



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于等标污染负荷强度的海南省农村面源污染特征研究

丘丽清, 吴根义, 李想, 余磊, 符致钦

引用本文:

丘丽清, 吴根义, 李想, 余磊, 符致钦. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0697>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

苏州市农业面源污染源强解析与评价

姜滢, 王子博, 尤悦文, 徐培杰, 陈重军

农业资源与环境学报. 2015(4): 363–369 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0012>

不同来源的非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响——以巢湖流域为例

冯雪娇, 林晨, 熊俊峰, 陈曦, 吴紫静, 马荣华

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 64–75 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0838>

四川凯江流域农村非点源污染特征分析

张鹏远, 苟楚璇, 巫杨, 张德, 李飞, 牟子申

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 398–404 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0307>

CAST一体化设备处理农村生活污水工况研究

杨大川, 黄治平, 郑宏艳, 米长虹, 丁健

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 575–583 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0142>

惠州市畜禽养殖污染耕地承载负荷估算及风险评价

宋江燕, 吴根义, 苏文幸, 余磊, 马晓蕊, 柳王荣, 袁俊杰

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 191–197 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0312>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

基于等标污染负荷强度的海南省农村面源污染特征研究

丘丽清¹, 吴根义¹, 李想¹, 余磊¹, 符致钦^{2*}

(1.生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510535; 2.海南省生态环境监测中心, 海口 570100)

摘要:为全面掌握海南省农村面源污染状况,探讨农村面源污染强度及特征,本研究采用清单分析法,基于等标污染负荷强度核算和评价了2017年海南省18个市(县)种植、畜禽养殖、水产养殖、农村生活污水的化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)排放量及排放强度,利用ArcGIS软件进行聚类分析,划分污染负荷强度分区和污染控制分区。结果表明,COD、TN、TP排放量最大值均出现在文昌,最小值均出现在五指山。海南省农村面源COD、TN、TP的排放强度比全国排放强度分别高1.03、3.74、3.59倍。各污染类型等标污染负荷强度表现为种植>农村生活污水>水产养殖>畜禽养殖,文昌为水产养殖污染型,临高为水产养殖和种植污染型,儋州、琼海、东方、定安、屯昌、澄迈、昌江、白沙、保亭、五指山、琼中为种植污染型,海口、三亚、万宁、乐东、陵水为种植和农村生活污水污染型。通过聚类分析发现,文昌、海口、临高、万宁为高度负荷区,儋州、琼海、东方、定安、屯昌、澄迈、昌江、白沙、三亚、乐东、陵水、保亭为中度负荷区,五指山、琼中为低度负荷区。研究表明,2017年海南省农村面源污染防治形势严峻,种植是海南省农村面源污染物的首要来源。

关键词:农村面源污染;清单分析法;等标污染负荷强度;海南省;种植;畜禽养殖;水产养殖;农村生活污水

中图分类号:X52;X71

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)01-0055-09

doi: 10.13254/j.jare.2021.0697

Characteristics of agricultural non-point source pollution in Hainan rural area based on equal standard pollution load intensity

QIU Liqing¹, WU Genyi¹, LI Xiang¹, SHE Lei¹, FU Zhiqin^{2*}

(1. South China Institute of Environmental Sciences, MEE, Guangzhou 510535, China; 2. Hainan Monitoring Center of Ecological Environment, Haikou 570100, China)

Abstract: To comprehensively understand the current situation of agricultural non-point source (ANPS) pollution in the Hainan rural area, the intensity and characteristics of ANPS pollution were evaluated. Using an inventory analysis and equal standard pollution load intensity, this study calculated and analyzed the chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) emissions from crop farming, livestock and poultry breeding, aquaculture, and rural domestic sewage in 18 districts of Hainan Province in 2017. In addition, the ArcGIS software was used for cluster analysis to divide the pollution load intensity zones and pollution control zones. The results showed that the maximum discharge of COD, TN, and TP appeared in Wenchang, and the minimum discharge was observed in Wuzhishan. The emission intensities of COD, TN, and TP of Hainan Province were 1.03, 3.74, and 3.59 times higher than the national average, respectively. The pollution sources in descending order of equal standard pollution load intensity were crop farming, rural domestic sewage, aquaculture, livestock and poultry breeding. The major types of pollution in Wenchang were aquaculture, aquaculture and planting in Lingao, planting in Danzhou, Qionghai, Dongfang, Ding'an, Tunchang, Chengmai, Changjiang, Baisha, Baoting, Wuzhishan, and Qiongzong; and planting and rural domestic sewage in Haikou, Sanya, Wanning, Ledong, and Lingshui. Based on cluster analysis, Wenchang, Haikou, Lingao, and Wanning were classified as high-load areas; Danzhou, Qionghai, Dongfang, Ding'an, Tunchang, Chengmai, Changjiang, Baisha, Sanya,

收稿日期: 2021-10-13 录用日期: 2021-12-09

作者简介: 丘丽清(1992—), 女, 广东梅州人, 本科, 工程师, 主要从事农村环境保护研究。E-mail: qlqsnu@163.com

*通信作者: 符致钦 E-mail: 940218061@qq.com

基金项目: 公益性科研院所基本科研业务费专项(PM-zx097-202104-121)

Project supported: The Fundamental Research Funds for Public Welfare Research Institutes(PM-zx097-202104-121)

Ledong, Lingshui, and Baoting were classified as medium load areas, and Wuzhishan and Qiongzong were categorized as low-load areas. In 2017, the prevention and control of ANPS pollution in Hainan Province were severe. Planting was the primary source of ANPS pollution in Hainan Province.

