

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.021

我国农业面源污染现状与特征分析

王思如^{1,2,3}, 杨大文^{1,2}, 孙金华³, 唐莉华^{1,2}, 王朋杰³, 卢少勇^{4,5,6}

- (1. 清华大学土木水利学院, 北京 100084; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
4. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012;
5. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012;
6. 中国环境科学研究院国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 北京 100012)

摘要:采用改进输出系数法估算了2016年我国农业面源污染(agricultural non-point source pollution, ANP)排放量,利用单位面积负荷系数与等标污染负荷指数分别评价了ANP环境影响程度与污染严重程度,运用聚类分析法识别了污染排放特征,分析了ANP排放变化及其主导来源。结果显示,2016年我国ANP氮磷排放量分别为294.3万t、33.1万t,农田种植和畜禽养殖分别是总氮、总磷排放的主要来源;与2007年相比,2016年我国ANP中氮磷排放量分别增长8.8%和16.4%,增长主要来源于畜禽养殖。

关键词:农业面源污染;氮磷污染;改进输出系数法;污染排放特征;农田种植;畜禽养殖

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0140-08

Analysis on status and characteristics of agricultural non point source pollution in China//WANG Siru^{1,2,3}, YANG Dawen^{1,2}, SUN Jinhua³, TANG Lihua^{1,2}, WANG Pengjie³, LU Shaoyong^{4,5,6} (1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Benchmark and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 5. National Key Laboratory for Lake Pollution Control for Environmental Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 6. National Environmental Protection Dongting Lake Scientific Observation and Research Station, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The improved output coefficient method was used to estimate the agricultural non-point source pollution (ANP) emissions in 2016 in China. The environmental impact and pollution severity of ANP were evaluated by unit area load coefficient and equal standard pollution load index, respectively. The pollution emission characteristics were identified by cluster analysis, and the change of ANP emissions and its main sources were analyzed. The results showed that the nitrogen and phosphorus emissions of ANP in China in 2016 were 2.943 million tons and 0.331 million tons respectively, and farmland planting and livestock breeding were the main sources of total nitrogen and phosphorus emissions respectively. Compared with 2007, the nitrogen and phosphorus emissions of ANP in China increased by 8.8% and 16.4% respectively in 2016, which mainly came from livestock breeding.

Key words: agricultural non-point source pollution; nitrogen and phosphorus pollution; improved output coefficient method; pollution emission characteristics; farmland planting; livestock breeding

水污染严重影响饮用水、粮食、生态和人居环境的安全^[1-2],成为我国社会经济可持续发展的瓶颈之一^[3]。随着工业和城市生活点源污染控制措施

逐步取得成效,范围更广、治理难度更大的农业面源污染(agricultural non-point source pollution, ANP)成为我国水污染的另一重要来源^[4-7]。ANP是指农业

生产过程中,农田化肥流失、畜禽及水产养殖废水排放等导致污染物进入水体造成的污染^[8-9]。在太湖流域污染负荷中,83%的总氮和84%的总磷来自ANP^[10-11];ANP对洞庭湖总氮和总磷污染贡献率分别达到61%和80%^[12]。因此,掌握我国ANP现状与特征对指导水资源保护与水环境治理十分必要。

相关研究通常采用Johnes^[13]提出的输出系数法估算ANP排放量。该方法假定单位数量(单位面积)同一污染源的输出系数相同,相比于考虑流域内污染物形成、运移和转化过程的机理模型^[14],输出系数法简单方便,不依赖大量观测数据来率定模型参数。当观测数据有限时,输出系数法是可行的方法,因此得到了广泛使用^[15-16]。我国针对ANP排放现状的研究侧重于对局部区域的研究^[17-20],在已有少数针对全国的研究中^[21-22],没有考虑污染物输出系数在不同区域的差异。此外,国内学者在运用该方法时极少考虑水产养殖污染排放,我国有71.20%的水产品来自于池塘养殖^[9],有必要在计算ANP排放量时考虑水产养殖污染。

本文基于2007年全国第一次污染源普查资料,考虑输出系数在不同区域的差异性,根据2016年农田种植、畜禽养殖和水产养殖统计数据,计算了2016年我国31个省、自治区、直辖市(以下简称省市,港澳台地区数据缺失)ANP中的总氮、总磷排放量;采用单位面积污染负荷系数和等标污染负荷指数评价了各省、市环境影响程度与污染严重程度,分析了ANP的空间特征及不同类型ANP比例,指出ANP的关键污染源,并利用SPSS聚类分析识别各省市污染源特征。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 污染排放量计算

计算ANP排放量采用改进输出系数法^[23],即在原输出系数法基础上考虑不同类型污染源输出系数的差异。以省市为计算单元,计算农田种植、畜禽养殖和水产养殖的氮磷排放量。计算公式为

$$T_{AL} = F_L + L_L + A_L \quad (1)$$

其中 $F_L = 10^{-3} S \alpha_i + B$

$$L_L = \sum_{i=1}^n 10 H_i \alpha_{li}$$

$$A_L = \sum_{i=1}^n 10^{-3} Y_i \alpha_{ai}$$

式中: T_{AL} 为ANP年总排放量,t; F_L 为农田种植氮磷污染年排放量,t; L_L 为畜禽养殖氮磷污染年排放量,t; A_L 为水产养殖氮磷污染年排放量,t; S 为各省市农

作物氮磷肥施用折纯量,t; α_i 为农田种植排放/流失系数,g/kg; B 为农田种植氮磷基础流失量,t; i 为某种养殖类型序号,如*i*=1,2,3,4分别为猪、牛、羊、禽; n 为畜禽或水产养殖类型数目; H_i 为不同畜禽养殖类型牲畜出栏量,万头; α_{li} 为*i*类型畜禽养殖氮磷排污系数,kg/(头·a); Y_i 为不同水产养殖类型养殖产量,t; α_{ai} 为*i*类型水产养殖氮磷排污系数,g/kg。

