

## 基于清单分析的江苏省农业面源污染时空特征及源解析

姜 峰, 崔春红\*

(南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

**摘 要:** 通过清单分析方法, 估算了江苏省总体的及其 13 个城市的农田化肥、畜禽养殖、水产养殖、农田固体废物废弃物以及农村生活等 5 类主要农业面源污染来源化学需氧量 (COD)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的排放总量、排放浓度及其贡献率, 从时间和空间的角度分析了江苏省在 1990~2009 年间农业面源污染变化程度及各市分布差异。结果表明, 江苏省农业面源污染 COD、TN 和 TP 的排放总量从 1990 年的 64.20、54.29 和 4.78 万 t 增加到 2009 年的 96.88、72.87 和 8.33 万 t, 排放浓度从 1990 年的 20.978、17.740 和 1.560 mg·L<sup>-1</sup> 增加到 31.654、23.810 和 2.721 mg·L<sup>-1</sup>。2009 年江苏省 13 个城市的农业面源污染差异较大, COD、TN、TP 的排放总量分别在 2.459~17.263、1.619~14.403、0.177~1.757 万 t, 排放浓度分别在 11.261~105.597、6.135~90.005、0.813~9.239 mg·L<sup>-1</sup>。农业面源污染 COD 和 TP 的主要来源是畜禽养殖, 而 TN 的主要来源是农田化肥。

**关键词:** 清单分析; 江苏省; 农业面源污染; 时空特征; 源解析

中图分类号: X821

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2012)06-0961-07

### Temporal and spatial characteristics and source apportionment of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province based on inventory analysis

JIANG Feng, CUI Chun-hong

(College of Resources and Environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

**Abstract:** The inventory analysis method was used to determine the discharge amount, density, and contribution of chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) from different types of agricultural non-point sources, including chemical fertilizer application, livestock farming, aquaculture, farmland solid waste, and rural life in Jiangsu province and other 13 cities in Jiangsu. The results indicated that the discharge amount of COD, TN, and TP were increased from 64.20, 54.29, and 4.78 to 96.88, 72.87, and 8.33 ten thousand tons, respectively. The densities of COD, TN, and TP were increased from 20.978, 17.74 and 1.560 mg·L<sup>-1</sup> to 31.654, 23.810 and 2.721 mg·L<sup>-1</sup> in Jiangsu province from year 1990 to 2009. There were significant differences in the 13 cities in Jiangsu. For example, the discharge amount of COD, TN, and TP were in the range of 24.59-172.63, 16.19-144.03 and 1.77-17.57 ten thousand tons, and the densities of COD, TN, and TP were 11.261-105.597, 6.135-90.005 and 0.813-9.239 mg·L<sup>-1</sup>, separately. Livestock farming was the most important source of COD and TP, while chemical fertilizer application was the most important source of TN.

**Key words:** inventory analysis; agricultural non-point source pollution; Jiangsu province; temporal and spatial characteristics; source apportionment

近年来城市和工业点源污染逐步得到有效控制, 而面源污染造成的水环境问题则日益凸现, 2010 年初发布的第一次全国污染源普查公报也揭示了农业源是中国水环境污染化学需氧量、总氮和总磷的主要来源。由农业生产和农村生活引起的面源污

染在相当长的时期内将成为制约农业可持续发展和农村水环境质量改善的重要因素, 因此, 农业面源污染负荷的确定、来源解析及控制措施已成为环境科学研究的热点问题之一<sup>[1]</sup>。

针对缺乏区域尺度上农业和农村污染综合定量

收稿日期: 2012-04-10

基金项目: 江苏省太湖污染治理项目 (TH2011210) 资助。

作者简介: 姜 峰, 男, 硕士研究生。E-mail: jiangfeng8541@126.com

\* 通讯作者: 崔春红, 女, 讲师。E-mail: chcui@njau.edu.cn

评价而造成的相关政策制定和管理的困难这一问题,国内一些学者采用平均浓度法<sup>[2]</sup>、水质水量相关法<sup>[3]</sup>、综合调查法<sup>[4]</sup>、单元调查法<sup>[5]</sup>和清单分析法<sup>[6]</sup>等方法对农业面源污染进行尝试性源解析。本研究利用清单分析的思路,以市为核算单位,对江苏省农业面源污染排放量进行估算,从时间和空间的角度分析江苏省1990~2009年农业面源污染变化程度及各市分布差异,为江苏省及各市农业面源污染防治规划提供一定依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

