

董艳强, 陈长虹, 黄成, 等. 2009 长江三角洲地区人为源氨排放清单及分布特征 [J]. 环境科学学报, 29(8): 1611-1617

Dong Y Q, Chen C H, Huang C, *et al.* 2009. Anthropogenic emissions and distribution of ammonia over the Yangtze River Delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(8): 1611-1617

长江三角洲地区人为源氨排放清单及分布特征

董艳强^{1,2}, 陈长虹^{1,*}, 黄成¹, 王红丽¹, 李莉¹, 戴璞², 贾记红²

1 上海市环境科学研究院, 上海 200233

2 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237

收稿日期: 2008-11-25 录用日期: 2009-05-18

摘要: 根据各类氨排放源的活动水平和排放因子, 估算了 2004 年长江三角洲地区 16 个城市的氨排放量. 结果表明, 2004 年长三角地区氨排放量为 460.68 kt, 其中, 氮肥使用和畜牧源是两个最大排放源, 氨排放量分别为 227.33 kt 和 203.28 kt, 分别占长江三角洲地区氨排放总量的 49.3% 和 44.1%. 氨排放分布在长三角地区各城市间有较大差异, 排放量超过 40 kt a⁻¹ 的城市为南通市、上海市、嘉兴市和泰州市, 这 4 个城市的氨排放总量约占长三角地区氨排放量的 42.5%. 长江三角洲地区氨平均排放强度为 4.20 t km⁻² a⁻¹, 排放强度超过 6 t km⁻² a⁻¹ 的城市为嘉兴市、南通市、泰州市和上海市, 其中, 嘉兴市的排放强度最大, 为 10.83 t km⁻² a⁻¹.

关键词: 长江三角洲; 氨; 排放因子; 排放清单

文章编号: 0253-2468(2009)08-1611-07 中图分类号: X51 文献标识码: A

Anthropogenic emissions and distribution of ammonia over the Yangtze River Delta

DONG Yanqiang^{1,2}, CHEN Changhong^{1,*}, HUANG Cheng¹, WANG Hongli¹, LI Li¹, DAI Pu², JIA Jihong²

1 Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233

2 Resources and Environmental Engineering Institute, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237

Received 25 November 2008; accepted 18 May 2009

Abstract The ammonia emissions of 16 cities in the Yangtze River Delta (YRD) in 2004 are estimated based on the activity data and emission factors of various ammonia sources. Results show that the anthropogenic ammonia emissions in the YRD reached 460.68 kt in 2004. The application of nitrogenous fertilizer and animal husbandry were the two largest contributors of ammonia emissions in the YRD, emitting 227.33 kt and 203.28 kt respectively which represents 49.3% and 44.1% of the total ammonia emissions. The cities with ammonia emissions exceeding 40 kt a⁻¹ include Nantong, Shanghai, Jiaxing and Taizhou, which together contribute 42.5% of the total ammonia emissions. The average ammonia emission intensity in the YRD reached 4.20 t km⁻² a⁻¹ in 2004. The cities whose emission intensity of ammonia exceeded 6 t km⁻² a⁻¹ include Jiaxing, Nantong, Taizhou and Shanghai. The highest emission intensity was in Jiaxing which was 10.83 t km⁻² a⁻¹.

Keywords Yangtze River Delta; ammonia; emission factor; emission inventory

1 引言 (Introduction)

氨 (NH₃) 是大气中主要的微量气体之一, 与大气中氮氧化物、二氧化硫、碳氢化合物等污染物一样, 它是大气中二次气溶胶的重要前驱物. 氨能和其它前驱物结合形成硝酸铵和硫酸铵等化学物质, 而这些物质是大气中 PM_{2.5} 的重要来源 (Goebes *et al.*, 2003). 彭应登等 (2000) 研究发现, 大气氨是