Keywords: agricultural non-point source pollution; inventory analysis; equal standard pollution load intensity; Hainan Province; crop farming; livestock and poultry breeding; aquaculture; rural domestic sewage

农村面源污染又称农村非点源污染,是指在农业生产和生活活动中溶解的或固体的污染物,如氮、磷、农药及其他有机或无机污染物质从非特定的地域通过地表径流、农田排水和地下渗漏进入水体引起水质污染的过程^[1]。典型的农村面源污染来源包括农田种植(化肥使用和秸秆遗弃等)、农村生活(生活垃圾、生活污水和人粪尿)、畜禽养殖、水产养殖等^[1-4]。目前,在点源污染得到有效控制和管理的情况下,面源被认为是影响世界各地水生态环境的关键因素^[5-6],其中农村非点源污染影响尤为突出^[7-8]。在美国,60%左右的地表水受非点源污染影响^[9],在欧盟和德国,农业对地表水非点源污染的贡献分别约为55%和48%^[10],在中国,农村面源是造成我国水环境污染的主要来源,据《第二次全国污染源普查公报》结果显示,农村面源化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)排放分别占地表水体污染总负荷的73.06%、61.20%和78.92%。

海南省是我国最大的热带宝地,农业资源丰富,但农业发展模式仍呈现高产、低效、高投入等特征,且随着农村城镇化进程和农村生活方式的转变,农村生活用水量大幅增加,由此带来的农村面源污染对全省地表水环境影响日益突出。《海南省第二次全国污染源普查公报》结果显示,农村面源产生的COD、TN、TP分别占全省总排放量的68.65%、75.10%和85.16%,农村面源治理已成为海南省提高水环境质量的关键突破口。当前,已有学者从化肥农药施用强度、畜禽粪污排放强度等角度剖析了海南省农业面源时空分布特征^[11-12],但均未分析水产养殖和农村生活污水对其产生的影响,且基于海南省污染负荷核算的农村面源污染空间分布特征研究鲜见报道。关于农业面源污染负荷核算与评价,国内学者采用较多的方法有输出系数模型法^[13-15]、清单分析法^[16-18]、等标污染负荷法^[17-19],但基于污染物排放量的等标污染负荷法难以反映国土面积等因素对污染程度的影响。本研究以海南省为研究对象,在采用清单分析法核算污染负荷的基础上,引入等标污染负荷强度,在同一尺度下分析

评价农村面源污染物排放强度,进而识别主要污染类型,并运用ArcGIS软件划分污染负荷强度分区和污染控制分区,最后提出农村面源污染分类控制对策。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

海南省位于我国最南端,陆地(包括海南岛和西沙、中沙、南沙群岛)总面积3.5万km²,海域面积约200万km²,下辖19个市(县),常住人口1 008.12万。海南岛以五指山、鹦歌岭为隆起核心,向外围逐级下降,由山地、丘陵、台地、阶地、平原构成明显的环状地貌梯级结构。山地和丘陵占全岛面积的38.7%,台地和阶地占49.5%,环岛滨海平原占11.2%。由于地势中部高四周低,海南岛河流水系呈辐射状,全岛独流入海河流共154条,其中38条集水面积超100 km²。海南岛属热带季风气候,全年暖热,雨量充沛,年均温度22~27℃,年均降雨量在1 600 mm以上,东湿西干气候明显。

1.2 研究方法

本研究采用清单分析法、等标污染负荷强度和聚类分析法对2017年海南省农村面源污染状况进行核算与评价。结合海南省实际情况,将海南省农村面源污染分为种植、畜禽养殖、水产养殖、农村生活污水四种类型,污染物包括COD、TN和TP。由于三沙市农村面源污染物排放量近乎为零,笔者未将其纳入本研究。

1.2.1 清单分析法

以市(县)为单位,采用清单分析法建立产排污清单,以此估算各市(县)农村面源污染物年排放量,计算方法如下:

$$Q_i = Q_{li} + Q_{ri} + Q_{ai} + Q_{di} \quad (1)$$

式中: Q_i 为农村面源污染物*i*的年排放量,t; Q_{li} 、 Q_{ri} 、 Q_{ai} 、 Q_{di} 分别为畜禽养殖、种植、水产养殖、农村生活污水的污染物*i*的年排放量,t。

$$Q_{li} = XQ_j \times \alpha_{i,j} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: XQ_j 为某一畜禽类型*j*的产生基数,头(只); $\alpha_{i,j}$ 为某一畜禽类型*j*的污染物*i*的年排放系数,kg·头⁻¹

或 $\text{kg}\cdot\text{只}^{-1}$ 。

$$Q_n = NT_k \times F_{av,k} \times \gamma_{i,k} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: NT_k 为某一种植土地类型 k 的面积, hm^2 ; $F_{av,k}$ 为某一种植土地类型 k 的年施肥强度, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $\gamma_{i,k}$ 为某一种植土地类型 k 的污染物 i 的种植流失系数, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

$$Q_{ai} = YZ_m \times \delta_{i,m} \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中: YZ_m 为某一水产养殖类型 m 增产量, kg ; $\delta_{i,m}$ 为某一水产养殖类型 m 的污染物 i 的年排污系数, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

$$Q_{di} = NP \times \varepsilon_i \times \lambda_i \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中: NP 为农村常住人口数,人; ε_i 为污染物 i 的人均年产污系数, $\text{g}\cdot\text{人}^{-1}$; λ_i 为污染物 i 的综合去除率,%。