收集整理了1990~2009年《中国农村统计年鉴》、《江苏统计年鉴》以及农业统计资料及相关权威网站公布的数据。

### 1.2 方 法

本研究定义的农业面源污染是指进行农业生产和农村生活的过程中产生的污染物(COD、TN、TP),在降水或灌溉过程中,通过农田地表径流和农田排水等途径汇入地表水体引起的有机物或者氮、磷污染。主要包括农田化肥、畜禽养殖、水产养殖、农田固体废弃物、农村生活五类污染来源。在此基础上,将各类污染分解为单元(EU),并建立单元、污染产生量和污染排放量之间的关系。单元是指产生农业面源污染可合理计量的最小独立单元,它由江苏省农业面源污染的来源和特征决定。利用清单分析,提出了江苏省农业面源污染评估的3层结构,包括活动、单元和指标(表1)。活动是指造成农业面源污染的主要生产和生活活动,类别是对不同活动的细分,指标则是进行计算的数据要求。农业面源污染物排放量和排放浓度的计算公式如下<sup>[6]</sup>:

$$E = \sum_i EU_i \rho_i (1 - \eta_i) C_i (EU_i, S) \quad (1)$$

$$= \sum_i PE_i (1 - \eta_i) C_i (EU_i, S)$$

$$EI = \frac{E}{AL} \quad (2)$$

上式中: $E$ 为进入水系的农业面源污染的排放量; $EU_i$ 为单元*i*指标统计数; $\rho_i$ 为单元*i*污染物的产污强度系数; $\eta_i$ 为表征相关资源利用效率的系数; $PE_i$ 是农业(村)污染的产生量(产污量),即不考虑资源综合利用和管理因素时农业生产和农村生活造成的最大潜在污染量,它包括进入水体和不进入水体以及被生态环境自我净化3个部分; $C_i$ 为单元*i*污染物的排放系数,它由单元*EU<sub>i</sub>*和空间特征*S*

决定,表征区域环境、降雨、水文和各种管理措施对农业和农村污染的综合影响。 $EI$ 为农业面源污染的排放浓度,表征其对水环境的影响; $AL$ 为研究区域的地表水资源量。

在对江苏省及各市农业面源污染进行评估时,各产污系数及流失率根据典型地区相关研究<sup>[7-13]</sup>、调查获取,另外,本研究计算所需的江苏省及本市各类化肥施用量、不同种类的畜禽养殖量、农作物产量、乡村人口数量以及各地区经济发展水平等数据主要来自历年的《中国农村统计年鉴》、《江苏统计年鉴》以及各市统计年鉴和农业统计资料。由于涉及系数过多和文章篇幅限制,不一一列出各个系数数值,仅给出估算结果。

## 2 结果与分 析

### 2.1 农业面源污染核算结果

利用公式(1)和(2)对1990~2009年间江苏省及2009年各市农业面源COD、TN和TP的排放总量和排放浓度进行计算。由表2可知,江苏省农业面源污染COD、TN和TP的排放总量从1990年的64.20、54.29和4.78万t增加到2009年的96.88、72.87和8.33万t。从全省的排放浓度来看,全省COD、TN和TP的排放浓度从1990年的20.978、17.740和1.560 mg·L<sup>-1</sup>增加到31.654、23.810和2.72 mg·L<sup>-1</sup>。由此可见,1990~2009年间,COD的排放浓度均超过了地表水环境质量(GB3838-2002) III类标准(≤20 mg·L<sup>-1</sup>),尤其是从2001年起(2007年除外),超过IV类标准(≤30 mg·L<sup>-1</sup>);TN和TP的排放浓度均超过了V类标准(≤2.0 mg·L<sup>-1</sup>、≤0.2 mg·L<sup>-1</sup>)。

由表3可知,2009年江苏省13个城市农业面源COD、TN和TP的排放总量和排放浓度,COD、TN、TP的排放总量分别在2.459~17.263、1.619~14.403、0.177~1.757万t;COD、TN、TP的排放浓度分别在11.261~105.597、6.135~90.005、0.813~9.239 mg·L<sup>-1</sup>。

### 2.2 农业面源污染时空特征分析

**2.2.1 江苏省农业面源污染时空变化趋势** 由表2可以看出1990~2009年间江苏省农业面源COD、TN和TP的排放量整体上呈现增长的趋势,而图1反映的是1991~2009各年度江苏省农业面源污染排放的年度变化情况,由图可知,江苏农业面源污染有过3次较大的负增长,分别是1997年、2003年和2007年,总体来说,COD、TN和TP的增幅变化较一致。1991年至1996年间,农业面源污染基本

维持较大增长, 且增长幅度呈现先上升后下降的态势, 经过一段时期增加到最高后又重新下降, 直到 1997 年出现负增长。1998 年出现反弹至 2002 年间, 农业面源污染增长率有逐年下降的趋势, 直到 2003 年出现负增长。2004 年至 2006 年间维持较小增长, 到 2007 年出现较大的负增长, 主要原因是畜禽养殖