北京春、秋、冬这 3 个季节生成二次粒子的主控因子. 刘煜等 (2005) 利用 MODEL-3/CMAQ 模型模拟华北地区夏季二次气溶胶生成发现, NH₃ 对华北地区硫酸盐和硝酸盐气溶胶的形成起着至关重要的作用, 如果没有 NH₃ 的存在, 大气中硫酸盐气溶胶大约减少 30%, 硝酸盐气溶胶将基本消失. NH₃ 和 NH₄⁺ 是大气酸沉降的重要组成部分, 同时还会导致土壤酸化和水体富营养化 (Sutton *et al.*, 1995; 叶

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2007AA06Z409); 国家科技支撑计划课题 (No. 2009BAK43B33)

Supported by the Hi-Tech Research and Development Program of China (No. 2007AA06Z409) and the National Scientific and Technology Support Project (No. 2009BAK43B33)

作者简介: 董艳强 (1983-), 男, E-mail: yqdong66@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: chencl@saes.sh.cn

Biography: DONG Yanqiang (1983-), male, E-mail: yqdong66@163.com; * Corresponding author, E-mail: chencl@saes.sh.cn

雪梅等, 2002; 林岩等, 2007). 因此, 无论在全球还是区域范围, 大气环境研究都对氨的排放和输送给予较大关注. 为了研究氨的来源, Heeb等 (2006, 2008)通过不同道路工况研究测试了汽油车 NH_3 排放以及车速和尾气催化装置对排放的影响. Bouwman等 (1997)对全球氨排放进行了估算, Goebes等 (2003)讨论了氮肥使用后的氨排放因子, 并建立了美国氮肥施用氨的排放清单. 国内王文兴 (1997)、宋庆瑞等 (1997)利用排放因子法分别估算了 1991年和 1992年全国氨排放量及其分布, 对我国氨排放和区域酸沉降研究具有重大意义.

然而, 随着社会经济的快速发展, 区域大气二次污染日益加重 (颜鹏等, 2005; 吴兑, 2006), 早期的氨排放研究已不能满足现在区域空气质量和酸沉降研究的需要, 且早期清单研究对人为源的考虑尚不全面, 缺少对生产工艺、生物质燃烧和交通源的估算. 为此, 本文根据长三角以及我国的统计资料, 考虑多种氨排放源, 估算了 2004年长三角地区 16个城市的氨排放量, 给出了其排在长三角地区的空间分布, 旨在为该地区的大气环境影响评估和大气酸沉降研究提供基础资料.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区域介绍

本研究选择的区域包括江、浙、沪两省一市共 16个城市, 其中, 江苏省有南京市、扬州市、泰州市、南通市、镇江市、常州市、无锡市和苏州市; 浙江省有杭州市、湖州市、嘉兴市、绍兴市、宁波市、舟山市和台州市.

2.2 计算方法

氨的排放源分为牛猪羊等动物、氮肥使用、人的排放、生物质燃烧 (秸秆燃烧) 和其它源等 7类, 其它源包括氮肥生产、合成氨生产、石油加工等工业源和交通源. 对氨的排放, 本文采用排放因子法进行估算, 排放因子的选取参考国内外对氨排放源

的研究成果, 如果国内有氨排放因子的研究成果资料, 则尽量优先使用国内资料, 反之则选用国外的资料.

长三角地区氨的排放总量由 16个城市的排放量求和得到, 各城市氨的排放量则由各类源的排放量加和求得, 氨排放量计算式如下:

$$Q_T = \sum_i \sum_j A_j \times f_j \quad (1)$$

式中, Q_T 为长三角地区氨的排放量 (kg); f_j 为 j 源的排放因子, 畜牧源单位 ($\text{kg} \cdot \text{头}^{-1}$)、工业源单位 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$) (产品)、交通源单位 ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$); A_j 为 j 排放源的活动水平, 如牛猪羊存栏数 (头) 或车辆的行驶里程 (km); i 为城市数.

生物质燃烧氨排放用下式计算:

$$Q = \sum_i \sum_K A \times \beta \times \eta \times f_{\text{秸秆燃烧}} \times 10 \quad (2)$$

式中, Q 为生物质燃烧氨排放量 (t); A 为农产品产量 (10^4 t); β 为谷草比; η 为秸秆焚烧比例; $f_{\text{秸秆燃烧}}$ 为秸秆燃烧的氨排放因子 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); k 为农作物种类.

