

苏州市农业面源污染源强解析与评价

姜 滢¹, 王子博¹, 尤悦文¹, 徐培杰¹, 陈重军^{1,2*}

(1.苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2.江苏省环境科学与工程重点实验室, 江苏 苏州 215009)

摘要:采用清单分析、等标排放量、内梅罗综合水质指数评价等方法,对长三角典型区域苏州市的农业面源污染的来源、地区分布和污染风险进行了解析。研究结果发现,苏州市农业面源污染物排放量较大,年排放 COD 171 268.2 t,氨氮 6 510.5 t、总氮 21 839.3 t,总磷 3 335.7 t,属于典型的生产与生活复合型污染。面源污染物来源多元化,发现畜禽养殖业是 COD 和总磷排放的重要来源,而氨氮和总氮主要来自农村生活源。按照地区来说,太仓市 COD 和总磷排放量居首,而苏州市区是氨氮和总氮的最主要排放地区。苏州市农业面源污染造成的综合水质指数均值为 2.6,在中等污染水平,其中苏州市区和昆山市为轻污染,张家港市为中等污染,而常熟市和太仓市均属于严重污染区域。农业面源污染强度与地方农林经济并未有显著的关系。

关键词:苏州市;农业面源污染;源解析;评价

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)04-0363-07

doi: 10.13254/j.jare.2015.0012

Estimation and Source Apportionment of Agricultural Non-point Source Pollution in Suzhou City, China

JIANG Ying¹, WANG Zi-bo¹, YOU Yue-wen¹, XU Pei-jie¹, CHEN Chong-jun^{1,2*}

(1.School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2.Key Lab of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215009, China)

Abstract: The primary source, influence factors and spatial distribution characteristics of agricultural non-point source pollution in Suzhou City (a typical area of the Yangtze River Delta) were analyzed by inventory analysis, equivalent standard load and Nemerow analysis methods of water quality. Results showed that the absolute real emissions of COD, ammonium nitrogen, TN and TP from agricultural non-point source pollution in Suzhou were still greater, which was 171 268.2, 6 510.5, 21 839.3 t·a⁻¹ and 3 335.7 t·a⁻¹, respectively. And the agricultural non-point source pollution in Suzhou was combined with production and life sources. In addition, livestock industry was an important source of the emission of COD and total phosphorus, while ammonium nitrogen and total nitrogen were mainly coming from rural life source. However, Taicang City was the most severe area of COD and TP emission, while ammonium nitrogen and TN were mainly discharged from the Suzhou urban area. The mean value of comprehensive water quality index (CWQI) of Suzhou City was 2.6, reaching the moderate pollution level. As for the different zones in Suzhou City, the comprehensive water quality index of Changshu and Taichang all reached serious pollution level; Suzhou urban area and Kunshan were light pollution and Zhangjiagang was moderate pollution, respectively. In contrast, there was no significant relationship between the agricultural non-point source pollution intensity and local agro-forestry economy.

Keywords: Suzhou City; agricultural non-point source pollution; source apportionment; estimation

农业面源污染已成为我国农业农村极为突出的环境问题,是导致水环境恶化的主要原因^[1-2]。而太湖流域是我国人口密度最大、工农业生产发达、国民经

济产值和人均收入增长幅度最快的地区,同样是我国农业面源污染的典型区域。据统计,太湖流域来自农业农村面源的 COD、总氮、氨氮、总磷分别占各自总量的 45.2%、51.3%、43.4%、67.5%,是太湖流域的首要污染源^[3]。太湖流域农业面源污染的形势严峻,成为长三角地区乃至全国农业面源污染治理的焦点。

苏州地处太湖之滨,近年来经济高速发展,是太湖流域重要的城镇,对太湖流域水质改善具有重要地位。近年来,苏州市对工业点源污染进行了大力整治,

收稿日期:2015-01-09

基金项目:江苏省高校自然科学基金项目(14KJB610008);苏州市科技计划项目(SYN201411)