假设农田种植基础流失量随时间不变,肥料输出系数等于《第一次污染源普查数据集》(以下简称“一普”)肥料输出量除以相应年份施肥量;不同类型畜禽养殖的污染输出系数依据文献[15-16,19,24-44]并结合一普的畜禽养殖污染排放量与相应年份各类型畜禽养殖规模进行修正后确定;水产养殖输出系数依据一普附件《水产养殖业污染源产排污系数手册》中现场试验数据,并根据各省市不同养殖模式比例,综合考虑该类养殖品种养殖模式可能性,计算其采取某种养殖模式的权重,得到该种类型水产养殖的综合输出系数,并根据一普的水产养殖污染排放量与相应年份各类型水产养殖规模对输出系数进行修正。本文暂不考虑年降雨差异和流域损失对污染输出系数的影响。计算过程中并未考虑输出系数随时间发生变化,可能会对污染排放量存在一定程度的高估^[45]。

1.1.2 污染程度评价

a. 单位面积污染负荷系数法。采用单位面积污染负荷系数评价污染物对某省市的环境影响程度^[46]。计算公式为

$$K = \frac{q_i}{\sum q_i} \times 100 \quad (2)$$

其中 $q_i = \frac{Q_i}{S_i}$

式中: K 为单位面积污染负荷系数; q_i 为某省市第*i*种类型污染的单位面积年排放量,t/km²; Q_i 为某省市第*i*种类型污染的年排放量,t; S_i 为某省市行政面积,km²。

根据*K*值评价总氮、总磷对各省市环境影响程度^[47]: $K < 60$,对环境不构成威胁(I级); $60 \leq K < 80$,对环境稍有威胁(II级); $80 \leq K < 100$,对环境构成威胁(III级); $K \geq 100$,对环境构成严重威胁(IV级)。

b. 等标污染负荷指数法。采用等标污染负荷指数来反映各省市相对污染严重程度,即某省市等标污染负荷总量除以其水资源总量^[48],等标污染负荷总量为把污染物全部稀释到评价标准所需的介质量^[49],表征污染物排放浓度超过某一基准排放标准的程度。计算公式为

$$\lambda_{ij} = \frac{P_{ij}}{W_i} \quad (3)$$

其中

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}}{\rho_{i0}} \times 10^6$$

式中: λ_{ij} 为第*j*种污染源中第*i*种污染物的等标污染指数; P_{ij} 为第*j*种污染源中第*i*种污染物的等标污染负荷总量, m^3 ; W_i 为该污染物所处省市的水资源总量, m^3 ; C_{ij} 为第*j*种污染源中第*i*种污染物的年排放量, t ; ρ_{i0} 为 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中第*i*种污染物的水质标准, mg/L 。本文按照水质标准为Ⅲ类进行计算,总氮为 1 mg/L ,总磷为 0.2 mg/L 。

1.1.3 污染特征识别

采用 SPSS 软件将农田种植、畜禽养殖与水产养殖的氮磷等标污染负荷总量作为输入,利用分层聚类方法对污染排放特征进行聚类分析。ANP 变化的主导因素为对 ANP 氮磷排放变化贡献率最大的行业,贡献率按各行业氮磷排放量值占 ANP 氮磷总排放量值的百分比进行计算。

1.2 数据来源

我国各省市农林牧渔业总产值数据来源于《中国农业统计资料》;农作物氮肥、磷肥施用折纯量和畜禽养殖出栏量均源自《中国农业年鉴》;水产养殖产量数据来自《中国渔业年鉴》;污染输出系数计算数据来自《第一次全国污染源普查数据集》及其附件《水产养殖业污染源产排污系数手册》;水资源总量数据来源于各年《中国水资源公报》。

2 ANP 排放量及特征分析

2.1 污染排放量

由表 1 可见,2016 年,我国 ANP 总氮排放量为 294.3 万 t,其中,农田种植、畜禽养殖、水产养殖排放分别占 53.8%、41.9% 和 4.3%。全国总氮排放量各省市平均值为 9.5 万 t,高于该值的省市有 13 个,均位列该年农林牧渔业总产值的前 13 位,说明地区的 ANP 总氮排放量与当地农业发展水平直接相关。山东、河南、天津、江苏 4 省市的总氮排放强度均高于全国平均值的 2 倍,表明上述省市在产业发展过程中需更加注重环境承载能力与可持续发展。由表 1 中各行业总氮排放贡献率可知,不同省市的 ANP 总氮排放源差异较大。13 个总氮排放量较大的省市中,山东、河北、湖北、江苏、安徽、广西、四川 7 省市由农田种植主导,河南、广东、湖南、福建、黑龙江、辽宁 6 省市由畜禽养殖主导,这主要与各省市的农业生产结构有重要关系。

由表 1 可见,2016 年,我国 ANP 总磷排放量为

33.1 万 t。其中,农田种植、畜禽养殖、水产养殖排放分别占 32.7%、60.1 和 7.2%。全国 ANP 总磷排放量各省市平均值为 1.1 万 t,高于该值的省市有 12 个,分别是山东、河南、广东、福建、江苏、湖北、湖南、河北、辽宁、广西、四川和安徽。上述省市总氮排放量也高于全国平均值,说明不同省市总磷与总氮排放量排序较为一致(相关系数为 0.97),表明农业发展对氮、磷排放的贡献同步。此外,除福建外 11 个省市 2016 年农林牧渔业总产值均位列全国前 12 位,说明地区的 ANP 总磷排放量也与当地的农业发展水平直接相关。山东、河南、天津、江苏、福建 5 省市的总磷排放强度均高于全国平均值的 2 倍,此结论与总氮类似,说明了我国 ANP 氮磷排放问题的一致性。由表 1 中的各行业总磷排放贡献率可知,12 个总磷排放量较大的省市中,山东、河南、广东、福建、江苏、辽宁等 10 省市主要来自畜禽养殖,尤其是辽宁省,其畜禽养殖贡献率占到 96% 以上,广西和四川 2 省主要来自农田种植。