上述参数通过《第二次全国污染源普查农业源系数手册》^[20]《第二次全国污染源普查生活污染源产排污系数手册(试用版)》和海南省典型区域调研结果确定。

1.2.2 等标污染负荷强度

农村面源污染物排放分散,尽管排放总量相同,但对应排放的国土面积大小不同,其对环境的影响和污染程度存在差别,因此采用排放强度来表征农村面源污染程度比单纯用排放量更准确。为了将污染物排放强度转化为统一可比的量,本研究在前人研究^[16-19]的基础上引入等标污染负荷强度,即单位国土面积所含污染物稀释至环境质量控制标准所需的水量,以便于在同一尺度下比较分析农村面源污染物对环境污染的影响程度。计算公式如下:

$$I_i = \frac{Q_i}{A} \quad (6)$$

式中: I_i 为污染物 i 的排放强度, $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$; Q_i 为污染物 i 的年排放量, t ; A 为某市(县)的计算面积(由土地面积扣除城区和自然林地面积后所得), km^2 。海南省各市(县)面积计算参数见表1。

$$M_i = \frac{I_i}{C_0} \quad (7)$$

式中: M_i 为污染物 i 的等标污染负荷强度, $10^6\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$; C_0 为污染物 i 基于环境质量功能分区的目标控制类别标准值,统一取《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准值, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

$$M_n = \sum_{i=1}^n M_i \quad (8)$$

式中: M_n 为污染源的等标污染负荷强度, $10^6\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$; n 为污染物种类。

$$M = \sum_{n=1}^m M_n \quad (9)$$

式中: M 为区域的等标污染负荷强度, $10^6\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$; m 为区域污染源个数。

表1 海南省各市(县)面积计算参数

Table 1 Calculation parameters of the area in 18 districts of Hainan Province

行政区 District	土地面积 Land area/ km^2	城区面积 Urban area/ km^2	自然林地面积 Natural woodland area/ km^2
海口	2 305	562.40	14.25
三亚	1 915	188.00	630.23
儋州	3 265	253.95	81.92
五指山	1 129	60.00	629.21
琼海	1 692	40.20	24.46
文昌	2 485	84.00	22.02
万宁	1 884	260.00	301.22
东方	2 256	53.57	629.29
定安	1 187	16.00	12.08
屯昌	1 232	25.00	29.14
澄迈	2 045	10.90	37.66
临高	1 317	14.60	2.99
白沙	2 117	5.70	783.78
昌江	1 610	19.20	488.86
乐东	2 763	24.00	841.45
陵水	1 128	17.64	249.70
保亭	1 161	15.73	344.42
琼中	2 706	20.17	952.34
海南省	34 197	1 671.06	6 075.02
全国	9 734 230	198 357	2 076 883

$$K = \frac{M_n}{M} \times 100\% \quad (10)$$

式中: K 为污染源在区域中的等标污染负荷强度占比。

1.2.3 聚类分析法

本研究基于等标污染负荷强度核算结果,运用ArcGIS 10.2 分组分析工具进行聚类分析,直接实现农村面源污染负荷强度分布空间可视化。该工具根据要素属性和可选的空间/时态约束对海南省各市(县)农村面源等标污染负荷强度的相似性和差异性进行区分,当指定了无空间约束时,该工具使用 K 均值算法查找分组,由于该算法属于NP(非确定性多项式)难题,软件将采用启发式贪婪算法对要素进行分组,启发式贪婪算法始终收敛于局部最小值,从而使各组的每一个组中要素实现差异最小化,进而划分污染负荷强度分区。

1.3 数据来源

海南省各市(县)国土面积、城区面积等基础数据来自《海南统计年鉴2018》;海南省种植、畜禽养殖以及农村生活活动指标来自农业部门,水产养殖活动指标来自渔业部门;海南省农村面源污染物排放数据来自

《海南省第二次全国污染源普查公报》;全国农村面源污染物排放数据来自《第二次全国污染源普查公报》。

2 结果与分析

2.1 海南省农村面源污染物排放量分析

海南省各市(县)农村面源COD、TN、TP排放量见图1,文昌、海口、儋州、万宁、澄迈、琼海6个市(县)的COD排放量均高于全省平均排放量;文昌、儋州、海口、琼海、临高、万宁、澄迈、乐东8个市(县)的TN排

放量均高于全省平均排放量;文昌、儋州、海口、临高、琼海、万宁6个市(县)的TP排放量均高于全省平均排放量;COD、TN、TP排放量最大值均出现在东部沿海地区文昌,最小值均出现在中部山区五指山。结合农村面源污染物排放量空间分布图(图2)可知,海南省农村面源污染物排放量高值主要分布于岛东部和北部地势较低缓、社会活动水平较高的地区,岛中部山地丘陵地区的农村面源污染物排放量处于全省较低水平。