作者简介:姜 滢(1994—),女,山东烟台人,在读本科生,研究方向为环境工程。E-mail: jying753951@163.com

* 通信作者:陈重军 E-mail: chongjunchen@163.com

取得了较好的进展,工业和城镇污染量明显降低。但针对广大农业农村污染,污染量大、污染面广,日益成为苏州市主要的污染源。近年来,太湖流域进行了农业污染的源解析^[4-5],但研究角度多仅着眼于此,而在农业面源污染造成的水质的危害后果及程度研究方面较少^[6]。特别是针对苏州市,还缺乏针对农业面源污染总量统计、各农业产业的源强和各县(市)污染排放贡献率等的分析,严重阻碍了农业面源污染的减控工作。因此,亟需开展苏州市农业面源污染源强统计和分析,为太湖地区乃至全国经济高度发展地区的区域农业面源污染的调查和分析提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

(1)本文将苏州市分成 5 县(市或区),分别为苏州市区(包括姑苏区、吴中区、相城区、高新区、工业园区和吴江区)、常熟市、张家港市、昆山市和太仓市。

(2)种植业(包括林地)、畜禽、水产、农村生活、农村人口等基础数据选自 2013 年苏州市统计年鉴^[7],其中林地统计数据来自于 2012 年苏州市统计年鉴^[7]。

(3)各县(市)地表水资源数据选自 2012 年苏州市水资源公报^[8]。

(4)各县(市)农林牧总产值数据选自各县市 2012 年国民经济和社会发展统计公报^[9]。具体数据见表 1。

1.2 排污系数选择

本文种植业、畜禽和水产行业的排污系数选自第一次全国污染源普查农业污染源肥料流失系数手册、畜禽养殖业源产排污系数手册以及水产养殖业污染

源产排污系数手册,而农村生活排污系数来自“村镇生活污染防治最佳可行技术指南(试行)”,具体见表 2。

1.3 等标排放总量

采用等标排放量评价方法对苏州市农业面源污染进行分析,该方法主要反映污染源本身潜在的污染水平,采用等标污染负荷法对污染源进行评价,把污染源污染物的排放量转化为“把污染物全部稀释到评价标准所需要的介质质量”,使得同一污染源所排放的污染物之间、不同污染源之间在对环境的潜在影响上进行比较成为可能^[10]。以“地表水环境质量标准”(GB 3838—2002)规定的Ⅲ类标准为依据,评价 COD、总氮和总磷等指标,规定的 COD 为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总氮为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[11]。评价标准的计算公式为:

$$D_i = \frac{Q_i}{S_i} (\times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$$

式中, Q_i 是 i 污染物的年排放量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); S_i 是评价标准($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); D_i 为等标排放量($10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)^[12]。

D 的物理意义是:将 Q 数量的污染物稀释到评价标准的浓度,需要用多少量的纯净水。进而可以计算污染源和污染物的等标负荷比(率),反映了各位污染物对水体环境影响的大小,计算公式如下:

$$\text{等标污染负荷比} = \frac{\text{单项等标污染负荷}}{\text{总污染负荷}} \times 100\%$$

1.4 污染风险分析

(1)农业面源污染造成的水质浓度

某污染物水质浓度=(该污染物绝对实物排放量×

表 1 苏州市农业统计数据

Table 1 The agricultural statistics data of Suzhou City

类型	苏州市区	常熟	张家港	昆山	太仓	全市
水田/ hm^2	18 520	22 360	18 930	8 010	15 320	83 140
旱地/ hm^2	16 710	25 310	25 440	11 120	18 510	97 090
菜地/ hm^2	22 140	27 000	11 440	6 100	16 160	82 840
茶园/ hm^2	2 233	131	52	—	—	2 416
桑园/ hm^2	3 568	—	—	—	33	3 601
果园/ hm^2	6 571	1 337	1 312	1 039	607	10 866
林业/ hm^2	48 035	7 718	7 467	8 236	5 309	76 765
生猪/万头	46.25	24.51	12.09	7.76	22.83	113.44
牛/万头	0.67	0.42	0.43	0.27	0.49	2.28
羊/万只	3.38	1.18	1.25	0.11	2.32	8.24
家禽/万羽	300.66	233.87	192.96	32.73	2 140	2 900.22
养殖/t	128 683	35 276	16 856	52 199	15 120	248 134
农村人口/人	1 181 159	541 802	447 048	493 637	256 780	2 920 426