研究中各排放源的活动水平取自长三角地区 16个城市 2005年统计年鉴, 其中, 机动车行驶里程数据来自上海市环境科学研究院的相关研究资料 (陈长虹等, 2007).

2.3 排放因子

2.3.1 畜牧源 畜牧业氨的排放源包括牛猪羊 (包括兔) 和家禽等. 影响畜牧源 (动物) 氨排放因子的因素很多, 如畜牧饲料中氮的含量和各类氨基酸的相对含量、不同地区动物组成、动物年龄, 以及动物粪便的储存形式等. 而动物粪便利用后氨的排放量则决定于土壤性质和温度、湿度、降水等气象条件.

表 1 给出了相关学者研究得到的畜牧源氨排放因子及取平均值后本研究的排放因子. 根据全国和长三角地区统计年鉴, 在计算平均排放因子时, 奶牛在牛中占的比例取 53%, 繁殖母猪的比例取 7.5%, 绵羊和山羊比例取 1:1.

表 1 畜牧源氨排放因子

文献	牛		猪		禽	马	羊	
	奶牛	其它牛	繁殖母猪	肉猪			绵羊	山羊
Asnan, 1992	23.043		5.357		0.248	12.200	1.697	
Battye et al., 1994	22.900		9.210		0.207	12.200	3.370	6.400
Van DerHoek, 1998	28.500	14.300	16.430	6.390		8.000	1.340	
Bouwman, 1997	25.000	9.500	4.900		0.240	9.20		0.770
Missebrook, 2000	26.520	6.800	5.200	4.800			0.730	
本研究 (取平均值)	20.620		6.290		0.230	10.400	1.880	

2.3.2 氮肥使用 氮肥使用后,氮以氨的形式释放到大气中,它是大气氨排放的重要来源.国内外研究表明(Goebes *et al.*, 2003; 朱兆良等, 2004; 邓美华等, 2006),氮肥种类、施肥方式、气候和土壤特性等因素对氨的排放有重要影响.表2汇总了我国尿素和碳酸氢铵(碳铵)使用后氨挥发率的研究成果,并求平均值作为本研究尿素和碳酸氢铵(碳铵)的氨挥发率,其它氮肥采用国外相关研究结果(Goebes *et al.*, 2003).

表2 氮肥氨挥发率

Table 2 Proportion of ammonia volatilized from nitrogenous fertilizer

文献	尿素	碳铵	硝酸铵	硫酸铵	其它
邓美华等, 2006	9.81%				
贺发云等, 2005	17.60%				
朱兆良等, 2004	29.90%				
田光明等, 2001	7.39%				
蔡贵信等, 1985	8.50%	19.50%			
张玉铭等, 2005	15.14%				
韩晓增等, 2003	12.80%				
王朝辉等, 2002	5.63%				
李贵桐等, 2002	29.20%	11.00%			
苏芳等, 2007	25.50%	15.70%			
朱兆良等, 1989	30.10%	39.10%			
Goebes 2003			2%	8%	4%
本研究	17.4%	21.3%	2%	8%	4%

由于缺少长三角地区各城市氮肥生产和使用量的详细资料,因此,以我国各种氮肥的生产比例作为长三角地区各种氮肥的使用份额(见表3),并结合氨挥发率计算得出氮肥的平均氨挥发率.

表3 氮肥使用比例及其氨挥发率

Table 3 Application percentage and proportion of ammonia volatilized from nitrogenous fertilizer

氮肥	使用比例	氨挥发率
尿素	64%	17.4%
碳铵	24%	21.3%
硝酸铵	4% ^a	2%
硫酸铵	4% ^a	8%
其它	4% ^a	4%
氮肥平均		16.8%

注: a由于缺少数据,这3类氮肥使用比例假设为4%.

2.3.3 人的氨排放 人的氨排放主要通过3种途径:排汗、呼吸和排泄(Batty *et al.*, 1994).人的氨排放变化很大,其变化范围从0.04 kg a⁻¹人⁻¹到1.3 kg a⁻¹人⁻¹,本研究采用欧盟CORNAR中的氨排放系数,即0.05 kg a⁻¹人⁻¹(EEA, 2006),作为人的氨排放因子.