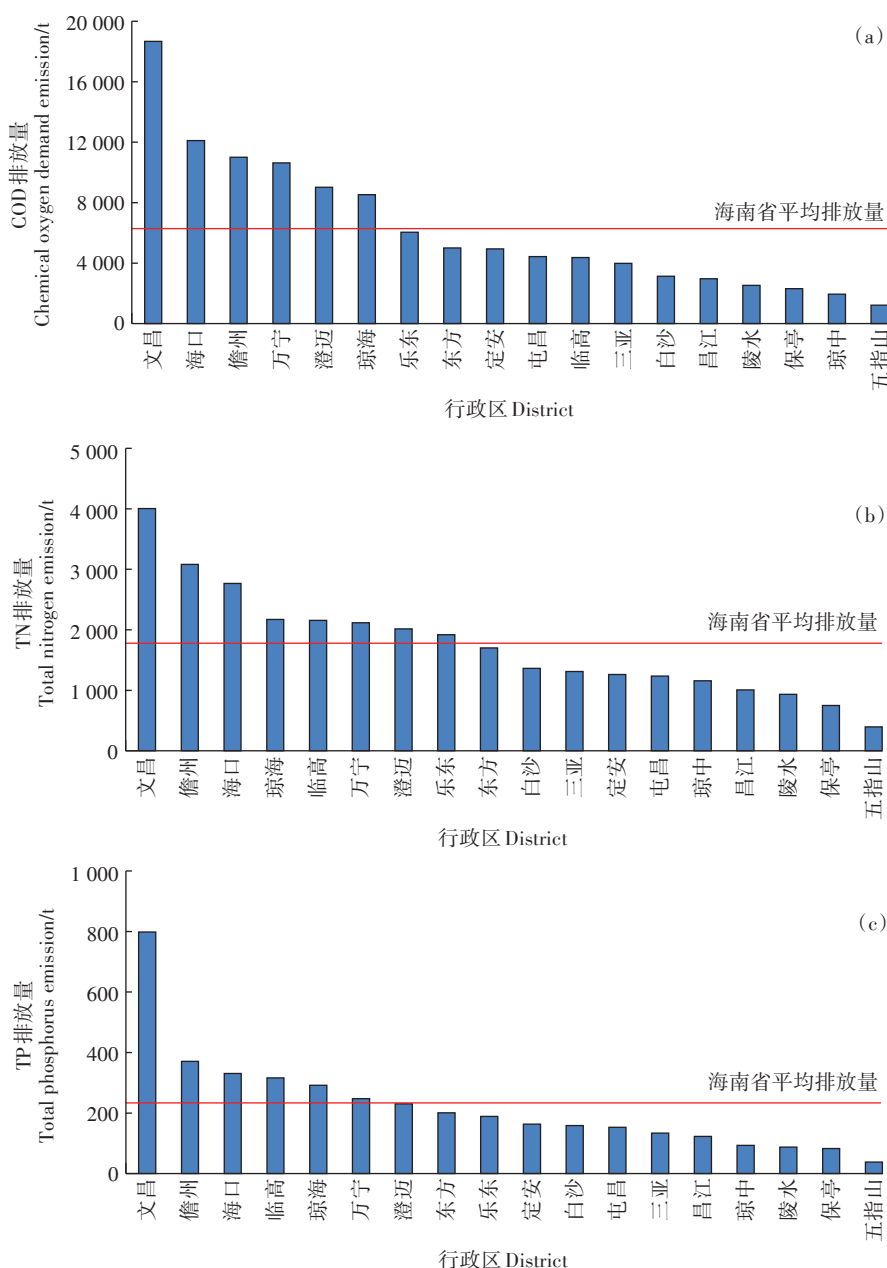


图1 海南省各市(县)农村面源COD、TN、TP排放量

Figure 1 Agricultural non-point source chemical oxygen demand, total nitrogen, and total phosphorus emissions in 18 districts of Hainan Province