表 2 农业面源各行业产污系数
Table 2 The pollution producing ratio of all agricultural non-point industries

类型		COD	总氮	总磷	氨氮	备注
农业用地/kg·667 m ⁻²	水田	1.314	0.933	0.077	0.177	采用南方湿润平原区数据
	旱地、桑茶果园或林地	1.496	1.331	0.107	0.079	
	菜地	1.496	1.233	0.389	0.107	
畜禽养殖/g·头羽 ⁻¹ ·d ⁻¹	生猪 干清粪	34.93	7.17	0.47	1.2	以育肥猪计算,干清粪估算 60%
	水冲	186.67	12.36	2.58	1.2	
	牛 干清粪	157.27	52.37	3.26	16.51	以育成牛计算,干清粪估算 60%
	水冲	1 321.19	75.28	9.86	16.51	
	羊	11.6	2.4	0.2	0.4	3 头羊=1 头猪
	家禽 干清粪	2.32	0.07	0.02	0.021	以商品肉鸡计算,干清粪估算 60%
水产养殖/g·kg ⁻¹		73.887	6.484	1.275	1.945 2	
农村生活/g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹		16.4	8	0.67	4	以浙江省为例

注:(1)本文种植业 COD 数据来自参考文献[13]和[14];(2)生猪、牛、家禽的养殖周期分别为 199、365 d 和 210 d,摘自国家环境保护部文件环发[2004]43 号“关于减免家禽业排污费等有关问题的通知”中附件 2:畜禽养殖排污系数表;(3)畜禽养殖业污染物排放标准(GB 18596—2001)规定,3 头羊产生的污染物可以折算成 1 头猪。

进入地表水系数)/该地区地表水资源总量

农业面源污染进入地表水的系数还未有成熟的计算方法,而且针对不同产生源、产生源的位置、污染物排放规律等均相关。本文采用《太湖流域主要入湖河流水环境综合整治规划编制技术规范》的入河系数,种植业系数 0.1~0.3,畜禽养殖系数 0.5~0.8,水产养殖系数 0.8~1.0,农村生活系数 0.1~0.2,本文取中间值,种植业、畜禽养殖、水产养殖和农村生活的入河系数分别取 0.2、0.65、0.9 和 0.15。

(2)农业面源污染造成的水质指数

单项水质指数=污染物排放浓度/环境质量标准

本文以“地表水环境质量标准”(GB 3838—2002)规定的Ⅲ类水为基准,规定的 COD 为 20 mg·L⁻¹,总氮为 1.0 mg·L⁻¹,总磷为 0.2 mg·L⁻¹,氨氮为 1.0 mg·L⁻¹。

综合水质指数采用内梅罗(Nemerow)法计算^[15]:

$$P=\sqrt{\frac{(\frac{C_i}{S_i})_{\max}^2+(\frac{C_i}{S_i})_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中,P 为内梅罗综合指数,(C_i/S_i)_{max} 为单项水质指数的最大值,(C_i/S_i)_{ave} 为水质指数的平均值。具体评价标准见表 3^[16]。

表 3 内梅罗综合水质指数评价标准
Table 3 The comprehensive water quality index evaluation standard by Nemerow