量与农产品产量的下降, 以畜禽养殖为例, 2007 年牛存栏量为 33.31 万头、生猪出栏量为 2 431.10 万头、羊存栏量为 404.67 万只, 比 2006 年分别下降了 48.19%、18.35% 和 65.89%。在这样的背景下, 农业面源污染排放量也随之下降。2008 年以后, 农业面源污染又有所反弹。

表 1 江苏省农业面源污染单元

Table 1 Agricultural non-point source pollution units in Jiangsu Province

| 活动<br>Pollution source                                 | 单元<br>Unit                 | 计量指标<br>Measuring index                                     | 活动<br>Pollution source                      | 单元<br>Unit      | 计量指标/万 t<br>Measuring index   |
|--|----------------------------|---|---|-----------------|-------------------------------|
| 农田化肥<br>Chemical fertilizer<br>application in farmland | 氮肥<br>N fertilizer         | 施用量 (折纯, 万 t)<br>Fertilization amount                       | 农田固体废弃物<br>Solid discharge<br>from farmland | 稻谷<br>Rice      | 总产量<br>Total output           |
|  | 磷肥<br>P fertilizer         | 施用量 (折纯, 万 t)<br>Fertilization amount                       |   | 小麦<br>Maize     | 总产量<br>Total output           |
|  | 复合肥<br>Compound fertilizer | 施用量 (折纯, 万 t)<br>Fertilization amount                       |   | 玉米<br>Corn      | 总产量<br>Total output           |
|  |                            | 年末存栏量 (万头)<br>Breeding stock quantity<br>by end of the year |   | 豆类<br>Bean      | 总产量<br>Total output           |
| 畜禽养殖<br>Livestock farming                              | 牛 Cattle                   | 当年出栏量 (万头)<br>Output amount of the year                     | 薯类<br>Potato                                | 薯类<br>Potato    | 总产量<br>Total output           |
|  | 猪 Pig                      | 年末存栏量 (万头)<br>Breeding stock quantity<br>by end of the year |   | 油料<br>Oil plant | 总产量<br>Total output           |
|  | 羊 Sheep                    | 当年出栏量 (万头)<br>Output amount of the year                     |   | 蔬菜<br>Vegetable | 总产量<br>Total output           |
| 水产养殖<br>Aquaculture                                    | 水产<br>Aquatic product      | 养殖面积 (1 000 hm <sup>2</sup> )<br>Cultivation area           | 农村生活<br>Rural life                          | 人<br>Person     | 乡村人口 (万人)<br>Rural population |

表 2 1990~2009 江苏省农业面源 COD、TN 和 TP 排放总量和排放浓度

Table 2 Total emissions and densities of COD, TN and TP in Jiangsu Province from 1991 to 2009

| 年份 Year     | COD   |        | TN    |        | TP   |       |
|-------------|-------|--------|-------|--------|------|-------|
|             | A     | B      | A     | B      | A    | B     |
| 1990        | 64.20 | 20.978 | 54.29 | 17.740 | 4.78 | 1.560 |
| 1991        | 63.94 | 20.892 | 56.38 | 18.421 | 4.92 | 1.606 |
| 1992        | 66.68 | 21.787 | 56.92 | 18.598 | 5.15 | 1.683 |
| 1993        | 70.53 | 23.046 | 58.71 | 19.182 | 5.38 | 1.757 |
| 1994        | 75.93 | 24.811 | 62.84 | 20.533 | 5.88 | 1.922 |
| 1995        | 81.47 | 26.621 | 67.30 | 21.991 | 6.37 | 2.082 |
| 1996        | 85.87 | 28.057 | 70.48 | 23.030 | 6.73 | 2.200 |
| 1997        | 78.85 | 25.765 | 70.48 | 23.028 | 6.59 | 2.153 |
| 1998        | 84.52 | 27.618 | 73.48 | 24.009 | 7.02 | 2.294 |
| 1999        | 87.40 | 28.557 | 73.09 | 23.882 | 7.41 | 2.423 |
| 2000        | 90.50 | 29.570 | 73.44 | 23.995 | 7.76 | 2.536 |
| 2001        | 93.21 | 30.456 | 73.76 | 24.102 | 7.93 | 2.592 |
| 2002        | 95.28 | 31.133 | 73.65 | 24.065 | 8.12 | 2.654 |
| 2003        | 94.35 | 30.830 | 72.67 | 23.743 | 8.00 | 2.614 |
| 2004        | 94.61 | 30.913 | 72.87 | 23.809 | 7.95 | 2.596 |
| 2005        | 95.83 | 31.313 | 73.23 | 23.927 | 8.09 | 2.643 |
| 2006        | 96.22 | 31.438 | 73.44 | 23.997 | 8.09 | 2.642 |
| 2007        | 88.53 | 28.926 | 71.22 | 23.271 | 7.63 | 2.493 |
| 2008        | 92.74 | 30.303 | 71.69 | 23.424 | 7.98 | 2.607 |
| 2009        | 96.88 | 31.654 | 72.87 | 23.810 | 8.33 | 2.721 |
| 平均值 Average | 84.88 | 27.733 | 68.64 | 22.428 | 7.01 | 2.289 |

