

引用格式:

徐晓艳, 陈卓, 谢先德, 雷鸣, 罗琳, 汪周园. 株洲市渌水干流总磷的排放特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 76–82.

XU X Y, CHEN Z, XIE X D, LEI M, LUO L, WANG Z Y. Characteristics of the total phosphorus discharge in Zhuzhou Lushui River main stream[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(5): 76–82.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 株洲市渌水干流总磷的排放特征

徐晓艳<sup>1</sup>, 陈卓<sup>2</sup>, 谢先德<sup>2\*</sup>, 雷鸣<sup>2</sup>, 罗琳<sup>2</sup>, 汪周园<sup>3</sup>

(1.湖南农业大学资源学院, 湖南长沙 410128; 2.湖南农业大学环境与生态学院, 湖南长沙 410128; 3.水利部长江水利委员会水文局, 湖北武汉 430010)

**摘要:** 基于株洲市渌水干流区域 2012—2020 年经济社会发展的相关统计数据, 采用排污系数法对总磷(TP)排放数据进行核算与验证, 解析渌水干流 TP 排放的时空特征。结果表明: 2012—2020 年渌水干流 TP 排放量为 605.68~749.63 t, 其中, 农业源 TP 排放量(396.71~535.25 t)最高, 其次是生活源 TP 排放量(195.04~216.82 t); 生猪养殖源 TP 排放占比(30.4%~36.5%)和城镇生活源 TP 排放占比(16.6%~21.2%)较高, 工业源 TP 排放占比(0.2%~0.4%)最小; 醴陵市常住人口数量多, 生产活动以畜禽养殖和种植业为主, 各源 TP 排放占比总体高于渌口区的。综合排放源数据, 建议渌水干流后续应继续加强排放源特别是生活源和畜禽养殖业污水的监管和监察, 通过推进测土配方施肥、优化粪污处理技术、改进污水处理工艺等方式, 多方面实现 TP 的源头消减。

**关键词:** 渌水干流; 磷排放特征; 排污系数法; 排放源; 畜禽养殖

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)05-0076-07

## Characteristics of the total phosphorus discharge in Zhuzhou Lushui River main stream

XU Xiaoyan<sup>1</sup>, CHEN Zhuo<sup>2</sup>, XIE Xiande<sup>2\*</sup>, LEI Ming<sup>2</sup>, LUO Lin<sup>2</sup>, WANG Zhouyuan<sup>3</sup>

(1.College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.College of Environment and Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Hydrological Bureau, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** Based on the regional social and economic statistics of the Lushui River main stream in Zhuzhou from 2012 to 2020, the TP discharge data were calculated and verified by the method of pollutant discharge coefficient, and the spatial and temporal characteristics of TP discharge from each source were analyzed. The results showed that TP discharge in the Lushui River main stream were 605.68-749.63 t from 2012 to 2020. TP discharge from agricultural source(396.71-535.25 t) was the highest, followed by domestic source(195.04-216.82 t). Swine breeding(30.4%-36.5%) and urban domestic source(16.6%-21.2%) accounted for a relatively high proportion of TP discharge, while industrial source contributed the least(0.2%-0.4%). Due to the large number of resident population and the fact that agricultural activities were dominated by farming and breeding, TP discharge of all pollution sources in Liling were higher than those in Lukou. Comprehensive discharge source data suggested that the Lushui River main stream should continue to strengthen the regulation and monitoring of discharge sources, especially domestic sources and livestock farming, and realize the source reduction of TP in an all-round way by promoting soil testing and formula fertilization, optimizing manure treatment technology and

收稿日期: 2023-08-14

修回日期: 2024-08-10

基金项目: 长江生态环境保护修复联合研究(第二期)项目(2022-LHYJ-02-0507-01); 湖南省自然科学基金重大项目(2021JC0001)

作者简介: 徐晓艳(1996—), 女, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事水体磷溯源和控制研究, [xu112@stu.hunau.edu.cn](mailto:xu112@stu.hunau.edu.cn); \*通信作者, 谢先德, 博士, 副教授, 主要从事农业源新型污染物在环境中的迁移、转化和归趋及重金属污染控制等研究, [xd\\_xie@hunau.edu.cn](mailto:xd_xie@hunau.edu.cn)

improving sewage treatment technology.