2.2 污染程度分析

2.2.1 单位面积污染负荷系数分析

根据 2016 年全国各省市单位面积负荷系数分析结果,除了重庆和北京以外,其余各省市总氮和总磷的分级空间分布基本一致(表 2)。东部、中部较西部地区的环境威胁更严重,而前者农业开发强度较后者高,导致前者单位面积污染负荷系数(污染程度)更高。氮磷排放量在全国平均值以上的省市中,只有黑龙江和四川对环境不构成威胁,广西对环境稍有威胁,其余省市均对环境构成严重威胁。

2.2.2 等标污染负荷指数分析

2016 年,全国各省市氮磷等标污染负荷指数与污染排放量的排序结果截然不同,氮磷等标污染负荷指数在各省市间差异很大,且各省市总磷与总氮的等标污染负荷指数排序具有一致性(相关系数为 0.97)。对于总氮和总磷等标污染负荷指数,超过全国平均值的有宁夏、山东、天津、河南、河北、山西和辽宁,上述省市均值为其他 24 个省市均值的 10 倍以上(表 2)。宁夏的氮磷排放量和排放强度均显著低于全国平均值,其等标污染负荷指数却均位于全国前五,与其水资源总量小、水环境容量低直接相关。广东、湖北、湖南、江苏、福建的氮磷排放量与排放强度均高于全国平均值,其等标污染指数均显著低于全国平均值,可见丰沛的水资源量对于减轻污染程度具有至关重要的作用。

2.3 污染特征识别

根据污染排放特征聚类分析结果(图 1),将全国各省市划分为 4 类:①农田种植对 ANP 贡献占绝

对主导的省市,包括贵州、云南和西藏,其农田种植等标污染负荷占比分别为 77.0%、84.0% 和 98.8%;②畜禽养殖对 ANP 贡献占绝对主导的省市,包括福建和辽宁,其畜禽养殖等标污染负荷占比

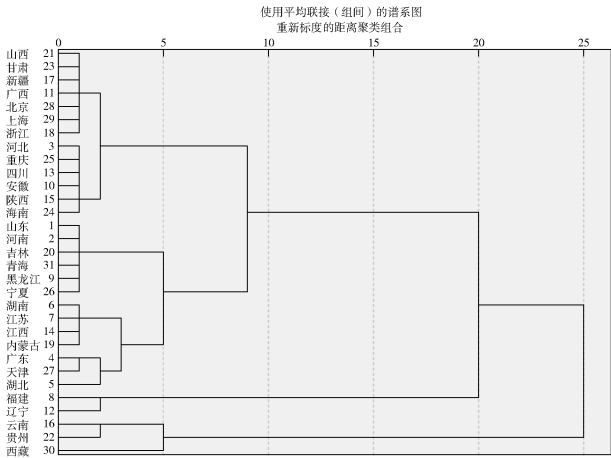


图 1 等标污染负荷量聚类树形图

Fig. 1 Cluster tree of equal standard pollution load

分别为 69.6% 和 82.8%;③农田种植和畜禽养殖对 ANP 贡献为主要因素,且农田种植占比更大的省市,包括山西、甘肃、新疆、广西、北京、上海、浙江、河北、重庆、四川、安徽、陕西和海南;④农田种植和畜禽养殖对 ANP 贡献为主要因素,且畜禽养殖占比更

大的省市,包括山东、河南、吉林、青海、黑龙江、宁夏、湖南、江苏、江西、内蒙古、广东、天津、湖北。我国 ANP 污染源主要是畜禽养殖和农田种植,虽然在各省市污染源占比上不尽相同,但是两者之和占比大多数超过 90%,可见,加强畜禽养殖行业管理与污染治理、生态种植与水土保持等措施对解决我国农业面源污染问题至关重要。

3 ANP 排放量变化及特征分析

3.1 污染排放变化分析

2007—2016 年,全国 ANP 总氮排放量增长了 23.8 万 t,占 2007 年排放总量的 8.8% (表 3)。总氮排放增长的省市有 26 个,其中绝对量增长最大的 5 个省市依次为福建、黑龙江、湖北、河南和辽宁,增长幅度最大的 5 个省市依次为福建、宁夏、新疆、黑龙江和内蒙古,排放减幅前 5 位依次为北京、上海、浙江、河北、山东。总氮排放增长绝对量或幅度位于全国前 5 位的省市,其农林牧渔业总产值的增幅均超过了 100%,说明农业发展水平提升会造成更多总氮排放。总氮排放减少的省市中,上海、北京和山东的农林牧渔业总产值增幅不足 100%,但浙江和河北的总产值增幅在全国位列前 2 位,这两个以农田

表 1 2016 年全国各省市 ANP 排放及各行业贡献率

Table1 ANP emission of provinces and cities and contribution rate of various industries in 2016 in China