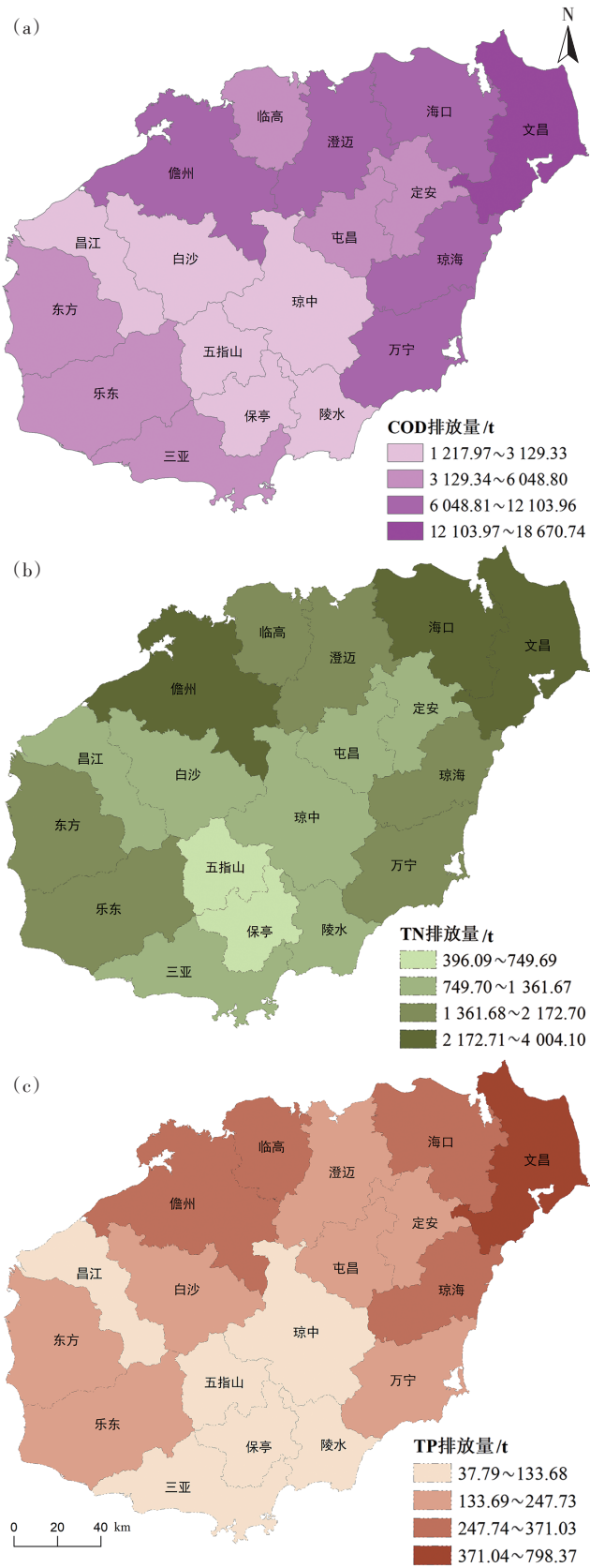


图2 海南省各市(县)农村面源污染物排放量空间分布
Figure 2 Spatial distribution of agricultural non-point source pollutant emissions in 18 districts of Hainan Province

海南省农村面源各污染类型污染物排放量见表2。COD主要来源于农村生活污水、畜禽养殖,分别占总排放量的41.82%、38.94%;TN主要来自种植,占总排放量的52.22%,畜禽养殖贡献占比不足10%;TP主要来自种植、水产养殖,分别占总排放量的39.51%、32.26%。需特别关注的是,海南省凭借自身区位优势,建省以来水产养殖产业发展较快,其农村面源TP的贡献占比达32.26%,远高于全国水产养殖TP排放量贡献比例(6.47%),治理任务较重。

表2 海南省农村面源各污染类型污染物排放量

Table 2 Emissions of different pollution types from agricultural non-point source in Hainan Province

污染类型 Pollution type	排放量 Emission/t			占比 Proportion/%		
	COD	TN	TP	COD	TN	TP
种植	—	16 369.16	1 583.44	—	52.22	39.51
畜禽养殖	43 947.02	2 624.20	567.77	38.94	8.37	14.17
水产养殖	21 706.75	5 072.12	1 292.80	19.24	16.18	32.26
农村生活污水	47 192.58	7 280.36	563.74	41.82	23.23	14.06
合计	112 846.35	31 345.84	4 007.75	100	100	100

2.2 海南省农村面源污染负荷分析

2.2.1 海南省农村面源污染物排放强度

海南省各地区农村面源污染物排放强度核算结果见图3。2017年海南省农村面源COD排放强度比全国排放强度高1.03倍,TN排放强度比全国排放强度高3.74倍,TP排放强度比全国排放强度高3.59倍。从地区分布来看,万宁、文昌、海口、琼海、澄迈的COD排放强度高于全省排放强度,除琼中外,其余地区的COD排放强度均高于全国排放强度;文昌、临高、万宁、海口、琼海、三亚的TN排放强度高于全省排放强度,所有市(县)的TN排放强度均高于全国排放强度;文昌、临高、海口、万宁、琼海的TP排放强度高于全省排放强度,所有市(县)的TP排放强度均高于全国排放强度。总体来看,海南省农村面源污染物排放强度较大,污染防治形势较严峻。

2.2.2 海南省农村面源等标污染负荷强度

海南省各市(县)农村面源各污染类型的等标污染负荷强度见表3。根据海南实际情况,将等标污染负荷强度占比大于30%的污染类型筛选为该市(县)主要污染类型,结果显示,儋州、五指山、琼海、东方、定安、屯昌、澄迈、白沙、昌江、保亭、琼中11个市(县)的农村面源污染主要来源于种植,海口、三亚、万宁、乐东、陵水5个市(县)的农村面源污染主要来源于种