**Keywords:** Lushui River main stream; phosphorus discharge characteristics; pollution discharge coefficient; discharge source; livestock breeding

随着经济社会的高速发展,人们对含磷产品的需求与日俱增,而未被利用的磷经直接或间接途径被排放到水环境中<sup>[1-3]</sup>,过量的磷促使藻类等浮游生物迅速增殖,诱发水体溶解氧含量的快速降低和水生动植物大量死亡等一系列水生态问题<sup>[4]</sup>。准确掌握区域内各磷排放源的磷排放特征是防控水体磷污染的基础。一般采用直接监测法和经验系数法<sup>[5-11]</sup>对区域总磷(TP)排放量进行定量与溯源。2021年,生态环境部发布了《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》<sup>[12]</sup>(以下简称《手册》),通过运用经验排污系数来核算污染物的排放量,该方法具有输入数据少和超前预见性等优点,受到了广泛关注<sup>[13-15]</sup>。

渌水(113°07'E~114°0'E, 27°33'N~27°52'N)是湘江的一级支流,地处湘赣两省交界地带,是萍乡市和醴陵市两地居民生活、工业及农业用水的主要来源,也是湖南省创建的以打造湘赣边区域合作示范区流域综合治理典范为目标的省级样板河<sup>[16]</sup>。渌水干流水质受周围环境因素影响,全年未稳定达到地表水Ⅱ类水质标准<sup>[17]</sup>。2023年,《株洲市重点流域水生态环境保护规划》强调要实现渌水流域全域水质稳定或优于国家Ⅱ类水标准。此外,面对《长江保护法》实施的新要求和强化长江水生态保护的新任务,《长江生态环境

保护修复“一市一策”驻点跟踪研究工作方案》中提出,渌水流域上游水质不稳定,污染源复杂,严重影响渌水流域水质提升,尤其是TP排放消减有较大提升空间。目前针对株洲市渌水干流(醴陵市、渌口区)TP排放的研究较少,无法精准识别区域各源磷排放的相对贡献,缺乏区域磷排放消减的基础数据。笔者以株洲市2012—2020年国民经济和社会发展的相关数据为基础,结合《手册》中各源的磷排污数据,采用排污系数法核算渌水干流2012—2020年间渌水干流各源磷排放的动态特征,以期对渌水干流水质的改善和总磷的消减工作提供依据。

## 1 污染源 TP 排放量的核算方法

### 1.1 生活源的核算方法

依据2013—2021年《株洲市统计年鉴》(以下简称《年鉴》)中渌口区、醴陵市城镇常住人口数量和当地污水处理厂进出水TP含量,按陈武权等<sup>[18]</sup>的方法计算城镇生活污水TP排放量。

根据《年鉴》中渌水干流农村常住人口数量、生活污水处理行政村占比和《手册》<sup>[12]</sup>中的参数系数计算农村生活源总磷排放量。2012—2020年渌口区 and 醴陵市有污水集中处理设施的行政村在行政村总数中的占比列于表1。

表 1 2012—2020 年渌水干流生活污水被纳入集中处理的行政村占比

Table 1 The proportion of administrative villages in the Lushui River main stream where domestic sewage was included in centralized treatment from 2012 to 2020

地区	生活污水被纳入集中处理的行政村占比/%								
	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
渌口区	2.44	0.81	2.02	2.06	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91
醴陵市	0.00	0.00	0.58	0.58	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06

### 1.2 农业源的核算方法

以《年鉴》中的生猪、肉牛、奶牛、羊、肉鸡、蛋鸡的出栏量和存栏量为基础,按《手册》<sup>[12]</sup>中的参数系数核算禽畜养殖业的TP排放量。各禽畜类别的TP排放系数<sup>[12,18]</sup>如表2所示。