A. 排放总量/万 t Total emission; B. 排放浓度/mg·L<sup>-1</sup> Emission concentration. 下同 The same below.

表 3 2009年江苏省13市农业面源COD、TN和TP排放总量和排放浓度

Table 3 Total emissions and densities of COD, TN and TP in 13 cities in 2009

| 城市<br>City      | COD    |         | TN     |        | TP    |       |
|-----------------|--------|---------|--------|--------|-------|-------|
|                 | A      | B       | A      | B      | A     | B     |
| 南京 Nanjing      | 4.881  | 17.502  | 2.407  | 8.629  | 0.333 | 1.193 |
| 无锡 Wuxi         | 3.568  | 13.155  | 1.691  | 6.234  | 0.235 | 0.865 |
| 苏州 Suzhou       | 5.576  | 13.969  | 2.449  | 6.135  | 0.336 | 0.841 |
| 南通 Nantong      | 11.909 | 34.098  | 6.828  | 19.550 | 1.050 | 3.005 |
| 泰州 Taizhou      | 7.278  | 45.422  | 4.216  | 26.314 | 0.489 | 3.052 |
| 徐州 Xuzhou       | 15.572 | 84.200  | 13.081 | 70.732 | 1.550 | 8.381 |
| 淮安 Huaian       | 9.138  | 52.976  | 7.560  | 43.829 | 0.747 | 4.333 |
| 宿迁 Suqian       | 8.578  | 105.597 | 7.312  | 90.005 | 0.751 | 9.239 |
| 连云港 Lianyungang | 6.559  | 49.084  | 6.746  | 50.483 | 0.515 | 3.856 |
| 扬州 Yangzhou     | 6.610  | 38.132  | 4.140  | 23.882 | 0.444 | 2.561 |
| 常州 Changzhou    | 4.243  | 16.552  | 2.037  | 7.948  | 0.302 | 1.177 |
| 镇江 Zhenjiang    | 2.459  | 11.261  | 1.619  | 7.414  | 0.177 | 0.813 |
| 盐城 Yancheng     | 17.263 | 45.265  | 14.403 | 37.767 | 1.757 | 4.606 |
| 平均值 Average     | 7.972  | 40.555  | 7.347  | 30.686 | 0.669 | 3.379 |

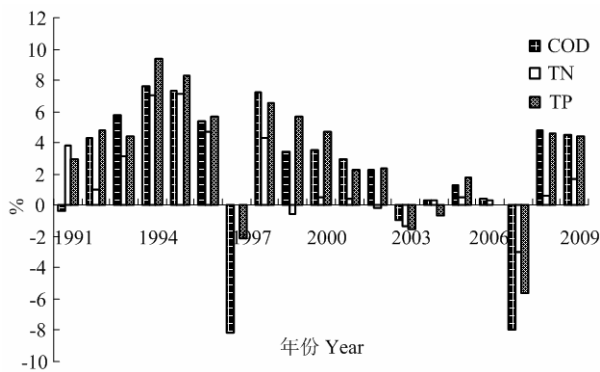


图 1 1991-2009年江苏省农业面源污染排放量各年度增幅变化情况

Figure 1 Variation of agricultural non-point source pollution range in Jiangsu province from 1991 to 2009

**2.2.2 农业面源污染空间分布特征** 农业面源污染排放量的空间差异较大, 农业面源污染排放总量较大的城市主要集中在人口众多, 农业集约化程度较高的苏中与苏北地区(见表3)。例如, COD排放量位列前4名的分别是盐城市、徐州市、南通市和淮安市, 分别为17.263、15.572、11.909和9.138万t; TN排放量位列前4名的分别是盐城市、徐州市、淮安市和宿迁市, 分别为14.403、13.081、7.560和7.312万t; TP排放量位列前4名的分别是盐城市、徐州市、南通市和宿迁市, 分别为1.757、1.550、1.050和0.751万t。COD、TN和TP排放量都较少的主要分布在镇江市、常州市、南京市和无锡市。农业面源污染排放浓度的空间差异也较大(见表3), COD排放浓度位列前8名的是宿迁市、徐州市、