序号	省市	总氮排放量/万 t	总氮排放强度/ (万 t · km ⁻²)	总氮排放贡献率/%			总磷排放量/万 t	总磷排放强度/ (万 t · km ⁻²)	总磷排放贡献率/%		
				农田 种植	畜禽 养殖	水产 养殖			农田 种植	畜禽 养殖	水产 养殖
1	山 东	39.95	2.60	59.29	39.98	0.73	6.84	0.45	17.16	81.93	0.91
2	河 南	31.57	1.89	46.80	51.85	1.35	3.23	0.19	22.81	74.87	2.32
3	河 北	17.53	0.93	73.86	24.21	1.93	2.43	0.13	32.32	52.29	15.39
4	广 东	17.02	0.95	40.58	48.06	11.36	1.88	0.16	15.61	71.07	13.32
5	湖 北	14.98	0.81	50.09	32.87	17.04	1.67	0.16	24.34	63.58	12.08
6	湖 南	14.33	0.68	46.87	48.12	5.01	1.66	0.09	31.81	37.18	31.01
7	江 苏	14.31	1.40	58.87	34.90	6.23	1.65	0.08	36.79	54.57	8.64
8	福 建	13.63	1.12	20.51	68.50	10.99	1.46	0.08	46.59	48.77	4.64
9	黑 龙 江	13.48	0.29	30.13	69.16	0.71	1.28	0.09	8.74	87.56	3.71
10	安 徽	12.54	0.90	73.69	22.92	3.39	1.23	0.05	56.20	37.60	6.21
11	广 西	11.29	0.48	61.14	35.27	3.59	1.19	0.02	53.37	42.00	4.63
12	辽 宁	10.98	0.75	16.06	79.99	3.95	1.18	0.08	41.37	51.40	7.23
13	四 川	10.46	0.22	73.99	23.19	2.82	0.98	0.02	28.81	70.16	1.03
14	江 西	7.42	0.44	54.52	42.09	3.38	0.90	0.05	44.13	50.66	5.21
15	陕 西	7.35	0.36	70.50	28.63	0.87	0.83	0.02	77.63	20.07	2.29
16	云 南	7.15	0.19	87.67	10.91	1.43	0.66	0.06	46.93	39.89	13.19
17	新 疆	6.92	0.04	57.21	42.26	0.52	0.50	0.02	69.33	28.06	2.61
18	浙 江	6.45	0.63	57.99	33.16	8.85	0.47	0.00	38.24	60.85	0.91
19	内 蒙 古	5.84	0.05	52.48	47.14	0.37	0.45	0.03	39.54	59.88	0.58
20	吉 林	5.61	0.30	36.60	62.99	0.41	0.44	0.02	25.15	73.99	0.87
21	山 西	4.95	0.32	70.23	29.49	0.28	0.43	0.02	68.00	15.21	16.79
22	贵 州	3.91	0.22	81.93	9.59	8.48	0.41	0.12	63.94	25.15	10.91
23	甘 肃	3.57	0.08	57.60	42.05	0.36	0.40	0.05	54.71	40.57	4.72
24	海 南	3.41	1.00	66.44	23.29	10.28	0.27	0.00	61.26	36.05	2.70
25	重 庆	3.08	0.37	71.87	24.83	3.30	0.21	0.00	66.79	31.94	1.27
26	宁 夏	2.00	0.30	27.68	68.37	3.95	0.20	0.18	20.12	52.95	26.93
27	天 津	1.82	1.61	45.60	39.13	15.27	0.08	0.01	39.85	40.07	20.08
28	北 京	1.05	0.62	69.34	25.01	5.65	0.07	0.04	41.02	44.32	14.66
29	上 海	0.75	1.19	63.35	31.01	5.64	0.07	0.11	48.90	36.79	14.31
30	西 藏	0.50	0.00	98.93	1.07	0.00	0.03	0.00	98.57	1.43	0.00
31	青 海	0.44	0.01	36.33	63.67	0.00	0.02	0.00	38.69	61.31	0.00
合计		294.29		53.77	41.94	4.30	33.12		32.72	60.11	7.17

表2 2016 年全国各省市 ANP 单位面积污染负荷系数与等标污染负荷指数

Table 2 ANP unit area load factor and its classification and equivalent pollution load index in provinces and cities in 2016 in China

省 市	单位面积污染负荷系数		等标污染负荷指数							
	总 氮	总 磷	总 氮				总 磷			
			农田种植	畜禽养殖	水产养殖	合计	农田种植	畜禽养殖	水产养殖	合计
山 东	388.10***	582.44***	10.75	7.25	0.13	18.13*	2.67	12.73	0.14	15.54*
河 南	282.48***	253.13***	4.38	4.85	0.13	9.36*	1.09	3.58	0.11	4.78*
河 北	139.54***	102.07***	6.22	2.04	0.16	8.42*	1.64	1.71	0.16	3.51*
广 东	141.29***	176.60***	0.28	0.33	0.08	0.69	0.16	0.26	0.08	0.50
湖 北	120.39***	117.17***	0.50	0.33	0.17	1.00	0.18	0.21	0.17	0.56
湖 南	101.09***	101.71***	0.31	0.31	0.03	0.65	0.14	0.20	0.03	0.37
江 苏	208.47***	212.79***	1.14	0.67	0.12	1.93	0.27	0.71	0.14	1.12
福 建	167.87***	203.30***	0.13	0.44	0.07	0.64	0.07	0.32	0.06	0.45
黑 龙 江	42.59	27.06	0.48	1.11	0.01	1.60	0.17	0.41	0.01	0.59
安 徽	134.15***	110.57***	0.74	0.23	0.03	1.00	0.20	0.24	0.03	0.47
广 西	71.46*	68.20*	0.32	0.18	0.02	0.52	0.16	0.11	0.02	0.29
辽 宁	112.43***	115.09***	0.53	2.65	0.13	3.31*	0.17	1.69	0.07	1.93*
四 川	32.46	32.46	0.33	0.10	0.01	0.44	0.14	0.11	0.01	0.26
江 西	66.43*	70.30*	0.18	0.14	0.01	0.33	0.09	0.10	0.01	0.20
陕 西	53.44	31.74	1.91	0.78	0.02	2.71	0.64	0.26	0.02	0.92
云 南	27.87	28.29	0.30	0.04	0.00	0.34	0.15	0.04	0.00	0.19
新 疆	6.23	2.13	0.36	0.27	0.00	0.63	0.08	0.04	0.00	0.12
浙 江	94.51**	84.85**	0.28	0.16	0.04	0.48	0.12	0.10	0.03	0.25
内 蒙 古	7.38	5.22	0.72	0.65	0.01	1.38	0.21	0.34	0.01	0.56
吉 林	44.71	30.44	0.42	0.72	0.00	1.14	0.11	0.33	0.00	0.44
山 西	47.35	38.10	2.59	1.09	0.01	3.69*	0.67	1.02	0.01	1.70*
贵 州	33.19	31.79	0.30	0.04	0.03	0.37	0.14	0.03	0.03	0.20
甘 肃	11.74	6.02	1.22	0.89	0.01	2.12	0.41	0.20	0.01	0.62
海 南	149.85***	158.73***	0.46	0.16	0.07	0.69	0.27	0.11	0.05	0.43
重 庆	55.94	63.60*	0.37	0.13	0.02	0.52	0.18	0.13	0.02	0.33
宁 夏	45.00	15.34	5.77	14.24	0.82	20.83*	1.62	1.62	0.81	4.05*
天 津	241.22***	235.89***	4.40	3.78	1.47	9.65*	1.08	2.85	1.45	5.38*
北 京	93.23**	56.38	2.07	0.75	0.17	2.99	0.42	0.46	0.15	1.03
上 海	178.07***	137.78***	0.78	0.38	0.07	1.23	0.27	0.20	0.08	0.55
西 藏	0.61	0.36	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
青 海	0.91	0.44	0.03	0.05	0.00	0.08	0.01	0.01	0.00	0.02