内梅罗指数	0<P<0.7	0.7≤P<1.0	1.0≤P<2.0	2.0≤P<3.0	P≥3.0
污染程度	安全	警戒级	轻污染	中污染	严重污染

2 结果与分析

2.1 苏州市农业面源污染总量

苏州市农业面源每年排放 COD 171 268.2 t、氨氮 6 510.5 t、总氮 21 839.3 t、总磷 3 335.7 t(表 4)。虽然苏州工业经济高度发展,但农业面源的污染物排放量依旧很大。按照来源来分,畜禽养殖业是农业面源 COD 排放的重要来源,占 74.55%;而水产养殖、农村生活源和种植业分别占 10.70%、10.21%和 4.54%。但是,农村生活是氨氮和总氮的最主要来源,分别占 65.49%和 39.05%;而畜禽养殖是氨氮的第二大排放源,占 18.19%;种植业和水产养殖居后,占 8.90%和 7.41%。除农村生活源外,总氮排放依次为种植业 29.78%>畜禽养殖 23.81%>水产养殖 7.37%。与 COD 排放一致,畜禽养殖是总磷的主要排放源,占 42.56%,种植业和农村生活基本接近,分别为 26.55%和 21.41%,水产养殖源仅占 9.49%。

按照产生区域来看(表 5),太仓市的 COD 和总磷排放居首,分别占 48.88%和 32.83%,主要是太仓市家禽养殖量较大所致。2012 年太仓市家禽出栏量 2 140 万羽,占整个苏州市的 73.78%,为太仓市 COD 和总磷排放作出“最大贡献”。而苏州市区是氨氮和总氮的最主要排放地区,分别占 36.61%和 35.59%。这主要是因为市区是生猪养殖量最高的地区,2012 年内出栏量 46.25 万头,占全市的 40.77%,造成该地区氮素排放量明显高于其他地区。

表 4 苏州市农业面源污染物行业来源情况

Table 4 The industry sources of agricultural non-point source pollution in Suzhou

行业	COD		总氮		总磷		氨氮	
	排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%
种植业	7 777.7	4.54	6 503.8	29.78	885.5	26.55	579.7	8.90
畜禽养殖	127 674.9	74.55	5 199	23.81	1 419.6	42.56	1 184.3	18.19
水产养殖	18 333.9	10.70	1 608.9	7.37	316.4	9.49	482.7	7.41
农村生活	17 481.7	10.21	8 527.6	39.05	714.2	21.41	4 263.8	65.49
小计	171 268.2		21 839.3		3 335.7		6 510.5	

表 5 苏州市农业面源污染物区域来源情况

Table 5 The source region of agricultural non-point source pollution in Suzhou

区域	COD		总氮		总磷		氨氮	
	排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%	排放量/t	比例/%
苏州市区	39 999.8	23.36	7 771.7	35.59	974.6	29.22	2 383.7	36.61
常熟市	21 435.1	12.52	4 068.6	18.63	576.1	17.27	1 150.0	17.66
张家港市	15 324.3	8.95	3 069.9	14.06	386.9	11.60	901.5	13.85
昆山市	10 793.7	6.30	2 644.8	12.11	303.1	9.09	921.0	14.15
太仓市	83 715.4	48.88	4 284.3	19.62	1 095.1	32.83	1 154.3	17.73
小计	171 268.2		21 839.3		3 335.7		6 510.5	

2.2 苏州市农业面源污染源评价

按照国家地表水环境质量Ⅲ类水标准,苏州市农业面源污染物的等标排放总量达到 361 亿 m^3 , 其中最大的是 TP 等标排放量,为 166 亿 m^3 ,其次 TN 的等标排放量为 109 亿 m^3 ,而 COD 的等标排放量为 86 亿 m^3 (表 6)。也就是说,如果不考虑水环境内生态系统、水体自净、水生动植物的净化能力、河床的净化、吸附、转移、沉淀等作用,每年需要有 361 亿 m^3 的纯净水资源来容纳这些污染物,才能使苏州市的地表水达到Ⅲ标准。同时,由表 6 可知,在苏州市农业面源污染物中,TP 的等标污染负荷比最大,为 46.12%,其次是 TN 为 30.20%,而绝对排放量最大的 COD 对水体