根据农作物总播种面积、园地面积、磷肥和

复合肥折纯量(复合肥中磷肥折纯量为15%<sup>[19]</sup>)及《手册》中农业源产排污系数核算渌水干流区域种植业TP流失量。

根据2012—2020年醴陵市和渌口区水产品产量和《手册》中水产养殖污染物排放系数计算水产养殖业的TP排放量。

表2 不同养殖方式下各禽畜类别的 TP 排放系数

养殖方式	单头或单羽的 TP 排放系数/kg					
	生猪	奶牛	肉牛	蛋鸡	肉鸡	羊
规模化	0.205 1	1.371 6	0.883 7	0.023 8	0.003 3	0.092 7
养殖户	0.094 1	1.617 9	0.588 3	0.004 4	0.001 6	0.092 7

羊的 TP 排放系数参照文献[18]; 其他的 TP 排放系数参照文献[12]。

### 1.3 工业源的核算方法

依据株洲市生态环境局提供的 2017 年实际监测的工业源 TP 排放量与《年鉴》中渌口区、醴陵市工业企业废水排放量, 参照文献[20]的方法, 计算区域工业源 TP 排放量。

## 2 结果与分析

### 2.1 渌水干流生活源 TP 排放量

株洲市渌水干流生活源 TP 排放包括城镇生活源和农村生活源两部分的排放, 核算结果如表 3 所示。从表 3 可知, 2012—2020 年农村生活源 TP

排放量逐年下降, 由 106.94 t 降至 70.33 t; 城镇生活源 TP 排放量为 100.91~138.46 t, 且 2012—2019 年逐渐上升(2017 年外), 但 2020 年 TP 排放量较 2019 年的有较大幅度的下降。从表 4 可知, 2012—2020 年株洲渌水干流生活源 TP 排放量波动较小, 为 195.04~216.82 t, 占各源 TP 总排放量的 28.3%~34.3%, 其中, 城镇和农村生活源的分别为 16.6%~21.2%和 11.4%~17.7%, 可见, 生活源 TP 排放量占比较高, 其对区域水体磷含量的影响不容忽视; 从生活源 TP 排放量的区域分布来看, 醴陵市 TP 排放量是渌口区的 2.6~3.0 倍。

表3 2012—2020年渌水干流生活源 TP 排放量

来源	生活源 TP 排放量/t									
	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	
城镇	100.91	104.28	110.93	118.78	128.79	125.95	135.30	138.46	124.71	
农村	106.94	105.08	101.14	97.68	88.03	86.32	79.34	77.52	70.33	

表4 2012—2020年渌水干流不同区域不同源的 TP 排放量

年份	生活源 TP 排放量												各源 TP 总排放量
	生活源 TP 排放量			种植业 TP 流失量			养殖业 TP 排放量			工业源 TP 排放量			
	醴陵市	渌口区	小计	醴陵市	渌口区	小计	醴陵市	渌口区	小计	醴陵市	渌口区	小计	
2012	154.40	53.45	207.85	38.71	33.69	72.40	238.77	85.54	324.31	0.94	0.21	1.15	605.71
2013	155.19	54.17	209.36	38.74	33.48	72.22	255.74	91.28	347.02	1.09	0.24	1.33	629.93
2014	155.86	56.21	212.07	38.54	33.45	71.99	281.38	102.00	383.38	0.97	0.96	1.93	669.37
2015	157.86	58.60	216.46	38.68	33.40	72.08	300.94	106.64	407.58	1.14	1.08	2.22	698.34
2016	156.79	60.03	216.82	38.57	32.06	70.63	316.36	118.37	434.73	1.25	0.51	1.76	723.94
2017	158.38	53.89	212.27	38.57	30.72	69.29	339.98	125.98	465.96	1.24	0.88	2.12	749.64
2018	158.53	56.11	214.64	35.17	31.33	66.50	291.20	122.16	413.36	1.11	1.12	2.23	696.73
2019	158.56	57.42	215.98	34.46	28.33	62.79	264.71	108.03	372.74	1.13	1.24	2.37	653.88
2020	146.06	48.98	195.04	33.42	28.11	61.53	256.44	98.80	355.24	1.24	0.81	2.05	613.86