注:单位面积污染负荷系数中***代表构成严重威胁,**代表构成威胁,*代表构成稍有威胁,无*代表不构成威胁;等标污染负荷指数中*代表平均值以上。

表3 2007 年至 2016 年全国各省市 ANP 排放量变化及其占比情况

Table 3 Change and proportion of ANP emissions of provinces and cities from 2007 to 2016 in China

省 市	总氮排放量差值/t	总氮排放量差值占比/%	总磷排放量差值/t	总磷排放量差值占比/%
山 东	-2285.17	-0.57	9432.76	15.98
河 南	22619.39	7.72	5010.85	18.36
河 北	-2260.27	-1.27	194.11	1.34
广 东	10034.26	6.27	1417.22	6.20
湖 北	22671.26	17.84	3654.67	28.14
湖 南	15688.16	12.30	2344.74	16.61
江 苏	3293.87	2.36	1566.61	10.36
福 建	47634.71	53.74	7161.92	61.32
黑 龙 江	26216.11	24.14	2425.46	32.98
安 徽	3025.31	2.47	1140.69	10.70
广 西	11203.06	11.02	1575.14	14.69
辽 宁	17470.91	18.93	2653.52	26.07
四 川	3727.50	3.70	749.36	6.70
江 西	9264.98	14.26	1294.66	16.87
陕 西	4451.05	6.44	487.20	10.83
云 南	9809.79	15.90	1651.55	24.89
新 疆	14784.26	27.15	784.78	40.93
浙 江	-8864.03	-12.08	-1156.14	-14.88
内 蒙 古	10264.31	21.31	1055.14	28.81
吉 林	687.97	1.24	307.63	7.59
山 西	2103.23	4.43	623.81	15.89
贵 州	4588.75	13.30	889.41	26.27
甘 肃	3578.05	11.14	150.95	7.78
海 南	5359.80	18.65	800.00	24.07
重 庆	2837.67	10.14	590.26	17.31
宁 夏	5280.66	35.88	168.77	27.70
天 津	930.17	5.37	288.04	16.47
北 京	-3896.55	-27.10	-483.85	-40.07
上 海	-2641.16	-26.02	-167.39	-20.15
西 藏	34.24	0.69	7.73	2.31
青 海	712.61	19.31	43.20	21.88
合计	238324.90	8.81	46662.78	16.39

种植为 ANP 主要来源的省市在大幅提升农业发展水平的同时能降低总氮排放量,可能是其农业生产技术得以革新,提高了农田氮素利用效率。

2007—2016 年,全国有 28 个省市的 ANP 总磷排放量出现了增长,有 3 个省市出现了下降。总体上,总磷排放量增长了 4.7 万 t,相比于 2007 年的排放总量上升了 16.4% (表 3)。其中,总磷排放绝对量增长最大的 5 个省市依次为山东、福建、河南、湖北和辽宁,总磷增幅最大的 5 个省市依次为福建、新疆、黑龙江、内蒙古和湖北,总磷排放减幅前 3 位依次为北京、上海、浙江。福建、河南、湖北和辽宁 4 省市总氮和总磷排放的绝对量增长均位列全国前 5 位,而福建、新疆、黑龙江和内蒙古 4 省市的总氮和总磷排放量增幅也位列全国前 5 位,说明大部分省市农业生产中的总氮和总磷排放量的变化同步。然而,相比于同期总氮排放量的变化,总磷排放增长的省市更多,其中山东和河北虽然总氮排放量下降,但其总磷排放量上升,体现了这两省农业发展中不同行业发展变化方向的差异性。

3.2 污染排放变化主导因素

根据 2007—2016 年各行业氮磷排放量变化情况,计算得到导致总氮、总磷排放量变化的主导因素 (表 4)。农田种植、畜禽养殖和水产养殖变化对总氮排放增长的贡献率分别为 42.5%、44.6% 和 12.9%。83.8% 的省市总氮排放量增长,其中,69.2% 的省市由畜禽养殖排污增长主导,23.1% 的省市 (吉林、陕西、海南、云南、新疆、西藏) 由农田种植排污增长主导,其余 7.7% 的省市 (贵州、广东) 由水产养殖排污增长主导。16.2% 的省市总氮排放量降低,其中 40.0% 的省市 (山东、河北) 由农田种植排污减少主导,60.0% 的省市 (浙江、北京、上海) 由畜禽养殖排污减少主导。农田种植、畜禽养殖和水产养殖对总磷排放增长的贡献率分别为 9.4%、71.7% 和 18.9%。90.3% 的省市总磷排放量增长,其中,67.8% 由畜禽养殖排污增长主导,17.9% 的省市 (陕西、海南、云南、新疆、西藏) 由农田种植排污增长主导,其余 14.3% (广东、湖北、贵州、宁夏) 由水产养殖排污增长主导。9.7% 的省市总磷排放量