淮安市、连云港市、泰州市、盐城市、南通市和扬州市, 分别为105.597、84.200、52.976、49.084、45.422、45.265、38.132和34.098 mg·L<sup>-1</sup>, 并且这些城市均超过了III类水质标准(≤20 mg·L<sup>-1</sup>); TN排放浓度位列前4名的分别是宿迁市、徐州市、连云港市和淮安市, 分别为90.005、70.732、50.483和43.829 mg·L<sup>-1</sup>, 13个城市均超过V类水质标准(≤2.0 mg·L<sup>-1</sup>); TP排放浓度位列前4名的分别是宿迁市、徐州市、盐城市和淮安市, 分别为9.239、8.381、4.606和4.333 mg·L<sup>-1</sup>, 13个城市均超过V类标准(≤0.2 mg·L<sup>-1</sup>)。COD、TN和TP排放浓度都较低的主要分布在镇江市、苏州市、无锡市、南京市和常州市。

### 2.3 农业面源污染源解析

**2.3.1 全省层面农业面源污染源解析** 表4反映的是1990~2009年江苏省农业面源污染的排放清单。在此期间, 农业面源污染COD主要来源于畜禽养殖和农村生活污染, 2005年其对农业面源污染COD的贡献率分别为63.34%和14.41%, 农田固体废弃物贡献较小, 2006年贡献率仅为8.35%。然而随着江苏省水产养殖业的快速发展, 水产养殖对农业面源污染的贡献率逐渐增大, 到2006年其贡献率超过了农村生活污染, 达到14.69%; 自2006年以来畜禽养殖和水产养殖成为农业面源污染COD的主要来源, 2009年其贡献率分别为62.06%和16.16%。从时间变化趋势来看, 1990~2009年间畜禽养殖和水产养殖对农业面源COD的整体上呈现增加的趋势, 平均值分别为61.04%和11.07%。农村生活对

农业面源污染 COD 的贡献呈现减少的趋势, 主要得益于农村人口的减少以及农村基础设施的逐步改善。农田固体废弃物对农业面源 COD 的贡献率不大, 由于此期间对农作物秸秆的处理方式变化不大, 其对农业面源的贡献也较为稳定, 维持在 7.5% 左右。

农业面源污染 TN 主要来源是农田化肥和畜禽养殖, 2009 年其对农业面源污染 TN 的贡献率分别为 73.58% 和 18.68%, 而农田固体废弃物、农村生活和水产养殖污染对农业面源污染的贡献相对较少, 分别为 4.53%、2.26% 和 0.94%。从时间变化趋势来看, 水产养殖对 TN 的贡献率呈现增长的趋势, 从 1990 年的 0.30% 增加到 2009 年的 0.94%, 年均增长 10.67 个百分点。农田化肥对 TN 的贡献率呈现波动状态, 1997 年其贡献率达到最高 76.49%, 1998~2006 年间呈现下降趋势, 2007 年又回升, 达到 75.33%, 之后又开始回落。畜禽养殖对 TN 的贡献呈现三段式的增长, 1997 年和 2007 年是 2 个回

落点, 1990~1996 年、1997~2006 年、2007~2009 年这 3 个时间段均呈现增长的趋势, 平均贡献率分别为 16.54%、17.98% 和 17.91%。农田固体废弃物 TN 的贡献相对较为稳定, 平均为 4.40%。

农业面源污染 TP 主要来源是畜禽养殖和农田化肥, 2009 年其贡献率分别为 67.94% 和 20.66%, 而农田固体废弃物、农村生活和水产养殖污染的贡献相对较少, 其值分别为 5.96%、4.45% 和 1.00%。从时间变化趋势来看, 畜禽养殖和水产养殖对 TP 的贡献呈现增长的趋势, 1990 年分别为 60.19% 和 0.42%, 2009 年增长到 67.94% 和 1.00%, 分别增长了 0.64 和 6.90 个百分点。农田化肥对 TN 的贡献率呈现波动状态, 1997 年其贡献率达到最高 24.33%, 1998~2000 年间呈现下降趋势, 2001~2006 年间的贡献率保持稳定, 平均为 21.18%, 2007 年又回升, 达到 22.34%, 之后又开始回落。农田固体废弃物对农业面源污染的影响也不容忽视, 1990~2009 年间贡献率比较稳定, 平均值为 5.60%。