### 2.2 渌水干流农业源 TP 排放量

农业源 TP 排放量包括种植业 TP 流失量和养殖业 TP 排放量两部分, 2012—2020 年渌水干流农业源 TP 排放总量为 396.71~535.25 t, 占各源 TP 总排放量的 65.5%~71.4%(表 4), 表明该区域 TP 排放量主要受农业生产活动的影响。从表 4 可

知, 2012—2020 年渌水干流区域种植业 TP 流失量从 72.40 t 降低至 61.53 t, 降幅达 15.0%。

2012—2020 年养殖业 TP 的排放量为 324.31~465.96 t, 占各源 TP 总排放量的 53.5%~62.2%(表 4), 表明养殖业磷排放对干流区域 TP 排放量的影响最明显。表 5 所示为渌水干流禽畜养殖业各养

殖类别 TP 排放量。从表 5 可知：生猪养殖 TP 排放量最大，为 183.98~272.29 t，占养殖业 TP 排放总量的 52.2%~61.5%，占渌水干流各源 TP 总排放量的 30.2%~36.5%；禽类(肉鸡和蛋鸡)养殖次之，排放量为 57.05~96.72 t，占渌水干流各源 TP 总排放量的 9.4%~14.4%，可见，需特别关注生猪和禽

类养殖对渌水干流 TP 排放量的影响；水产养殖 TP 排放量最低，仅占养殖业 TP 排放总量的 1.5%~2.0%；养殖业 TP 排放的峰值出现在 2017 年，高达 465.96 t。从表 4 还可知，醴陵市养殖业 TP 排放量高于渌口区的，其 TP 排放量占渌水干流区域养殖业 TP 排放总量的 70.4%~73.8%。

表 5 2012—2020 年渌水干流养殖业不同类别的 TP 排放量

Table 5 TP discharge from different breeding type in the Lushui River main stream from 2012 to 2020

来源	养殖业 TP 排放量/t								
	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
肉牛	9.60	10.63	11.30	11.86	12.64	12.64	4.94	5.54	5.53
奶牛	33.83	34.37	35.14	36.64	36.15	37.90	24.38	24.78	23.77
生猪	183.98	197.45	222.73	232.63	244.44	272.29	254.08	200.68	185.57
羊	33.83	35.54	37.11	38.56	38.90	39.48	44.20	46.60	44.56
肉鸡	15.00	15.00	14.72	16.43	23.11	18.01	12.67	17.14	17.58
蛋鸡	42.05	47.80	55.95	64.84	72.78	78.71	66.15	70.80	71.08
水产养殖	6.02	6.23	6.43	6.62	6.71	6.93	6.94	7.20	7.15
合计	324.31	347.02	383.38	407.58	434.73	465.96	413.36	372.74	355.24

### 2.3 渌水干流工业源 TP 排放量

2012—2020 年渌水干流区域工业源 TP 排放量为 1.15~2.37 t(表 4)。2019 年渌口区工业源 TP 排放量达 1.24 t，但 2012 年其 TP 排放量仅 0.21 t。醴陵市外排废水量较稳定，历年 TP 排放量最大仅相差 0.31 t。与其他排放源相比，工业源 TP 排放量最低，仅占各源 TP 总排放量的 0.2%~0.4%，说明工业源 TP 在区域 TP 排放量中的占比最小。

## 3 与相关磷溯源数据的比较分析

为验证本研究中核算结果的准确性和科学性，将核算的 2020 年的数据与《2020 年湖南省环境统计年报》的相关数据进行比较(表 6)。2020 年湖南省农业源 TP 排放量为 17 023.7 t，按照株洲市

的农业生产总值占全省的比重，可初步估算株洲市农业源 TP 排放量约为 1 215.98 t，占株洲各源 TP 总排放量的约 66.1%。笔者核算得出 2020 年渌水干流区域农业源占各源 TP 总排放量的 67.9%，与株洲农业源的排放量占比大致相当。渌水干流区域生活源 TP 排放量占全部来源的 31.8%，与株洲全市生活源对 TP 排放量的占比(33.7%)大致相当。总体而言，2020 年渌水干流中生活源、农业源和工业源对 TP 总排放量相对贡献的核算结果与《2020 年湖南省环境统计年报》中相应的各源 TP 排放量占比的差值均小于 2.0%。这说明笔者的核算方法和核算流程具有合理性，能反映不同来源磷对渌水磷贡献的基本情况。