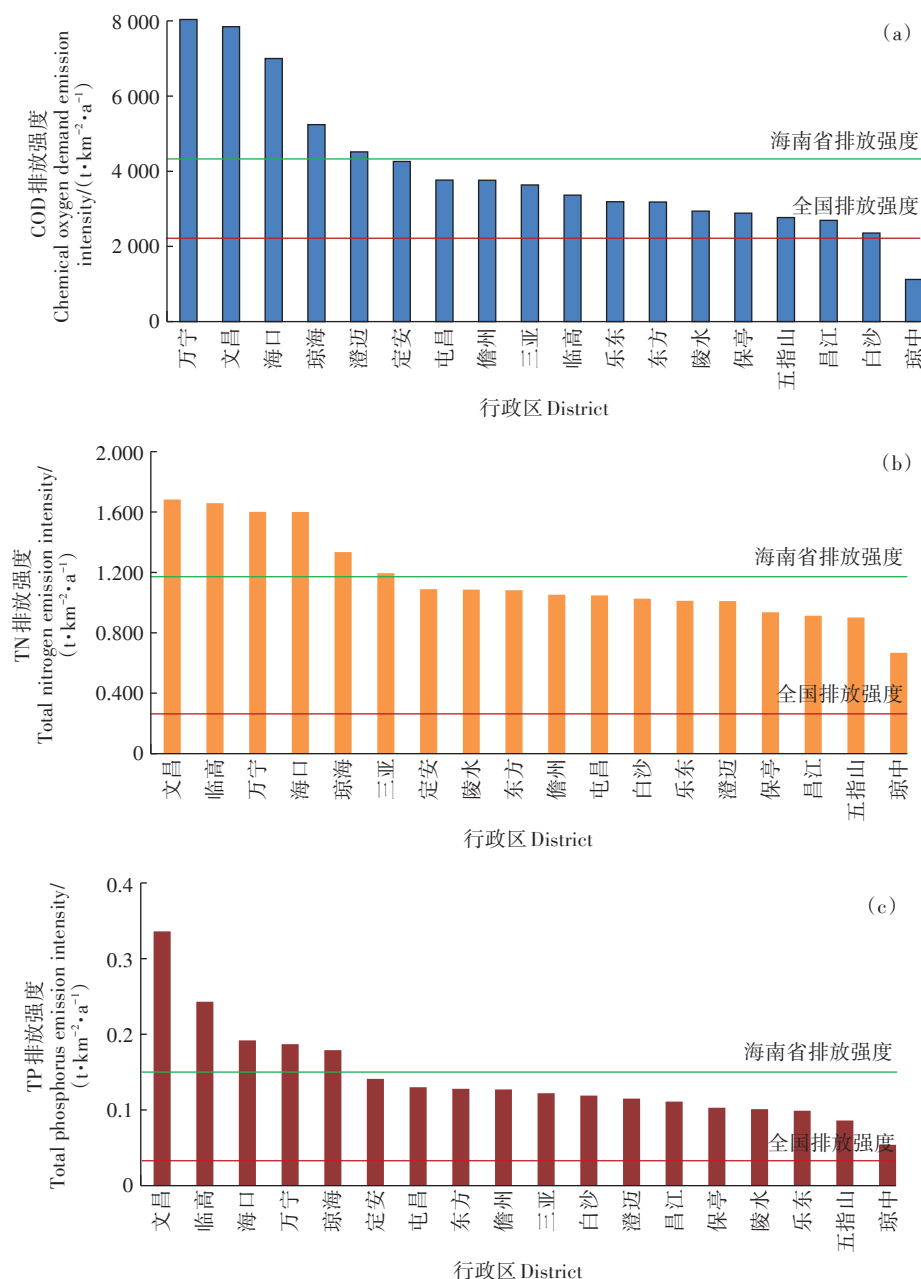


图3 海南省各市(县)农村面源COD、TN、TP排放强度

Figure 3 Agricultural non-point source chemical oxygen demand, total nitrogen, and total phosphorus emission intensity in 18 districts of Hainan Province

植、农村生活污水,文昌主要来源于水产养殖,临高主要来源于水产养殖、种植。从全省层面来看,农村面源各污染类型的等标污染负荷强度表现为种植>农村生活污水>水产养殖>畜禽养殖,种植是海南省农村面源污染的首要来源,其次是农村生活污水。

2.3 海南省农村面源污染负荷强度分区

通过聚类分析可知,全省共有高度负荷区4个、中度负荷区12个、低度负荷区2个,其空间分布情况见图4。高度负荷区主要分布于文昌、海口、临高、万

宁。文昌水产养殖业发达,2017年水产养殖面积约占全省水产养殖总面积的22.5%,位列全省第一,其中池塘养殖面积约占全省池塘养殖总面积的88%;海口农村人口数量约占全省农村总人口的13%,耕地面积约占全省耕地总面积的11%,分别位列全省第一、第二;临高水产养殖面积和耕地面积均位列全省第五;万宁耕地面积和农村人口数量分别位列全省第十一、第六,但由于区域污染治理还存在较多薄弱环节,且计算面积较小,故其污染负荷强度处于较高水平。

表3 海南省各市(县)农村面源各污染类型的等标污染负荷强度

Table 3 Equal standard pollution load intensity of different agricultural non-point source pollution types in 18 districts of Hainan Province

行政区 District	等标污染负荷强度(M_i)					等标污染负荷强度占比(K)				主要污染类型 Major types of pollution
	Equal standard pollution load intensity/ $((10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$					Proportion of equal standard pollution load intensity/%				
	种植 Crop farming	畜禽养殖 Livestock and poultry breeding	水产养殖 Aqua- culture	农村生活污水 Rural domestic sewage	合计 Total	种植 Crop farming	畜禽养殖 Livestock and poultry breeding	水产养殖 Aqua- culture	农村生活污水 Rural domestic sewage	
海口	1.118	0.420	0.255	1.114	2.907	38.46	14.45	8.77	38.32	种植、农村生活污水
三亚	0.914	0.198	0.245	0.628	1.985	46.05	9.97	12.34	31.64	种植、农村生活污水
儋州	0.979	0.210	0.263	0.423	1.875	52.21	11.20	14.03	22.56	种植
五指山	0.872	0.207	0.134	0.257	1.470	59.32	14.08	9.12	17.48	种植
琼海	0.998	0.444	0.617	0.435	2.494	40.02	17.80	24.74	17.44	种植
文昌	0.705	0.343	2.310	0.394	3.752	18.79	9.14	61.57	10.50	水产养殖
万宁	0.987	0.606	0.410	0.936	2.939	33.58	20.62	13.95	31.85	种植、农村生活污水
东方	1.142	0.208	0.137	0.391	1.878	60.81	11.08	7.29	20.82	种植
定安	0.956	0.362	0.263	0.425	2.006	47.66	18.04	13.11	21.19	种植
屯昌	0.917	0.396	0.269	0.303	1.885	48.65	21.01	14.27	16.07	种植
澄迈	0.863	0.529	0.009	0.411	1.812	47.63	29.19	0.50	22.68	种植
临高	1.018	0.148	1.395	0.482	3.043	33.45	4.87	45.84	15.84	水产养殖、种植
白沙	0.955	0.198	0.380	0.209	1.742	54.82	11.37	21.81	12.00	种植
昌江	0.938	0.205	0.203	0.259	1.605	58.44	12.77	12.65	16.14	种植
乐东	0.867	0.081	0.124	0.596	1.668	51.98	4.86	7.43	35.73	种植、农村生活污水
陵水	0.731	0.134	0.292	0.581	1.738	42.06	7.71	16.80	33.43	种植、农村生活污水
保亭	0.776	0.272	0.188	0.361	1.597	48.59	17.03	11.77	22.61	种植
琼中	0.731	0.134	0.003	0.125	0.993	73.62	13.49	0.30	12.59	种植
平均值	0.915	0.283	0.417	0.463	2.077	—	—	—	—	—