降低,其中,33.3% (上海) 由农田种植排污减少主导,66.7% (浙江、北京) 由畜禽养殖排污减少主导。综上所述,尽管农田种植和水产养殖存在一定影响,2007—2016 年影响我国 ANP 氮磷排放的核心污染源是畜禽养殖,因此,抑制 ANP 增长应着重考虑削减畜禽养殖污染。

4 结 语

我国 2016 年 ANP 总氮、总磷排放量分别为 294.3 万 t、33.1 万 t,农田种植和畜禽养殖污染是 ANP 排放的主要来源。ANP 排放对我国东部、中部的环境影响较西部地区更严重。受各省市的水资源自然禀赋影响,对水资源匮乏的省市而言,虽然 ANP 排放总量与强度不高,但是水环境污染程度仍然较高。相较于 2007 年,2016 年全国 ANP 排放的总氮、总磷分别增长了 8.8% 和 16.4%,增长量主要来自畜禽养殖的快速发展。抑制我国 ANP 增长,应加强对畜禽养殖的管理,尤其是东部与中部地区的畜禽养殖管理。

参考文献:

[1] HAN D M, CURRELL M J, CAO G L. Deep challenges for China's war on water pollution [J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 1222-1233.

[2] 郑宇, 程香菊, 王兆礼, 等. 韩江流域面源污染及与景观格局的关系 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 78-85. (ZHENG Yu, CHENG Xiangju, WANG Zhaoli, et al. Non-point source pollution in Hanjiang River Basin and its relation with landscape pattern [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 78-85. (in Chinese))

[3] 童纪新, 曹曦文. 江苏省水污染、环境规制与高质量发展 [J]. 水利经济, 2020, 38 (3): 7-12. (TONG Jixin, CAO Xiwen. Water pollution, environmental regulation and high-quality economic development in Jiangsu Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38 (3): 7-12. (in Chinese))

[4] ONGLEY E D. Non-point source water pollution in China: current status and future prospects [J]. Water International, 2004, 29 (3): 299-306.

[5] XIA Tiyan, CHEN Zebin, JIN Song. New normal control

表 4 2007 年至 2016 年全国各省市 ANP 变化主导因素

Table 4 Leading factors of ANP changes from 2007 to 2016 in China

污染物变化及其主导因素	总 氮	总 磷
农田种植业变化主导的污染减少	山东、河北	上海
畜禽养殖业变化主导的污染减少	浙江、北京、上海	浙江、北京
农田种植业变化主导的污染增加	吉林、陕西、海南、云南、新疆、西藏	陕西、海南、云南、新疆、西藏
畜禽养殖业变化主导的污染增加	河南、湖北、湖南、江苏、福建、黑龙江、安徽、广西、辽宁、四川、江西、内蒙古、山西、甘肃、重庆、宁夏、天津、青海	山东、河南、河北、湖南、江苏、福建、黑龙江、安徽、广西、辽宁、四川、江西、内蒙古、吉林、山西、甘肃、重庆、天津、青海
水产养殖业变化主导的污染增加	贵州、广东	广东、湖北、贵州、宁夏

- of agricultural non-point source pollution in the Dianchi Lake Basin [J]. Meteorological and Environmental Research, 2017, 8(2): 63-72.
- [6] 刘钦普. 国内农田氮磷面源污染风险控制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 1-5. (LIU Qinqu. Research progress on risk control of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in domestic farmland[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(1): 1-5. (in Chinese))
- [7] 尚辉, 苏伟霞, 姚宇阔, 等. 滨海围垦区替代传统农业的生态产业效益研究: 以江苏东台条子泥垦区为例[J]. 水利经济, 2020, 38(4): 21-27. (SHANG Hui, SU Weixia, YAO Yutian, et al. Benefits of ecological industry mode to replace traditional agriculture mode in coastal reclamation areas: an example of Tiaozini reclamation area in Dongtai City of Jiangsu Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(4): 21-27. (in Chinese))
- [8] 王沛芳, 娄明月, 钱进, 等. 农田退水净污湿地对污染物的净化效果及机理分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 1-10. (WANG Peifang, LOU Mingyue, QIAN Jin, et al. Analysis of purification effect and mechanism of pollutant by the farmland drainage wetland [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 1-10. (in Chinese))
- [9] 刘国锋, 徐跑, 吴霆, 等. 中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 225-233. (LIU Guofeng, XU Pao, WU Ting, et al. Present condition of aquaculture nitrogen and phosphorus environmental pollution and future development strategy [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(1): 225-233. (in Chinese))
- [10] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 87-90. (ZHANG Hongju, CHEN Fang. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 87-90. (in Chinese))
- [11] 华祖林, 韩爱秋. 基于非参数回归改进的太湖总磷压力-响应模型[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 20-24. (HUA Zulin, HAN Aiqiu. Improved stressor-response model of total phosphorus in Taihu Lake based on nonparametric regression [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 20-24. (in Chinese))
- [12] 秦迪岚, 罗岳平, 黄哲, 等. 洞庭湖水环境污染状况与来源分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 193-198. (QIN Dilan, LUO Yueping, HUANG Zhe, et al. Pollution status and source analysis of water environment in Dongting Lake [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(8): 193-198. (in Chinese))
- [13] 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 modeling approach [J]. Journal of Hydrology, 1996, 183: 323-349.
- [14] 王少丽, 王兴奎, 许迪. 农业非点源污染预测模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 265-271. (WANG Shaoli, WANG Xingkuai, XU Di. Advances in the prediction models of agricultural non-point source pollution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(5): 265-271. (in Chinese))
- [15] DING Xiaowen, SHEN Zhenyao, HONG Qian, et al. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3/4): 233-244.
- [16] MA Xiao, LI Ye, ZHANG Meng, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2011, 412/413: 154-161.
- [17] 李胜男, 李冀, 何康, 等. 洞庭湖区沧浪河流域农业面源污染现状调查与分析[J]. 湖南农业科学, 2018(5): 56-60. (LI Shengnan, LI Ji, HE Kang, et al. Investigation of the agricultural non-point source pollution status in the Canglang River Basin of Hanshou County near Dongting Lake [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018(5): 56-60. (in Chinese))
- [18] 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 Shaoyong, ZHANG Ping, PAN Chengrong, et al. Agricultural non-point source pollution characteristic and its control measures of Dongtinghu Lake [J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2278-2286. (in Chinese))
- [19] 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 Yaqiong, YANG Yulin, LI Fahu. Estimation of pollution loads from agricultural non-point sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 7-12. (in Chinese))
- [20] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民. 长江上游非点源氮素负荷时空变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 836-841. (DING Xiaowen, SHEN Zhenyao, LIU Ruimin. Temporal-spatial changes of non-point source nitrogen in upper reach of Yangtze River Basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3): 836-841. (in Chinese))
- [21] 李海鹏, 张俊飏. 中国农业面源污染的区域分异研究[J]. 环境保护, 2009(2): 43-45. (LI Haipeng, ZHANG Junbiao. Studies on regional differentiation of non-point source pollution contamination in China agriculture [J]. Environmental Protection, 2009(2): 43-45. (in Chinese))