表 6 核算的渌水干流和株洲市 2020 年各排放源 TP 排放量及其占比

Table 6 The TP discharge of each discharge source and their proportion in the calculated Lushui River main stream and Zhuzhou City in 2020

区域	TP 排放量/t				TP 排放量占比/%		
	生活源	农业源	工业源	总量	生活源	农业源	工业源
株洲市	620.06	1 215.98	3.21	1 839.25	33.7	66.1	0.2
渌水干流	195.04	416.77	2.05	613.86	31.8	67.9	0.3

株洲市的数据为《2020 年湖南省环境统计年报》中的相关数据计算所得。

已有的研究<sup>[21-24]</sup>证实了农业源 TP 是中国大部分河流和湖泊磷的主要来源。彭亚辉等<sup>[25]</sup>研究表

明，农业生产是湘江流域长株潭段水体磷的主要来源。珠江发源于云贵高原，流域人口密集，种

养殖业发达, 2011年珠江流域农业源 TP 排放量占各源 TP 总排放量的 64.4%, 其中, 种植业和养殖业 TP 排放量分别占 35.6%和 28.8%<sup>[21]</sup>。天目湖流域经济以种植业和旅游业为主, 农业源 TP 排放量占比达到 68.9%<sup>[24]</sup>。涿水流域农业源磷排放量占所有来源磷排放量的比例与珠江流域和天目湖流域的大致相当, 表明种植业无序的磷排放较工业源和生活源的管理难度更高。涿水同为湘江的一级支流, 农业是涿水流域的第一产业, 农业源 TP 排放量占全部磷来源 TP 排放量的 98.5%, 其中, 禽畜养殖产值占涿水流域农业总产值的 50%以上, 禽畜养殖造成的磷排放问题突出<sup>[23]</sup>。可见, 未来区域磷污染的防控应特别关注农业源磷的排放, 特别是禽畜养殖业磷的消减。

#### 4 结论与讨论

本研究中, 笔者采用排污系数法核算得出, 2012—2020年株洲涿水干流各源 TP 总排放量为 605.71~749.64 t, 其中, 农业源 TP 和生活源 TP 是磷的主要来源。

养殖业 TP 排放量占各源 TP 总排放量的 53.5%~62.2%, 其中生猪养殖是株洲市农业经济的第一大产业<sup>[26]</sup>, 其 TP 排放量占各源 TP 总排放量的 30.2%~36.5%。2018年非洲猪瘟导致生猪养殖规模缩减, 同时规模化养殖的比例持续提升<sup>[27]</sup>, 生猪养殖由 2017年的 180.7万头减少到 2020年的 106.7万头<sup>[26]</sup>; 此外, 受奶业持续冲击及农业机械化改革的影响, 涿水干流流域牛的养殖数量由 2017年的 4.30万头降至 2020年的 2.34万头<sup>[28]</sup>, 生猪、牛养殖产生的磷排放量在 2017年后均急剧下降。这导致自 2018年起, 株洲涿水干流区域养殖业 TP 排放量呈现出递减趋势。涿水干流区域畜禽养殖粪污处理方式主要有厌氧发酵后沼液还田/还林或者直接贮存后肥水还田/还林<sup>[29-30]</sup>, 但仍存在处理成本高, 处理技术不完善, 排放不达标、不规范, 部分散养户养殖污水直排水域等问题。未来磷减排应当重视禽畜养殖业磷的排放管理, 包括: ①推进涿水干流及两岸禁养区规模化畜禽养殖场的退养, 加强区域内小散户养殖的监督管理, 进一步提高规模化养殖的比例; ②建设生物发酵床养殖技术和生态沟渠等<sup>[31-32]</sup>, 集中处理畜

禽粪污; ③持续提高种养结合的资源化应用效率, 如大力推广具有醴陵市区域特色的油茶林和果园等种植项目<sup>[29]</sup>, 建设绿色生态畜禽养殖-特色种植经济圈, 实现粪肥归田<sup>[33]</sup>, 实现畜禽粪污无公害化处理和种养的良性循环。