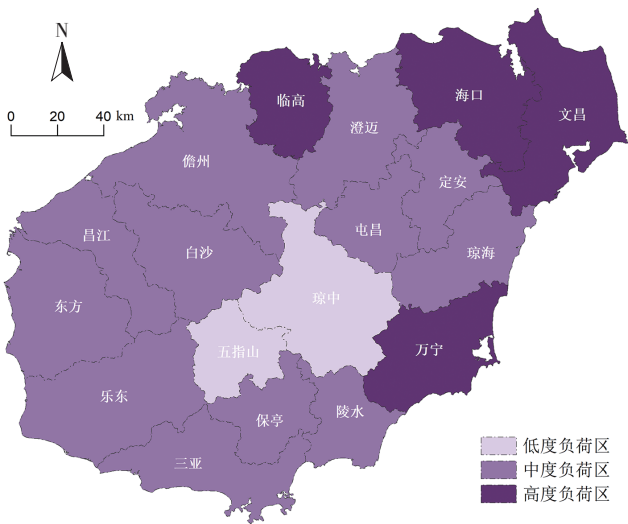


图4 海南省农村面源污染负荷强度分区

Figure 4 Agricultural non-point source pollution load intensity zones in Hainan Province

中度负荷区主要分布于农村人口密集、农业活动水平较高的台地、阶地和平原地带,包括三亚、东方、儋州、琼海、定安、澄迈、屯昌、昌江、乐东、陵水、白沙、保亭

12个市(县)。低度负荷区主要分布于岛中部偏南人口较少、社会活动水平较低、山地丘陵地形为主的琼中和五指山。

2.4 海南省农村面源污染控制分区

综合海南省各市(县)农村面源主要污染类型筛选结果以及污染负荷强度分区结果,将海南省农村面源污染控制区划分为6种:水产养殖污染型-高度负荷区、水产养殖和种植污染型-高度负荷区、种植和农村生活污水污染型-高度负荷区、种植污染型-中度负荷区、种植和农村生活污水污染型-中度负荷区、种植污染型-低度负荷区,其空间分布情况见图5。

不同区域根据不同的污染类型采取针对性的污染控制措施。水产养殖污染型区域,应优化调整区域水产养殖产业布局,大力发展绿色养殖,养殖密度大且水域自净能力不足的区域可采取轮养或休养等措施,环境容量超标的水域实施退养或转产,提高现有水产养殖尾水治理水平;种植污染型区域,宜优化调整区域种植业产业布局,继续推行测土配方施肥,推广高效、低毒、低残留、无公害农药,提高地膜和秸秆

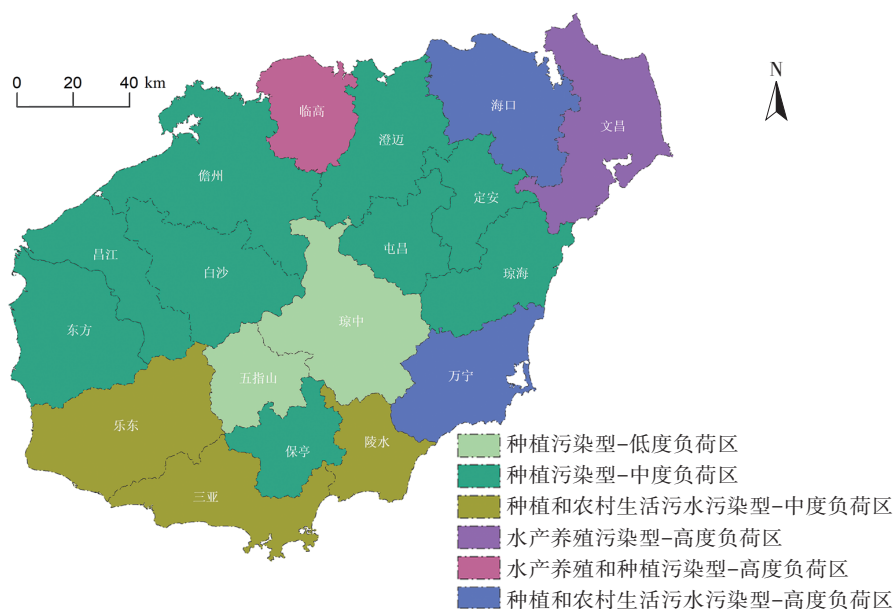


图5 海南省农村面源污染控制分区

Figure 5 The control zones of agricultural non-point source pollution in Hainan Province