2.3.4 工业源 工业源包括氮肥生产、合成氨生

产、石油加工、炼焦制气.其中,石油加工中的氨排放主要来自催化裂化过程;炼焦氨排放主要来自装煤时刻和推焦过程(USEPA, 1996).工业源的氨排放因子具体取值见表4(Aman, 1992; USEPA, 1996; 王文兴等, 1997).

表4 工业源氨排放因子

Table 4 Ammonia emission factors from industrial production

石油加工 / (kg t ⁻¹)	炼焦 / (kg t ⁻¹)	制气 / (10 ⁻⁴ kg m ⁻³)	合成氨 / (kg t ⁻¹)	氮肥生产 / (kg t ⁻¹)
0.16	0.07	0.4	1.0	5.0

注:合成氨和氮肥生产过程中的氨排放因子以合成1tN计

2.3.5 交通源 交通源氨的排放有两个来源,一是来自尾气催化装置消除氮氧化物过程中的二次产物;二是机动车燃料燃烧排放的氨(Heeb *et al.*, 2006; 2008).Heeb和Sutton等研究发现(Sutton *et al.*, 2000; Heeb *et al.*, 2006; 2008),未安装尾气催化转化装置与安装尾气催化转化装置的车辆,其氨的排放量差异很大.车辆氨排放还受车辆类型、行驶工况、当地气候等因素影响.本研究中交通源各车型的氨排放因子取值见表5(Akiyoshi Kannari *et al.*, 2007).

表5 各车型氨排放因子

Table 5 Ammonia emission factors from different types of vehicles

g km ⁻¹				
乘用车	大型客车	轻型卡车	重型卡车	摩托车
0.0201	0.0211	0.0937	0.0143	0

2.3.6 生物质燃烧 生物质燃烧主要指秸秆燃烧,其造成的氨排放可按照公式(2)计算,即通过农作物产量、谷草比、秸秆露天焚烧比例(曹国良等, 2005)和氨的排放因子(Streets *et al.*, 2003)来估算,各种参数见表6.

表6 生物质燃烧氨排放计算参数

Table 6 Parameters for estimation of ammonia emission factors from biomass burning

生物质	谷草比	排放因子 / (g kg ⁻¹)	秸秆焚烧率
稻谷	0.623	1.30	30%
小麦	1.366	1.30	30%
玉米	2.0	1.30	30%
其它杂粮	1.0	1.30	30%
豆类	1.5	1.30	30%
薯类	0.5	1.30	30%
油料	2.0	1.30	30%
棉花	3.0	1.30	30%
麻类	1.7	1.30	30%
糖类(叶)	0.1	1.30	30%

3 结果 (Results)

3.1 长三角地区氨排放量的基本参数

长三角既是中国工业化程度较高的区域,同时也是农业生产较发达的地区和粮食生产基地. 2004年该地区户籍人口为 8.21×10^7 人,耕种总面积为 $3.40 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,水稻种植面积为 $1.81 \times 10^4 \text{ km}^2$,小麦为 $0.61 \times 10^4 \text{ km}^2$,全年水稻和小麦的产量分别达到 $1.43 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $2.74 \times 10^6 \text{ t}$ 按表 6 给出的谷草比计算,该地区全年秸秆量为 $2.00 \times 10^7 \text{ t}$

2004年长三角地区牛、羊、猪存栏数分别为 3.47×10^5 头、 7.23×10^6 只和 1.93×10^7 头,出栏数分别为 6.40×10^4 头、 8.31×10^6 只和 3.07×10^7 头. 长三角 16 个城市中南京市、上海市和杭州市的奶牛存栏数所占份额最大,分别为 22%、17% 和 11%;而嘉兴市和南通市生猪的存栏数最大,分别为 17% 和 15%,杭州市和上海市同为 9%;南通市家禽所占份额最大,为 22%.