2012—2020年种植业 TP 流失量逐年下降(2015年除外), 但 2020年种植业 TP 流失量仍有 61.53 t。科学施肥理念的普及以及政府对科学施肥技术的大力推广<sup>[34]</sup>, 是区域种植业磷流失量消减的主要原因。未来应继续推进测土配方施肥, 使土壤氮、磷、钾和中微量元素等养分结构更加合理, 着力推广科学施肥、精准施肥、绿色施肥等技术, 推进机械施肥、水肥一体、多元替代<sup>[35]</sup>, 实现主要农作物测土配方施肥技术覆盖率和主要粮食作物化肥利用率稳步提高, 达到化肥减量增效的目标。另一方面是要推进节水灌溉技术的普及<sup>[33]</sup>, 减少化肥流失, 加强涿水流域种植业面源 TP 流失的综合治理。

农村和城镇常住人口数量与 TP 排放量密切相关。随着涿水干流流域城镇化率由 2012年的 45.2%提高到 2020年的 61.2%(数据来自《年鉴》), 城镇生活源 TP 排放量从 2012年的 100.91 t 增加至 2020年的 124.71 t。城镇生活污水 TP 排放量与污水处理工艺相关<sup>[36]</sup>。截至 2020年株洲涿水干流区域已建成 3座污水处理厂(醴陵市 1座、涿口区 2座), 可满足城区生活污水的处理要求, 但仍存在部分老城区和城乡结合部管网收集不到位、雨污分流不彻底等问题<sup>[37]</sup>。未来城镇生活源磷的消减可采取以下措施: ①扩大污水处理厂的覆盖范围, 加大截污和治污力度; ②优化污水处理厂除磷工艺, 如采用新型“七段式”生化组合工艺和曝气缺氧/多级 AO 工艺等<sup>[38-39]</sup>, 实现出水磷含量的持续降低; ③涿水干流区域 3座城镇污水处理厂的出水均执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准, 但随着人们对长江流域水质的重视, 各地相继提出更严格的标准, 如无锡新区要求污水厂出水 TP 质量浓度 $\leq 0.2$  mg/L, 涿水干流区域应考虑结合实际情况提升污水处理厂出水标准; 4) 对城市污水处理厂服务片区实施“一厂一策”系统化整治, 实现“污水不入河、外水不进管、进厂高含量、减排高效能”<sup>[40]</sup>。

《年鉴》数据显示, 渌水干流区域农村人口数由 2012 年的 68.4 万减少至 2020 年的 44.8 万, 农村生活源 TP 排放量随着农村常住人口的降低而逐年下降, 但 2020 年农村生活源 TP 排放量仍有 70.33 t, 存在较大的消减空间。醴陵市部分城镇污水处理厂运行存在进水 TP 含量偏低、部分管网漏损破坏严重和雨污分流改造滞后等问题<sup>[41]</sup>。此外, 株洲市农村厕改工作基本完成, 但后续运行过程仍需重点关注。未来渌水干流区域农村生活源 TP 排放量的消减应实现: ①以该区域周边村庄和乡镇政府驻地为重点, 梯次推进农村生活污水治理, 推动城镇污水处理设施和服务向城镇近郊农村延伸及保障相关设施正常运行; ②加大厕改后对卫生厕所使用规范的宣传, 完善粪便收集和运输管理机制, 增加管护费用投放及跟进监管督导<sup>[42]</sup>, 稳步解决农村污水直排入河等环境问题。

本研究中的核算方法和参数选择还存在进一步优化空间, 主要包括: ①部分参数应根据株洲渌水流域的真实情况作进一步的优化, 如种植业单位面积磷肥施用量、禽畜养殖业各禽畜类别的 TP 排污系数等; ②该地区部分工业园区污水和生活污水一并进入城镇生活污水处理厂, 生活污水处理厂进出水 TP 含量受工业园区和生活污水的共同影响, 存在城镇生活源磷排放量核算偏差; ③部分村镇有集中式垃圾处理设施, 但相关磷排放的数据缺失, 因而核算时缺少集中式垃圾处理设施磷排放量的数据。