- [22] 虞慧怡,扈豪,曾贤刚. 我国农业面源污染的时空分异研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(9):1-6. (YU Huiyi, HU Hao, ZENG Xiangang. Spatial-temporal variation of agricultural non-point source pollution in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,29(9):1-6. (in Chinese))
- [23] 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.
- [24] 刘增进,张关超,杨育红,等. 河南省农业非点源污染负荷估算及空间分布研究[J]. 灌溉排水学报,2016,35(11):1-6. (LIU Zengjin, ZHANG Guanchao, YANG Yuhong, et al. Estimation and spatial distribution of agricultural non-point source pollution loads in Henan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2016,35(11):1-6. (in Chinese))
- [25] 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. (GUI Pingjing, WANG Feng, LI Shanpu, et al. Estimation and evaluation of agricultural non-point source pollution load by stage export coefficient model;a case study in Sichuan Province [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2016,28(1):110-118. (in Chinese))
- [26] 孙秀秀,包丽颖,郁亚娟,等. 哈尔滨地区农业面源污染负荷估算与分析[J]. 安全与环境学报,2015,15(5):300-305. (SUN Xiuxiu, BAO Liying, YU Yajuan, et al. Estimation and analysis of the pollution loads from the agricultural non-point source in Harbin region[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15 (5): 300-305. (in Chinese))
- [27] 马奇涛,王宝庆. 天津滨海新区非点源污染负荷量估算[J]. 安全与环境学报,2011,11(2):142-147. (MA Qitao, WANG Baoqing. Estimation of non-point source pollution loads in Tianjin Binhai New Area[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11 (2): 142-147. (in Chinese))
- [28] 郑建,韩会庆,蔡广鹏,等. 贵州省农业非点源氮、磷污染时空特征分析[J]. 长江科学院院报,2013,30(6):1-4. (ZHENG Jian, HAN Huiqing, CAI Guangpeng, et al. Spatial-temporal characteristic of agricultural non-point source nitrogen and phosphorous pollution in Guizhou[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013,30(6):1-4. (in Chinese))
- [29] 付超,苏晶,赵海萍,等. 基于GIS的漳河上游城市非点源污染负荷估算[J]. 水资源保护,2020,36(3):60-66. (FU Chao, SU Jing, ZHAO Haiping, et al. Estimation of urban non-point source pollution load in upper reaches of Zhanghe River based on GIS [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):60-66. (in Chinese))
- [30] 王晶洁. 河北省农村环境污染问题及治理对策研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [31] 吴珺. 农业污染优先控制区划分—以安徽省为例. [D]. 合肥:安徽农业大学,2013.
- [32] 林绍霞. 贵州区域土壤农业非点源污染物特征研究[D]. 贵阳:贵州大学,2009.
- [33] 彭里. 重庆市畜禽粪便污染调查及防治对策[D]. 重庆:西南农业大学,2004.
- [34] 梅涵一,刘云根,梁启斌,等. 阳宗海流域冬季典型农村污水污染特征及水质评价[J]. 水资源保护,2017,33(2):67-73. (MEI Hanyi, LIU Yungen, LIANG Qibin, et al. Pollution characteristics and water quality evaluation of typical rural sewage in winter in Yangzonghai Lake Basin [J]. Water Resources Protection,2017,33(2):67-73. (in Chinese))
- [35] 刘越,孟海波,沈玉君,等. 海南省畜禽粪便资源分布及总量控制研究[J]. 中国农业科技导报,2015,17(4):114-121. (LIU Yue, MENG Haibo, SHEN Yujun, et al. Studies on resource distribution and gross control of animal and poultry manure in Hainan Province [J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2015,17(4):114-121. (in Chinese))
- [36] HOU Ying, CHEN Weiping, LIAO Yuehua, et al. Modelling of the estimated contributions of different sub-watersheds and sources to phosphorous export and loading from the Dongting Lake Watershed, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189 (12):1-20.
- [37] LIU Ruimin, DONG Guangxia, XU Fei, et al. Spatial-temporal characteristics of phosphorus in non-point source pollution with grid-based export coefficient model and geographical information system [J]. Water Science & Technology,2015,71(11):1709-1717.
- [38] WU Lei, LI Pengcheng, MA Xiaoyi. Estimating non-point source pollution load using four modified export coefficient models in a large easily eroded watershed of the loess hilly-gully region, China [J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(13):1-13.
- [39] WU Lei, GAO Jianen, MA Xiaoyi, et al. Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22 (14): 10647-10660.