2004年长三角地区全年化肥施用总量(折纯量)为 $1.98 \times 10^6 \text{ t}$ 氮肥施用量(折纯量)为 $1.11 \times 10^6 \text{ t}$ 其中,江苏省 8 个城市的氮肥施用量占长三角

氮肥施用总量的 58%,浙江 7 个城市占 34%;氮肥施用较大的城市是南通市、泰州市、上海市、扬州市和嘉兴市,分别占 13%、10%、9%、8% 和 7%.

3.2 长三角地区氨排放量

按公式 (1) 和公式 (2) 计算, 2004 年长三角人为源氨的排放量为 460.68 kt (见表 7), 该地区氨排放量前 4 位的城市依次为南通市、上海市、嘉兴市和泰州市,排放量分别达到 69.31、42.91、42.40 和 41.01 kt 其排放份额分别占该地区氨排放总量的 15.0%、9.3%、9.2% 和 8.9%. 16 个城市中氨排放量最小为舟山市,排放量仅为 1.84 kt 经济发展水平、人口密度、农业结构和耕地面积是造成地区分布差异的主要原因.

本研究的测算结果显示,上海市氨的排放量为 42.91 kt 明显高于伏晴艳等 (2006) 对上海市氨排放量的测算结果 (13 kt). 造成这一差别的主要原因,一方面是该测算未包括交通源、人的氨排放以及农业施用氮肥等造成的氨排放;另一方面是该测算采用的是德国、英国和美国的氨排放因子,致使其结果明显偏低.

表 7 长三角地区人为源氨排放量 (2004 年)

Table 7 Anthropogenic ammonia emissions in the Yangtze River Delta Region (2004)

kt a⁻¹

地区	牛	猪	其它动物	氮肥使用	人类源	生物质燃烧	其它源	合计
南京市	1.57	6.05	3.53	16.70	0.29	0.47	4.10	32.70
苏州市	0.47	4.78	2.91	13.02	0.30	0.42	0.52	22.40
泰州市	0.11	10.21	6.16	22.08	0.25	1.05	1.14	41.01
扬州市	0.19	5.12	4.91	18.35	0.23	0.82	0.46	30.07
无锡市	0.51	4.23	2.18	10.81	0.22	0.26	1.47	19.69
南通市	0.13	17.95	19.08	29.54	0.39	1.65	0.58	69.31
镇江市	0.20	4.08	1.54	9.30	0.13	0.38	0.15	15.79
常州市	0.11	4.35	2.23	11.70	0.17	0.37	0.07	19.00
上海市	1.20	10.36	6.90	19.40	0.68	0.37	4.01	42.91
杭州市	0.82	10.37	5.27	14.75	0.33	0.40	0.40	32.33
湖州市	0.17	5.09	3.90	6.86	0.13	0.31	0.20	16.65
嘉兴市	0.00	20.57	5.42	15.55	0.17	0.46	0.22	42.40
绍兴市	0.40	6.13	3.35	14.13	0.22	0.30	0.20	24.73
宁波市	0.45	5.04	4.81	13.63	0.28	0.27	4.42	28.90
舟山市	0.02	0.71	0.31	0.71	0.05	0.02	0.01	1.84
台州市	0.81	6.35	2.26	10.80	0.28	0.27	0.19	20.95
合计	7.16	121.37	74.75	227.33	4.11	7.81	18.15	460.68

3.3 排放源贡献

图 1 给出了各类排放源对长三角地区氨排放量的贡献. 由图 1 可见, 氮肥使用对长三角地区氨的排放贡献最大, 约占长三角地区氨排放总量的 49.3%; 其次为畜牧源, 占 44.1%; 其它源 (如氮肥

生产、合成氨生产、生产工艺过程和交通源) 为 3.9%, 生物质燃烧排放为 1.7%, 而人的贡献仅占 0.9%.