表 4 1990~2009 年江苏省农业面源污染排放清单

Table 4 Detailed list of agricultural non-point source pollution in Jiangsu province during 1990-2009

| 年份<br>Year | COD      |          |          |          | TN       |          |          |          |          | TP       |          |          |          |          | % |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|
|            | 畜禽<br>养殖 | 水产<br>养殖 | 农田<br>固废 | 农村<br>生活 | 农田<br>化肥 | 畜禽<br>养殖 | 水产<br>养殖 | 农田<br>固废 | 农村<br>生活 | 农田<br>化肥 | 畜禽<br>养殖 | 水产<br>养殖 | 农田<br>固废 | 农村<br>生活 |   |
| 1990       | 57.09    | 5.91     | 6.14     | 30.85    | 74.78    | 15.71    | 0.30     | 4.50     | 4.70     | 22.00    | 60.19    | 0.42     | 5.38     | 12.00    |   |
| 1991       | 58.23    | 5.22     | 5.87     | 30.68    | 75.84    | 15.35    | 0.26     | 4.07     | 4.48     | 23.55    | 59.61    | 0.36     | 4.93     | 11.55    |   |
| 1992       | 58.34    | 6.04     | 6.13     | 29.48    | 74.92    | 15.87    | 0.31     | 4.45     | 4.45     | 24.02    | 59.34    | 0.41     | 5.18     | 11.05    |   |
| 1993       | 58.57    | 6.95     | 6.46     | 28.01    | 74.40    | 16.40    | 0.36     | 4.49     | 4.34     | 22.47    | 60.92    | 0.48     | 5.50     | 10.63    |   |
| 1994       | 59.89    | 7.85     | 6.27     | 25.99    | 74.47    | 16.90    | 0.41     | 4.16     | 4.05     | 22.73    | 61.87    | 0.54     | 5.16     | 9.71     |   |
| 1995       | 61.40    | 8.83     | 6.24     | 23.53    | 74.14    | 17.50    | 0.47     | 4.22     | 3.67     | 22.64    | 62.96    | 0.60     | 5.10     | 8.71     |   |
| 1996       | 62.14    | 9.16     | 6.24     | 22.46    | 73.86    | 18.01    | 0.49     | 4.11     | 3.53     | 22.57    | 63.46    | 0.62     | 5.05     | 8.29     |   |
| 1997       | 58.71    | 10.64    | 6.92     | 23.73    | 76.49    | 15.39    | 0.52     | 4.18     | 3.42     | 24.33    | 61.54    | 0.67     | 5.23     | 8.22     |   |
| 1998       | 60.62    | 10.71    | 6.94     | 21.72    | 76.09    | 16.23    | 0.54     | 3.92     | 3.22     | 22.96    | 63.64    | 0.68     | 5.15     | 7.57     |   |
| 1999       | 60.98    | 11.27    | 7.71     | 20.04    | 74.90    | 16.87    | 0.59     | 4.55     | 3.09     | 23.33    | 63.46    | 0.70     | 5.67     | 6.84     |   |
| 2000       | 62.46    | 11.60    | 8.26     | 17.68    | 74.08    | 17.79    | 0.62     | 4.70     | 2.81     | 22.09    | 65.31    | 0.72     | 5.92     | 5.96     |   |
| 2001       | 62.71    | 11.92    | 8.47     | 16.90    | 73.65    | 18.29    | 0.66     | 4.65     | 2.75     | 21.60    | 65.84    | 0.74     | 6.07     | 5.75     |   |
| 2002       | 62.82    | 12.26    | 8.93     | 15.99    | 73.08    | 18.81    | 0.69     | 4.75     | 2.67     | 21.33    | 66.13    | 0.76     | 6.34     | 5.43     |   |
| 2003       | 63.87    | 12.34    | 8.20     | 15.59    | 73.27    | 19.22    | 0.70     | 4.21     | 2.61     | 20.97    | 67.13    | 0.77     | 5.81     | 5.32     |   |
| 2004       | 62.95    | 13.41    | 8.44     | 15.19    | 73.11    | 18.93    | 0.76     | 4.66     | 2.54     | 21.19    | 66.66    | 0.85     | 6.07     | 5.23     |   |
| 2005       | 63.34    | 14.11    | 8.14     | 14.41    | 73.09    | 19.22    | 0.80     | 4.46     | 2.43     | 20.95    | 67.46    | 0.88     | 5.77     | 4.94     |   |
| 2006       | 62.88    | 14.69    | 8.35     | 14.08    | 73.05    | 19.10    | 0.84     | 4.64     | 2.38     | 21.07    | 67.19    | 0.93     | 5.97     | 4.85     |   |
| 2007       | 60.37    | 16.19    | 8.39     | 15.04    | 75.33    | 17.04    | 0.88     | 4.34     | 2.41     | 22.34    | 65.77    | 0.99     | 5.85     | 5.05     |   |
| 2008       | 61.35    | 16.10    | 8.44     | 14.12    | 74.28    | 17.99    | 0.91     | 4.47     | 2.35     | 21.48    | 66.89    | 0.99     | 5.89     | 4.75     |   |
| 2009       | 62.06    | 16.16    | 8.56     | 13.21    | 73.58    | 18.68    | 0.94     | 4.53     | 2.26     | 20.66    | 67.94    | 1.00     | 5.96     | 4.45     |   |