(下转第172页)

- Management,2015,29(1):102-106. (in Chinese))
- [8] 尹贻林,严玲. 论政府投资项目建设组织实施方式及其监管模式[J]. 中国软科学,2003(12):16-21. (YIN Yilin, YAN Ling. Research on the supervision and management mode of public project [J]. China Soft Science,2003(12):16-21. (in Chinese))
- [9] 杨炳霖. 监管治理体系建设理论范式与实施路径研究: 回应性监管理论的启示[J]. 中国行政管理,2014(6): 49-56. (YANG Binglin. A study on the theoretical paradigm and roadmap of enhancing China's regulatory governance system: implications of responsive regulatory theory[J]. Chinese Public Administration,2014(6):49-56. (in Chinese))
- [10] 叶晓甦,张永艳,李小朋. 我国 PPP 项目政府监管机制设计[J]. 建筑经济,2010(4):93-96. (YE Xiaosheng, ZHANG Yongyan, LI Xiaopeng. China's PPP project government supervision mechanism design [J]. Construction Economy,2010(4):93-96. (in Chinese))
- [11] 刘朝,赵志华. 第三方监管能否提高中国环境规制效率——基于政企合谋视角[J]. 经济管理,2017(7):34-44. (LIU Zhao, ZHAO Zhihua. Can the third party supervision improve the efficiency of China environment regulation:based on the perspective of collusion between government and enterprises [J]. Business Management Journal,2017(7):34-44. (in Chinese))
- [12] 张曼,唐晓纯,普冀喆,等. 食品安全社会共治:企业、政府与第三方监管力量[J]. 食品科学,2014,35(13): 286-292. (ZHANG Man, TANG Xiaochun, PU Mizhe, et al. Co-regulation in food safety governance: enterprises, government and the third party [J]. Food Science,2014, 35(13):286-292. (in Chinese))
- [13] 周瑶,梅达成. 遏制过度医疗之第三方监管研究[J]. 医学与哲学,2018,39(1):52-54. (ZHOU Yao, MEI Dacheng. Research on the third-party supervision of excessive medical treatment [J]. Medicine & Philosophy, 2018,39(1):52-54. (in Chinese))
- [14] SMITH J M, PRICE G R. The Logic of animal conflict [J]. Nature,1973,246(2):15-18.
- [15] TAYLOR P D, JONKER L B. Evolutionarily stable strategies and game dynamics[J]. Mathematical Bioences, 1978,40(1/2):145-156.

(收稿日期:2020-03-29 编辑:王 芳)

(上接第 147 页)

- [40] 彭兆弟,李胜生,刘庄,等. 太湖流域跨界区农业面源污染特征[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(3):458-465. (PENG Zhaodi, LI Shengsheng, LIU Zhuang, et al. Characteristics of transboundary non-point source agricultural pollution in the Taihu Valley [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2016,32(3):458-465. (in Chinese))
- [41] 林秀春,张宇,江明坤. 荻芦流域农业面源污染负荷研究[J]. 中国水土保持,2013(8):50-53. (LIN Xiuchun, ZHANG Yu, JIANG Mingkun. Pollution load of agricultural non-point source in Qiulu Watershed [J]. Soil and Water Conservation in China,2013(8):50-53. (in Chinese))
- [42] 傅春,康晚英. 环鄱阳湖区农业面源污染 TN/TP 时空变化与分布特征[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(7):864-868. (FU Chun, KANG Wanying. Research on spatial characteristics of TN & TP of agricultural non-point source pollution in the surrounding area of the Poyang Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2012,21(7):864-868. (in Chinese))
- [43] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究 [D]. 北京:中国农业科学院,2011.
- [44] 罗文敏,张清海,林绍霞,等. 贵州省农业非点源污染因子识别及其敏感性评价[J]. 江苏农业科学,2010(3): 401-403. (LUO Wenmin, ZHANG Qinghai, LIN Shaoxia, et al. Identification of agricultural non-point source pollution factors and their sensitivity evaluation in Guizhou Province [J]. Jiangsu Agricultural Science,2010(3):401-403. (in Chinese))
- [45] 梁流涛,冯淑怡,曲福田. 农业面源污染形成机制:理论与实证[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(4):74-80. (LIANG Liutao, FENG Shuyi, QU Futian. Forming mechanism of agricultural non-point source pollution: a theoretical and empirical study [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(4):74-80. (in Chinese))
- [46] 张大弟,张晓红,章家骥,等. 上海市郊区非点源污染综合调查评价[J]. 上海农业学报,1997,13(1):31-36. (ZHANG Dadi, ZHANG Xiaohong, ZHANG Jiaqi, et al. Integrated research and evaluation on non-point source pollution in Shanghai Suburbs [J]. Acta Agriculturae Shanghai,1997,13(1):31-36. (in Chinese))
- [47] 陈守越. 南通市农业面源污染负荷研究与综合评价 [D]. 南京:南京农业大学,2011.
- [48] 熊汉锋,万细华. 农业面源氮磷污染对湖泊水体富营养化的影响[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):25-27. (XIONG Hanfeng, WAN Xihua. Investigation of nitrogen and phosphorus loadings on Liangzi Lake from agricultural non-point source [J]. Environmental Science & Technology,2008,31(2):25-27. (in Chinese))
- [49] 宋太平,庄大方,陈巍. 安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价[J]. 环境科学,2012,33(1):110-116. (SONG Daping, ZHUANG Dafang, CHEN Wei. Risk assessment of the farmland and water contamination with the livestock manure in Anhui Province [J]. Environmental Science,2012,33(1):110-116. (in Chinese))

(收稿日期:2020-02-16 编辑:王 芳)