#### 参考文献:

- [1] ABELL J M, ÖZKUNDAKCI D, HAMILTON D P, et al. Latitudinal variation in nutrient stoichiometry and chlorophyll-nutrient relationships in lakes: a global study[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2012, 181(1): 1–14.
- [2] 刘丹丹, 乔琦, 李雪迎, 等. 沱江流域总磷空间排放特征及影响因素分析[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(2): 449–458.
- [3] 刘婷, 阿永玺, 李松涛, 等. 我国畜禽养殖减抗探索及国外经验启示[J]. *北方牧业*, 2023(5): 10–12.
- [4] HAN C N, ZHENG B H, QIN Y W, et al. Impact of upstream river inputs and reservoir operation on phosphorus fractions in water-particulate phases in the Three Gorges Reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 1546–1556.
- [5] 陈武权, 杨庆榜, 杨斌. 基于产排污系数法的鄱阳湖滨湖区总磷排放量测算研究[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(7): 960–965.
- [6] 乔琦, 白璐, 刘丹丹, 等. 我国工业污染源产排污核算系数法发展历程及研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1783–1794.
- [7] HAN Y, GUO X, JIANG Y F, et al. Environmental factors influencing spatial variability of soil total phosphorus content in a small watershed in Poyang Lake Plain under different levels of soil erosion[J]. *Catena*, 2020, 187: 104357.
- [8] MOCKLER E M, DEAKIN J, ARCHBOLD M, et al. Sources of nitrogen and phosphorus emissions to Irish rivers and coastal waters: estimates from a nutrient load apportionment framework[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601: 326–339.
- [9] KOWALKOWSKI T, PASTUSZAK M, IGRAS J, et al. Differences in emission of nitrogen and phosphorus into the Vistula and Oder basins in 1995–2008: natural and anthropogenic causes(MONERIS model)[J]. *Journal of Marine Systems*, 2012, 89(1): 48–60.
- [10] ARNOLD J G, ALLEN P M, BERNHARDT G. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 142(1/2/3/4): 47–69.
- [11] ZHAO Z Q, QIN W, BAI Z H, et al. Agricultural nitrogen and phosphorus emissions to water and their mitigation options in the Haihe Basin, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 262–272.
- [12] 生态环境部. 排放源统计调查产排污核算方法和系数手册[EB/OL]. (2021–06–11)[2023–06–20]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk01/202106/W020210624327149500026.pdf>.
- [13] DE PAULA FILHO F J, DE SÁ SAMPAIO A D, MENEZES J M C, et al. Land uses, nitrogen and phosphorus estimated fluxes in a Brazilian semi-arid watershed[J]. *Journal of Arid Environments*, 2019, 163: 41–49.
- [14] TEUBNER JUNIOR F J, LIMA A T M, BARROSO G F. Emission rates of nitrogen and phosphorus in a tropical coastal river basin: a strategic management approach[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(12): 747.
- [15] 原千慧. 北运河流域非点源污染解析与健康综合评估研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- [16] 湖南省水利厅. 醴陵: 渌水变绿 开启协同治水新篇章[EB/OL]. (2020–12–01)[2023–06–20]. [https://slt.hunan.gov.cn/slt/ztzl/qmtxhzz/c102489/202012/t20201201\\_29151451.html](https://slt.hunan.gov.cn/slt/ztzl/qmtxhzz/c102489/202012/t20201201_29151451.html).
- [17] 湖南省水利厅. 株洲: “一江两水”水质越来越好[EB/OL].(2022–08–05)[2023–06–20]. [https://slt.hunan.gov.cn/xxgk/slxw/sxsl/202208/t20220804\\_27575179.html](https://slt.hunan.gov.cn/xxgk/slxw/sxsl/202208/t20220804_27575179.html).