环境影响相对较小,为 23.68%。

2.3 苏州市农业面源污染风险分析

根据内梅罗综合水质指数评价标准(表 7),苏州市农业面源污染造成的综合水质指数均值为 2.6,在中等污染水平。而下属的 5 个镇区,市区和昆山市为轻度污染,水质综合指数为 1.6 和 1.9;张家港市为中等污染,水质综合指数为 2.7;常熟市和太仓市均属于严重污染区域,水质综合指数分别为 3.1 和 15.0。尤其是太仓市,水质综合指数高达 15.0,是严重污染线($P=3.0$)的 5 倍,是苏州市农业面源污染风险最高的区域。

2.4 农业面源污染与经济的关系

由图 1 可知,苏州市市区、常熟、张家港、昆山和太仓市人均农林牧产值分别为 65.5 万、32.2 万、25.0 万、18.0 万元和 29.6 万元,各县(市)差距较大,其中市区最高。但人均 COD、总氮、总磷和氨氮产量,太仓市均远远高于其他县(市),分别达到 326.0、16.7、4.3 $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$ 和 4.5 $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$ 。而其他 4 个县(市)人均污染物产量基本相当,人均 COD、总氮、总磷和氨氮产量分别在 21.9~39.6、5.4~7.5、0.6~1.1 $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$ 和 1.9~2.1 $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$ 之间。相比而言,昆山市的人均农业面源污染排放量最低,COD、总氮、总磷和氨氮产量分别为 21.9、5.4、0.6 $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$ 和 1.9 $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$ 。

表 6 苏州各类农业面源污染物排放量及等标排放率

Table 6 The emissions and emission standard rate of agricultural non-point source pollution in Suzhou

区域	COD/ 10^6 m^3	TN/ 10^6 m^3	TP/ 10^6 m^3	总计/ 10^6 m^3
苏州市区	2 000	3 886	4 873	10 759
常熟	1 072	2 034	2 880	5 986
张家港	766	1 535	1 935	4 236
昆山	540	1 322	1 515	3 377
太仓	4 186	2 142	5 475	11 803
总计(全市)	8 563	10 920	16 678	36 161
等标污染负荷比/%	23.68	30.20	46.12	100

表 7 苏州市农业面源污染水质浓度与水质指数
Table 7 The water concentration and water quality index of agricultural non-point source pollution in Suzhou

区域	进入水体的浓度/mg·L ⁻¹				水质指数				
	COD	总氮	总磷	氨氮	COD	总氮	总磷	氨氮	平均指数
苏州市区	17.3	1.9	0.3	0.5	0.9	1.9	1.5	0.5	1.2
常熟市	35.7	3.6	0.6	0.9	1.8	3.6	3.1	0.9	2.4
张家港市	31.9	3.3	0.5	0.8	1.6	3.3	2.6	0.8	2.1
昆山市	17.4	2.2	0.3	0.7	0.9	2.2	1.7	0.7	1.4
太仓市	305.0	11.3	3.5	3.0	15.3	11.3	17.6	3.0	11.8
平均	41.5	3.0	0.6	0.8	2.1	3.0	3.0	0.8	2.2

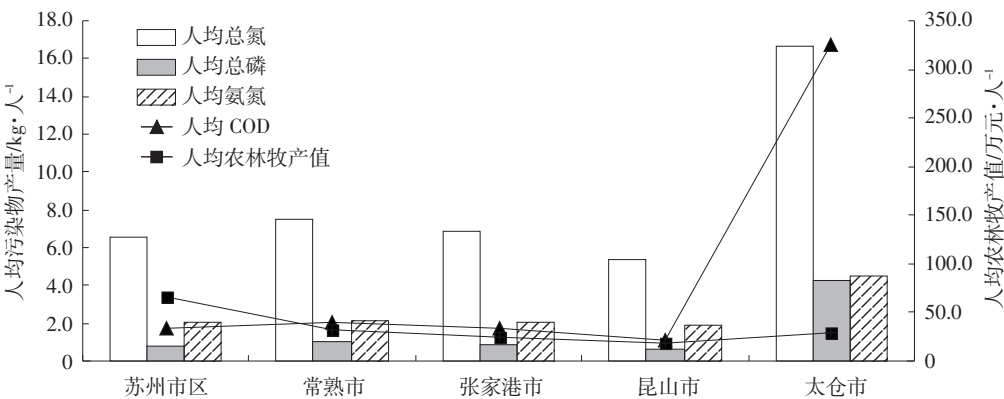


图 1 各县(市)人均污染物产量与人均农林牧产值之间的关系

Figure 1 Relationship between per capita quantity of pollutants and per capita agriculture, forestry, animal husbandry output value in Suzhou