的回收利用率,在重点区域利用现有排水沟渠、废弃池塘或低涝洼地建设生态净化工程;农村生活污水污染型区域,加快农村户用厕所无害化改造,提高粪污资源化利用水平,优先推进环境敏感区域、农村生活污水负荷较高区域的污水集中处理。

各区域的污染负荷强度不同,其治理手段和目标有所侧重:高度负荷区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;中度负荷区以源头防控为主、适当治理为辅,发展产业和改善现有农业生态环境并重;低度负荷区以源头防控为主,旨在保障现有农业生态环境。

3 结论

(1)文昌、海口、儋州、万宁、琼海的农村面源COD、TN、TP排放量均高于海南省平均排放量;三种污染物的排放量最大值均出现在文昌,最小值均出现在五指山;海南省农村面源COD、TN、TP的排放强度比全国排放强度分别高1.03、3.74、3.59倍,且文昌、万宁、海口、琼海的三种污染物排放强度均高于全省排放强度,可见海南省农村面源污染防治形势严峻。

(2)海南省农村面源COD主要来自农村生活污水、畜禽养殖,TN主要来源于种植,TP主要来源于种植、水产养殖;各污染类型等标污染负荷强度表现为种植>农村生活污水>水产养殖>畜禽养殖,其中文昌

为水产养殖污染型,临高为水产养殖和种植污染型,海口、三亚、万宁、乐东、陵水为种植和农村生活污水污染型,儋州、五指山、琼海、东方、定安、屯昌、澄迈、白沙、昌江、保亭、琼中为种植污染型。

(3)聚类分析结果表明,文昌、海口、临高、万宁为农村面源污染高度负荷区,三亚、东方、儋州、琼海、定安、澄迈、屯昌、昌江、乐东、陵水、白沙、保亭为中度负荷区,琼中、五指山为低度负荷区。

参考文献:

- [1] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8. YANG L Z, SHI W M, XUE L H, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):1-8.
- [2] 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.
- [3] 段华平,朱琳,孙勤芳,等.农村环境污染控制区划方法与应用研究[J].中国环境科学,2010,30(3):426-432. DUAN H P, ZHU L, SUN Q F, et al. Regionalization method and its application of rural environmental pollution control[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30

- (3):426-432.
- [4] 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.
- [5] KOURAKOS G, KLEIN F, CORTIS A, et al. A groundwater nonpoint source pollution modeling framework to evaluate long-term dynamics of pollutant exceedance probabilities in wells and other discharge locations[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(6):W00L13.
- [6] KELLER A A, CHEN X L, FOX J, et al. Attenuation coefficients for water quality trading[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(12):6788-6794.
- [7] LACROIX A, BEAUDOIN N, MAKOWSKI D. Agricultural water non-point pollution control under uncertainty and climate variability[J]. *Ecological Economics*, 2005, 53(1):115-127.
- [8] EDWARDS A C, WITHERS P J A. Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to freshwaters in the UK[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 350(3/4):144-153.
- [9] NIRAULA R, KALIN L, SRIVASTAVA P, et al. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 268:123-133.
- [10] VOLK M, LIERSCH S, SCHMIDT G. Towards the implementation of the European Water Framework Directive: Lessons learned from water quality simulations in an agricultural watershed[J]. *Land Use Policy*, 2009, 26(3):580-588.
- [11] 陈森, 刘宇欢, 刘贝贝, 等. 近30年海南省农业面源潜在污染物时空特征分析[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(4):479-483. CHEN M, LIU Y H, LIU B B, et al. Spatial-temporal variations of potential agricultural non-point source pollutants in Hainan in recent 30 years[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, 40(4):479-483.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 郝守宁, 白庆芹, 张志伟, 等. 林芝市农业面源污染排放特征解析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8):115-120. HAO S N, BAI Q Q, ZHANG Z W, et al. Analysis of the pollutants discharged from non-point agricultural pollution sources in Nyingchi[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(8):115-120.
- [15] 刘亚琼, 杨玉林, 李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7):7-12. LIU Y Q, YANG Y L, LI F H. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7):7-12.
- [16] 周亮, 徐建刚, 孙东琪, 等. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. 环境科学, 2013, 34(2):547-554. ZHOU L, XU J G, SUN D Q, et al. Spatial heterogeneity and classified control of agricultural non-point source pollution in Huaihe River basin[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2):547-554.
- [17] 谢培, 宫健, 陈诚. 北京市农业面源污染负荷特征分析及控制分区[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(4):613-622. XIE P, GONG J, CHEN C. Analysis of pollution load characteristics and control zones division of agricultural non-point sources in Beijing City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(4):613-622.
- [18] 贾陈忠, 乔扬源. 基于等标污染负荷法的山西省农业面源污染特征研究[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(3):141-149. JIA C Z, QIAO Y Y. The Characteristics of agricultural non-point source pollution in Shanxi Province based on equivalent pollution load method[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(3):141-149.
- [19] 陈晓丽, 雷勇, 黄国如. 北江飞来峡库区流域非点源污染现状评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(2):44-48, 53. CHEN X L, LEI Y, HUANG G R. Evaluation on non-point source pollution in Feilaixia Reservoir area of Beijiang River[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(2):44-48, 53.
- [20] 武德凯, 曲婷. 第二次全国污染源普查农业源系数手册[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2020. WU D K, QU T. Handbook of agricultural source coefficient for the second national census of pollution sources [M]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2020.