近 20 年江苏省农业面源污染形成及加剧与其农业生产特征分不开的。1990~2009 年间, 江苏省农业生产的特征主要表现为: ①农业产值在国民经

济中的地位不断下降; ②农业劳动力迅速转移, 资本替代型农业发展显著; ③农业作物种植结构逐渐向高市场收益、高资本替代性转化调整; ④食品消

费结构明显转型, 养殖业迅猛发展; ⑤农村基础设施建设滞后, 环保设施缺乏, 农村环境保护法规缺失。这些特征是形成江苏省农业面源污染并使其加剧的重要原因。

**2.3.2 各市层面农业面源污染源解析** 表5反映的是2009年江苏省13市农业面源污染的排放清单。江苏省13个城市的畜禽养殖污染均是农业面源COD的最主要来源, 其贡献率都在45%~75%之间, 其中盐城市的贡献率最高达到74.77%。水产养殖污染是南京、苏州、泰州、扬州等城市的第二来源, 其中扬州市的贡献率的相对最高达到31.48%。农村生活污染是无锡、南通、徐州、淮安、宿迁、连云港、常州、镇江、盐城等城市的第二来源, 其中镇江市的贡献率相对最高达到25.70%。各地区农田固体废物对农业面源污染的贡献都较少, 平均为7.82%。

各市农田化肥污染均是农业面源TN的最主要来源, 其贡献率都在60%~82%之间, 其中连云港市的贡献率最高达到81.28%。畜禽养殖污染是第二来

源, 贡献率在11%~27%之间, 其中南通市的贡献率的相对最高达到27.40%。农田固体废物污染是南京、南通、泰州、徐州、淮安、宿迁、连云港、扬州、镇江、盐城等城市的第三来源, 其中南京市的贡献率相对最高达到7.24%; 而农村生活污染是无锡、苏州、常州等城市的第三来源, 其中无锡市的贡献率相对最高达到6.77%。各地区水产养殖对农业面源污染的贡献都较少, 平均为1.10%。

各市畜禽养殖污染均是农业面源TP的最主要来源, 其贡献率都在45%~80%之间, 其中常州市的贡献率最高达到79.57%。农田化肥污染是南京、南通、泰州、徐州、淮安、宿迁、连云港、扬州、镇江、盐城等城市的第二来源, 其中宿迁市的贡献率的相对最高达到28.53%。农村生活污染是无锡、苏州、常州等城市的第三来源, 其中苏州市的贡献率相对最高达到11.03%。各地区农村生活、农田固体废物和水产养殖污染的贡献率相对较少, 平均分别为7.52%、6.03%和1.20%。

表5 2009年江苏省13市农业面源污染排放清单

Table 5 Detailed list of agricultural non-point source pollution in 13 cities in 2009