氮肥使用是长三角地区最大的氨排放源, 这主要是由于长三角地区大量使用氮肥和氮肥使用结

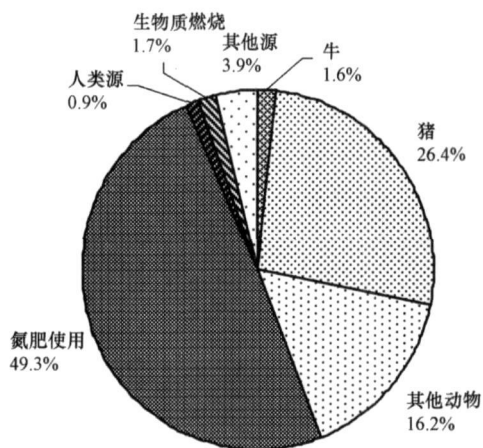


图 1 不同排放源对长三角地区氨排放量的贡献

Fig 1 Distribution of different sources of ammonia in the Yangtze River Delta Region

构所致。在欧美等发达国家, 农业施肥以硝酸铵钙、尿素和硫酸铵为主; 而长三角地区使用的主要是氨挥发率相对较高的尿素和碳酸氢铵(碳铵), 两者使用比例约 90%, 氨挥发率较低的硫酸铵和硝酸铵等用量则很少。与国外尿素使用后氨的挥发率 15% 相比, 长三角地区尿素使用后氨的挥发率明显偏高, 为 17.41%, 碳铵使用后氨挥发率更高, 平均达到 21% 左右。尿素和碳铵氨挥发率大, 与该地区施肥多通过表施(即撒施)的施肥方式有很大关系(苏芳等, 2007)。

畜牧源中猪造成的氨排放占了很大部分, 约占畜牧源氨排放总量的 60%, 尤其是嘉兴市和镇江市, 猪的氨排放超过了该城市畜牧源排放量的 70%。家禽年末存栏数很大, 所以, 其氨排放所占份额也较大, 为 36.8%。牛年末存栏数很少, 造成的氨排放仅占畜牧源氨排放量的 3.5%。

其它源中氨排放主要是石油加工和氮肥生产引起, 两者排放分别为 8.02 kt 和 5.07 kt 石油加工排放主要集中在上海市、宁波市和南京市。生物

质燃烧(秸秆燃烧)排放量为 7.81kt 占长三角地区氨排放的 1.7%。

3.4 氨排放强度及地区分布

排放强度是指一个地区单位面积上污染物的排放量, 衡量某个地区污染物排放情况不仅要考虑该地区的排放总量, 同时也应该结合该地区的排放强度, 综合进行考虑, 这样能更准确地反应该区域的污染情况。

2004 年长三角地区氨排放强度和地理分布如图 2 和图 3 所示。由图 2 可知, 氨排放强度最大的 4 个城市分别是嘉兴市、南通市、泰州市和上海市, 排放强度最大的嘉兴市达到了 $10.83 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 远高于南通市的 $8.66 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 泰州市和上海市的排放强度分别为 $7.08 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $6.77 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。畜牧源排放是造成嘉兴市和南通市排放强度高的最主要原因, 其排放贡献在这两个城市氨排放中分别占 61.3% 和 53.6%, 明显高于长三角地区平均水平。泰州市和上海市的主要排放源为氮肥使用。而排放强度最少的市依然为舟山市, 仅为 $1.28 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。整个长三角地区平均排放强度为 $4.20 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 长三角地区氨的平均排放强度明显高于欧洲和日本, 约为欧洲的 3.3 倍, 为日本的 3.8 倍; 与 1991 年江苏、浙江、上海两省一市的平均排放强度相比也有明显增加(表 8)。

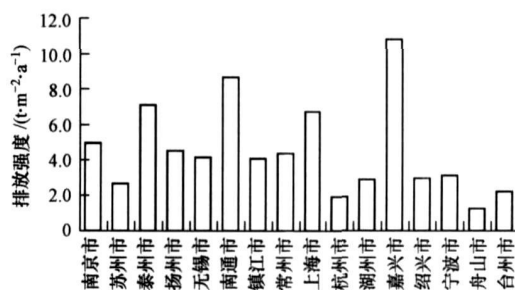


图 2 长三角地区 16 个城市氨排放强度

Fig 2 Ammonia emission intensities of 16 cities in the Yangtze River Delta Region