同时,万元农林牧产值产生的 COD、总氮、总磷太仓市最高,分别为 145.5、7.4 kg·万元⁻¹ 和 1.9 kg·万元⁻¹(表 8)。特别是 COD,是其他地区的 4~5 倍,总磷也是其他地区的 2 倍多。相对于 COD 和总磷,太仓市万元农林牧产值产生的总氮仅略高于其他地区,但苏州市各县(区)万元农林牧产值产生的氨氮基本接近,在 1.8~2.2 kg·万元⁻¹ 之间。

3 讨论

苏州市农业面源污染较为严重,来源丰富。从苏

州市农业污染来源上看,本文结果与蔡金洲等^[17]研究的湖北省三峡库区农业面源污染主要污染源,钱秀红等^[12]研究的杭嘉湖水网平原农业非点源污染的综合调查结果基本类似,农业面源污染主要来源为畜禽养殖业、种植业和农村生活源。说明苏州市农业面源污染同属于生产与生活复合型污染。

从成分分析,总磷和总氮是影响苏州市农村地区水环境质量的重要原因,推测也是造成水体富营养化现象多见的主要原因。苏州市地处太湖地区,而太湖在 20 世纪 80 年代初都处于或接近中营养状态,此后富营养化程度持续升高,直至目前的轻度-中度富营养状态^[18]。氮磷是造成水体富营养化的主要营养元素。针对日益加剧的水体富营养化,亟需控制入河或者入湖氮磷总量^[19]。总氮和总磷主要来自畜禽养殖业、农村生活和农田施肥。因此,首先应严格控制苏州市畜禽养殖量,加大建设厌氧-好氧相结合的碳氮磷同步脱除工艺,特别要重视畜禽养殖废水磷素的去除,可采用磷酸铵镁沉淀(MAP)法对磷进行回收^[20]。同时,针对农村人口的氮素污染,应大力推进农村生活污水脱氮除磷处理设施的覆盖率,提高污水收集率,提升出水指标,降低农村生活源氮磷的排放。种植业亦是

表 8 苏州各地区单位农林牧产值产生污染物

Table 8 The pollutants per agriculture, forestry, animal husbandry output value at all area in Suzhou

区域	万元农林牧产值产生污染物/kg·万元 ⁻¹			
	COD	TN	总磷	氨氮
苏州市区	31.5	6.1	0.8	1.9
常熟市	34.2	6.5	0.9	1.8
张家港市	31.4	6.3	0.8	1.9
昆山市	25.9	6.4	0.7	2.2
太仓市	145.5	7.4	1.9	2.0
平均值	50.7	6.5	1.0	1.9

氮磷的主要来源之一,虽然苏州市种植业化肥施用强度已下降到 $240.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [21],但依旧高于国际上为防止水体污染而设置的化肥使用安全上限 ($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),是美国平均用量 ($108.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 2.2 倍 [17,22]。而且,苏州市肥料利用率偏低,特别是氮肥当季利用率仅约 30%,与发达国家相差 20%,与国内先进地区相差 10% [21]。在种植业方面,应加大有机肥施用比例,尽快实现化肥的精细化控制,氮磷合理配施 [23],并建设多级阶梯式生态拦截工程,在降低种植业氮磷源头流失的基础上,降低氮磷入河量。