- [18] 李丹阳, 王娟, 袁京, 等. 不同饲养方式下的羊产排污系数对比研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 672-681.
- [19] 贾小红. 有机肥料加工与施用[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [20] 许友泽. 洞庭湖总磷污染源与成因解析[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.
- [21] XU P, LIN Y H, YANG S S, et al. Input load to river and future projection for nitrogen and phosphorous nutrient controlling of Pearl River Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(6): 1359-1371.
- [22] 李昆明, 蓝月存, 汝旋, 等. 南流江流域氨氮和总磷的污染源排放特征及水质管控成效分析[J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(4): 685-694.
- [23] 卢芳雨. 洙水流域非点源污染模拟研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [24] 刘同岩, 杨驰浩, 周宇澄, 等. 天目湖流域氮磷面源污染现状分析[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(12): 2641-2643.
- [25] 彭亚辉, 周科平, 蒋俊伟. 湘江流域长株潭段水污染负荷时空分布规律及成因[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 108-116.
- [26] 王军, 尹照. 株洲市“非凡十年”的株洲农业农村答卷: 书写稳产保供的“金色答卷”[EB/OL]. (2022-10-18) [2023-06-20]. [https://agri.hunan.gov.cn/xxgk/gzdt/sxdt\\_1/202210/t20221018\\_29072832.html](https://agri.hunan.gov.cn/xxgk/gzdt/sxdt_1/202210/t20221018_29072832.html).
- [27] 株洲市统计局. 艰苦奋斗 70 载株洲农村焕新颜[EB/OL]. (2019-10-10) [2023-06-20]. <http://www.zhuzhou.gov.cn/c15211/20191108/i1189539.html>.
- [28] 殷天舸. 中国肉牛养殖模式及牛肉供应结构变化[EB/OL]. (2022-03-29)[2023-06-20]. <http://ygsite.cn/show.asp?trcms=1&id=81510&pageno=2>.
- [29] 王晋, 黄燕, 李文峰. 【株洲市】醴陵推动畜禽粪污无害化利用, 发展循环农业种养效益同步共增[EB/OL]. (2021-10-15) [2023-06-20]. [http://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/szdt/202110/t20211015\\_20765775.html](http://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/szdt/202110/t20211015_20765775.html).
- [30] 吴文念, 黄俊文, 王鹏. 溇口三农畜禽粪污变废为宝实现生态循环利用[EB/OL]. (2021-11-19) [2023-06-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1716852105317604687&wfr=spider&for=pc>.
- [31] 桂平婧, 王丰, 李善朴, 等. 基于阶段输出系数模型的农业非点源污染负荷估算与评价: 以四川省为例[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(1): 110-118.
- [32] 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.
- [33] 吕石磊, 卢思华, 魏志威, 等. 基于双频蝙蝠算法的树状灌溉管网规划[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(1): 99-106.
- [34] 杨雪, 高倩, 蔡林志, 等. 新型肥料施用对马铃薯生长和产量及品质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 550-555.
- [35] 农业农村部. 到 2025 年化肥减量化行动方案[EB/OL]. 北京: 农业农村部, 2022(2022-11-18)[2023-06-20]. <http://www.moa.gov.cn/zxfile/reader?file=http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/P020221201420243966057.docx>.
- [36] LIU D D, BAI L, QIAO Q, et al. Anthropogenic total phosphorus emissions to the Tuojiang River Basin, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294: 126325.
- [37] 生态环境部. 湖南省株洲市污水管网改造滞后雨污混流水直排湘江[EB/OL].(2021-05-17) [2023-09-01]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/zysthjbhdc/dclj/202105/t20210517\\_833115.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/zysthjbhdc/dclj/202105/t20210517_833115.shtml).
- [38] 鲍任兵, 高廷杨, 宫玲, 等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20.
- [39] 戴仲怡, 王雪, 彭建国, 等. 曝气缺氧/多级 AO 工艺用于大型污水厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 50-54.
- [40] 住房和城乡建设部, 生态环境部, 发展和改革委员会. 城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)[EB/OL]. (2019-04-29) [2023-09-01]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-09/29/content\\_5434669.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-09/29/content_5434669.htm).
- [41] 熊艳. 驻醴株洲市十六届人大代表开展立法调研[EB/OL]. (2023-06-28) [2023-09-01]. <https://liling.rednet.cn/content/646740/62/12805128.html>.
- [42] 于明梅. 农村厕改后续管理存在问题及对策研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2019(11): 40.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正