control countermeasures[J]. Agro-Environment & Development, 2008, 25(3):72-75.
- [29] 万年生, 黄活军, 朱坚, 等. 洞庭湖区沙港河流域农业面源污染调查[J]. 湖南农业科学, 2018(6):56-60, 64. WAN N S, HUANG H J, ZHU J, et al. Investigation on agricultural non-point source pollution in Shagang River Basin in Dongting Lake area[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018(6):56-60, 64.
- [30] 胥爱平, 朱坚, 竺传松, 等. 洞庭湖沱江流域农业面源污染调查及防治对策——以南县三仙湖镇为例[J]. 湖南农业科学, 2020(2):40-43. XU A P, ZHU J, ZHU C S, et al. Investigation and control of agricultural non-point source pollution in Tuojiang River Basin of Dongting Lake: Take sanxianhu town of Nanxian County as an example[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020(2):40-43.
- [31] 胡光伟, 毛德华, 李正最, 等. 60年来洞庭湖区进出湖径流特征分析[J]. 地理科学, 2014, 34(1):89-96. HU G W, MAO D H, LI Z Z, et al. Analysis on the runoff characteristics in and out Dongting Lake in recent 60 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(1):89-96.
- [32] 胡光伟, 黄作维, 许滢, 等. 洞庭湖生态经济区水资源与社会经济发展协同度评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5):21-27, 34. HU G W, HUANG Z W, XU Y, et al. Evaluation of synergy degree between water resources system and socio-economic development in Dongting Lake eco-economic zone[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5):21-27, 34.

[33] 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.

[34] 马亚丽, 王兴繁. 基于改进的输出系数模型龙溪河流域氮磷负荷评估[J]. 中国农学通报, 2021, 37(31):70-77. MA Y L, WANG X F. Evaluation of nitrogen and phosphorus load of Longxi River Basin based on the improved export coefficient model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(31):70-77.

[35] 段扬, 蒋洪强, 吴文俊, 等. 基于改进输出系数模型的非点源污染负荷估算——以嫩江流域为例[J]. 环境保护科学, 2020, 46(4):48-55. DUAN Y, JIANG H Q, WU W J, et al. Estimation of non-point source pollution load based on improved export coefficient model—a case study of Nenjiang watershed[J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(4):48-55.

[36] 胡正, 敖天其, 李孟芮, 等. 改进的输出系数模型在缺资料地区面源综合评价[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2):108-114. HU Z, AO T Q, LI M R, et al. Analyzing non-point pollution in areas with scarce data using modified output-coefficient model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2):108-114.

[37] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4):473-477. SHI Z H, CAI C F, DING S W, et al. Research on nitrogen and phosphorus load of agricultural non-point sources in middle and lower reaches of Hanjiang River based on GIS[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(4):473-477.

[38] 尹亚亚. 湖南省农业面源污染治理绩效评价研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. YIN Y Y. Study on performance evaluation of agricultural non-point source pollution control in Hunan Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.

[39] 李娜, 韩维崢, 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.