从苏州市农业面源产生量与经济关系来看,昆山市人均农业面源污染物的排放量与人均农林牧产值存在一定的联系,该市人均农林牧产值最低,造成人均面源污染物的排放量较小。但其余县(市)之间并未有明显规律,可能是各县区农村集体经济较为发达,种类多样化,产业的劳动力分布不均衡,污染物产量也不尽相同,造成农村人均经济价值与污染物排放并不相关。从万元农林牧产值产生的污染物质来看,除太仓市外,其余各县(市)基本一致,推测是苏州市农村经济已经逐渐趋向于经济附加值较高的农牧产业,导致万元农林牧产值产生的污染物均一化。目前,农业面源产生量与经济之间的关系研究还较为薄弱,还需进一步加强研究。

值得一提的是,太仓市的农业面源污染现状在整个苏州市最为严重,且在人均污染物产生量及万元农林牧产值产生的污染物方面均处于首位,这可能跟农业产业结构相关,特别是太仓市大规模家禽养殖业促使污染物产生量大幅度增加,但该产业产值相对较低。因此,亟需加大太仓市农业产业结构优化调整,优化农业资源配置,淘汰或削减落后的、污染物排放量大的农业产业,从传统的大规模家禽养殖业向其他新兴或者污染少的农业产业转变,并加强面源污染的治理,将对苏州市农业面源污染的治理具有积极作用 [24]。

4 结论

苏州市农业面源污染物排放量大面广,年排放 COD 171 268.2 t、氨氮 6 510.5 t、总氮 21 839.3 t、总磷 3 335.7 t,属于典型的生产与生活复合型污染。同时,面源主要污染物来源多样,畜禽养殖业是 COD 和总磷排放的重要来源,而氨氮和总氮主要来自农村生活源。太仓市的 COD 和总磷排放量居首,而苏州市区是氨氮和总氮的最主要排放地区。农业面源污染造成的综合水质指数均值为 2.6,在中等污染水平。研究结果

对我国经济快速发展区域的农业面源污染减控工作的开展具有参考价值,但还需要在以下方面开展工作:(1)纳入农村垃圾、农田地膜、农药等面源污染源;(2)开展现场调研,确定各地区差异化污染物排放系数;(3)综合评价农业面源污染与经济、社会、环境质量的响应关系。

参考文献:

- [1] 张金恒,王军强,万 玉,等. 青岛市农业面源污染评价研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(10): 276-280.
ZHANG Jin-heng, WANG Jun-qiang, WAN Yu, et al. Agricultural non-point source pollution investigation and assessment in Qingdao[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(10): 276-280. (in Chinese)
- [2] Shen ZhenYao, Liao Qian, Hong Qian, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 84(9): 104-111.
- [3] 中华人民共和国环境保护部, 国家统计局, 农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 2010.
- [4] 姜 峰, 崔春红. 基于清单分析的江苏省农业面源污染时空特征及源解析[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(6): 961-967.
JIANG Feng, CUI Chun-hong. Temporal and spatial characteristics and source apportionment of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province based on inventory analysis[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2012, 39(6): 961-967. (in Chinese)
- [5] 刘 庄, 李维新, 张毅敏, 等. 太湖流域非点源污染负荷估算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(S1): 45-48.
LIU Zhuang, LI Wei-xin, ZHANG Yi-min, et al. Estimation of non-point source pollution load in Taihu Lake Basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(S1): 45-48. (in Chinese)
- [6] 钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞, 等. 基于水环境功能区划的农业面源污染源解析及其空间异质性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 103-108.
QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, GUO Chun-xia, et al. Source apportionment and spatial heterogeneity of agricultural non-point source pollution based on water environmental function zoning[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 103-108. (in Chinese)
- [7] 苏州市统计局. 2012 年、2013 年苏州市统计年鉴[M/OL]. <http://www.szttj.gov.cn/> 2014-1-21.
- [8] 苏州市水利局. 2012 年苏州市水资源公报[R/OL]. <http://www.slj.suzhou.gov.cn/> 2013-7-23.
- [9] 苏州市统计局. 2012 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. <http://www.szttj.gov.cn/> 2013-4-16.
- [10] 黄东风, 李卫华, 邱孝煊, 等. 水口库区流域农业面源污染评价及其防治对策[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 1031-1036.
HUANG Dong-feng, LI Wei-hua, QIU Xiao-xuan, et al. Evaluation of agricultural non-point source pollution and counter measures in Shuikou Reservoir drainage area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 1031-1036. (in Chinese)
- [11] 李荣刚, 夏源陵, 吴安之, 等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的