| 城市<br>City         | COD      |          |          |          | TN       |          |          |          | TP       |          |          |          | %    |          |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|----------|
|                    | 畜禽<br>养殖 | 水产<br>养殖 | 农田<br>固废 | 农村<br>生活 | 农田<br>化肥 | 畜禽<br>养殖 | 水产<br>养殖 | 农田<br>固废 | 农村<br>生活 | 农田<br>化肥 | 畜禽<br>养殖 | 水产<br>养殖 |      | 农田<br>固废 |
| 南京 Nanjing         | 52.18    | 21.68    | 10.31    | 15.83    | 61.97    | 24.73    | 1.91     | 7.24     | 4.14     | 11.13    | 71.72    | 1.68     | 8.75 | 6.72     |
| 无锡 Wuxi            | 50.87    | 17.51    | 6.74     | 24.88    | 62.98    | 24.00    | 1.61     | 4.64     | 6.77     | 9.99     | 71.92    | 1.41     | 5.73 | 10.95    |
| 苏州 Suzhou          | 47.31    | 23.92    | 5.81     | 22.96    | 61.69    | 24.48    | 2.37     | 4.71     | 6.74     | 9.07     | 72.34    | 2.10     | 5.46 | 11.03    |
| 南通 Nantong         | 67.73    | 7.61     | 6.28     | 18.38    | 61.72    | 27.40    | 0.58     | 6.17     | 4.13     | 11.40    | 77.53    | 0.46     | 4.58 | 6.04     |
| 泰州 Taizhou         | 52.24    | 20.26    | 7.47     | 20.03    | 68.88    | 18.96    | 1.52     | 6.18     | 4.46     | 20.34    | 63.14    | 1.57     | 6.48 | 8.47     |
| 徐州 Xuzhou          | 67.18    | 5.49     | 10.59    | 16.75    | 73.87    | 19.33    | 0.28     | 3.95     | 2.57     | 24.26    | 64.06    | 0.29     | 6.52 | 4.87     |
| 淮安 Huaian          | 62.94    | 12.80    | 7.96     | 16.29    | 74.96    | 17.26    | 0.67     | 4.57     | 2.54     | 18.87    | 68.61    | 0.83     | 5.93 | 5.76     |
| 宿迁 Suqian          | 58.03    | 13.57    | 9.21     | 19.18    | 76.63    | 15.51    | 0.69     | 4.26     | 2.90     | 28.53    | 57.83    | 0.82     | 6.48 | 6.35     |
| 连云港<br>Lianyungang | 54.45    | 16.04    | 9.03     | 20.47    | 81.28    | 11.25    | 0.68     | 4.23     | 2.57     | 34.29    | 49.93    | 1.08     | 7.16 | 7.54     |
| 扬州 Yangzhou        | 44.44    | 31.48    | 6.36     | 17.72    | 73.17    | 15.72    | 2.19     | 5.27     | 3.65     | 19.23    | 65.05    | 2.48     | 5.61 | 7.63     |
| 常州<br>Changzhou    | 56.07    | 18.51    | 4.60     | 20.82    | 61.17    | 26.77    | 1.68     | 4.79     | 5.59     | 6.84     | 79.57    | 1.38     | 3.74 | 8.47     |
| 镇江 Zhenjiang       | 47.66    | 18.97    | 7.67     | 25.70    | 71.52    | 15.83    | 1.25     | 6.37     | 5.03     | 19.59    | 62.39    | 1.39     | 6.33 | 10.30    |
| 盐城 Yancheng        | 74.77    | 2.81     | 9.57     | 12.84    | 73.48    | 20.02    | 0.15     | 4.37     | 1.98     | 20.50    | 70.04    | 0.15     | 5.67 | 3.65     |

通过以上分析可以看出, 江苏省农业面源污染呈现出明显的南、中、北地域性特征, 表现为污染物排放总量和浓度呈现由南向北逐渐增加的趋势, 原因是: ①苏南地区(苏州、无锡、常州、镇江、南京)农业生产比重较小, 工业化程度较高, 并且水资源含量丰富, 农业面源污染程度较轻; ②苏中地区(泰州、扬州、南通)农业比重较低并逐渐发展为以工业为主的产业结构, 农业面源污染程度属

于中等; ③苏北地区(徐州、盐城、宿迁、淮安、连云港)农业所占产业比重较大, 工业化发展水平相对滞后, 且水资源较苏南和苏北城市都较为贫瘠, 农业面源污染程度相对较重。

### 3 结论

1990~2009年间江苏省农业面源污染整体上呈现加剧的趋势, COD、TN和TP的排放总量从1990

年的 64.20、54.29 和 4.78 万 t 增加到 2009 年的 96.88、72.87 和 8.33 万 t, 排放浓度从 1990 年的 20.978、17.740 和 1.560  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到 31.654、23.810 和 2.721  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2009 年江苏省 13 个城市的农业面源污染差异较大, COD、TN、TP 的排放总量分别在 2.459~17.263、1.619~14.403、0.177~1.757 万 t, 排放浓度分别在 11.261~105.597、6.135~90.005、0.813~9.239  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。通过对农业面源污染的源解析可以得出, 农业面源污染 COD 和 TP 的主要来源是畜禽养殖, 而 TN 的主要来源是农田化肥。

### 参考文献:

- [1] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策: 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [2] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 397-400.
- [3] 洪小康, 李怀恩. 水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J]. 西南理工大学学报, 2000, 16(4): 384-386.
- [4] 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.
- [5] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1184-1187.
- [6] 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.
- [7] 赖斯芸. 非点源调查评估方法及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [8] 国家环境保护总局. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 77-78.
- [9] 闫丽珍, 石敏俊, 王磊. 太湖流域农业面源污染及控制研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010(1): 99-107.
- [10] 张大弟, 章家骐, 汪雅谷. 上海市郊主要面源污染及防治对策[J]. 上海环境科学, 1997, 16(3): 1-3.
- [11] 刘培芳, 陈振楼, 许世远, 等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 456-460.
- [12] 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.
- [13] 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, 25(2): 147-150.