- 排放量[J]. 湖泊科学, 2000, 12(2): 147-153.
- LI Rong-gang, XIA Yuan-ling, WU An-zhi, et al. Pollutants sources and their discharging amount in Taihu Lake area of Jiangsu Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(2): 147-153. (in Chinese)
- [12] 钱秀红, 徐建民, 施加春, 等. 杭嘉湖水网平原农业非点源污染的综合调查和评价[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(2): 147-150.
- QIAN Xiu-hong, XU Jian-min, SHI Jia-chun, et al. Comprehensive survey and evaluation of agricultural nonpoint source pollution in Hang-Jia-Hu waternet plain[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2002, 28(2): 147-150. (in Chinese)
- [13] 李 静, 闵庆文, 李文华, 等. 基于污染足迹的太湖流域稻作农业污染评估——以常州市和宜兴市为例[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 372-380.
- LI Jing, MIN Qing-wen, LI Wen-hua, et al. Pollution assessment of rice agriculture in the Taihu Lake watershed based on the pollution footprint: A case study of Changzhou City and Yixing City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(4): 372-380. (in Chinese)
- [14] 张桂英, 汪祖强. 苏南太湖地区农田水中 COD 的调查研究[J]. 农村生态环境, 1994, 10(2): 41-44.
- ZHANG Gui-ying, WANG Zu-qiang. Investigation on the COD balance in agricultural water of Taihu Lake region[J]. *Rural Eco-environment*, 1994, 10(2): 41-44. (in Chinese)
- [15] Yang Zhongping, Lu Wenxi, Long Yuqiao, et al. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 108(1): 27-38.
- [16] 陆尤尤, 胡清宇, 段华平, 等. 基于“压力-响应”机制的江苏省农业面源污染源解析及其空间特征[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(6): 731-735.
- LU You-you, HU Qing-yu, DUAN Hua-ping, et al. Spatial distribution characteristics and source origin of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province based on pressure-response system[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(6): 731-735. (in Chinese)
- [17] 蔡金洲, 范先鹏, 黄 敏, 等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1421-1430.
- CAI Jin-zhou, FAN Xian-peng, HUANG Min, et al. Sources analysis of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1421-1430. (in Chinese)
- [18] 陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 438-443.
- CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan. Status quo, historical evolution and causes of eutrophication in typical lake regions of China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4): 438-443. (in Chinese)
- [19] 高廷耀, 顾国维, 周 琪. 水污染控制工程(第三版, 下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [20] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- WU Shu-xia. The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China[D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005. (in Chinese)
- [21] 苏州市人民政府. 苏州市太湖水环境综合治理实施方案(2007—2020)[R]. 2008.
- [22] 周 军, 叶 珍, 马 云, 等. 牡丹江流域农业面源污染特征及防治对策研究[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(2): 46-48.
- ZHOU Jun, YE Zhen, MA Yun, et al. Research on the characters of agricultural non-point pollution and control countermeasures in Mudan River basin[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(2): 46-48. (in Chinese)
- [23] 刘德平, 杨树青, 史海滨, 等. 氮磷施肥条件下作物产量及水肥利用效率[J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 902-909.
- LIU De-ping, YANG Shu-qing, SHI Hai-bin, et al. Crop yield and water-fertilizer utilization efficiency under combined application of nitrogen and phosphorous[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 902-909. (in Chinese)
- [24] 孙棋棋, 张春平, 于兴修, 等. 中国农业面源污染最佳管理措施研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 772-778.
- SUN Qi-qi, ZHANG Chun-ping, YU Xing-xiu, et al. Best management practices of agricultural non-point source pollution in China: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 772-778. (in Chinese)