表 8 不同区域排放强度比较

Table 8 Emission intensities of different regions and countries

作者	年份	地区	源贡献	排放强度 / ($\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)
Asan 1992	1990	欧洲及土耳其(26个国家)	动物 75.9% 氮肥使用 21.8%	1.27
Akiyoshi Kannari et al., 2007	2000	日本	动物 64.3% 氮肥使用 4.6%	1.10
Streets et al., 2003	2000	中国	动物 37.2% 氮肥使用 50.7%	1.41
王文兴等, 1997	1993	上海、江苏、浙江	动物 44.2% 氮肥使用 31.9%	3.38
本文	2004	长三角地区	动物 44.1% 氮肥使用 49.3%	4.20

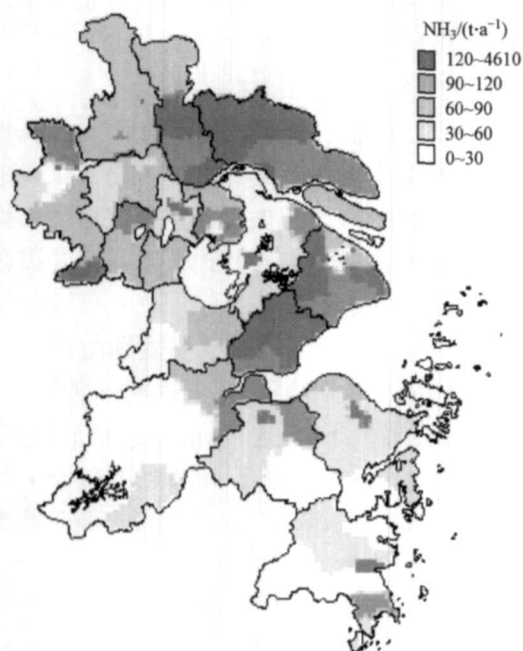


图 3 2004年长三角地区 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ NH_3 网格排放

Fig 3 Gridded NH_3 emissions for the year 2004 for the Yangtze River Delta Region

4 讨论 (Discussion)

氨排放量估算具有一定的不确定性, 主要来自两个方面: 一方面是源于活动水平的不确定性, 个别城市的活动水平数据缺失; 另一方面, 除氮肥使用以外, 其它排放源的排放因子均为国外的研究成果. 中国的自然和社会条件与欧洲、日本、美国都存在较大的差异, 并且施肥方式、动物饲养方式、粪便处理也不完全相同. 同时, 不同研究得出的氨排放因子也有较大差异, 例如, 氮肥生产氨排放的范围就在 $5 \sim 10\text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 之间变化 (孙庆瑞等, 1997). 这些因素也会增加计算结果的不确定性, 要减少这些因素的影响, 全面测试国内各源的排放因子才是解决问题的关键. 同时, 本文仅仅估算了人为源的氨排放量, 为了更加全面地评价长三角地区的氨排放和大气酸沉降状况, 在今后的研究中应该对自然源氨排放以及各类源氨排放的季节性变化进一步开展研究.

5 结论 (Conclusions)

1) 2004年长三角地区氨排放量为 460.68 kt . 长三角地区氨排放在各城市间有较大差异, 排放量超过 40 kt 的城市是南通市、上海市、嘉兴市和泰州市, 其排放量分别达到 69.31 、 42.91 、 42.40 和 41.01

kt . 这 4 个城市氨排放总量约占长三角地区氨排放总量的 42.5% .

2) 氮肥使用是长三角地区氨的最大排放源, 占地区排放总量的 49.3% ; 其次是畜牧源, 约占 44.1% ; 其它源、生物质燃烧和人的氨排放分别占 3.9% 、 1.7% 和 0.9% .

3) 长三角地区平均排放强度为 $4.20\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 排放强度最大的 4 个城市分别是嘉兴市、南通市、泰州市和上海市, 排放强度分别为 10.83 、 8.66 、 7.08 和 $6.77\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$.

责任作者简介: 陈长虹 (1954—), 男, 教授级高工, 上海市环境科学研究院大气所所长. 长期从事城市与区域大气环境研究, 先后获上海市科学技术进步二等奖和三等奖. E-mail: chench@saes.sh.cn 或 chench2005@21cn.com.

参考文献 (References):

- Kannari A, Tonooka Y, Baba T, *et al*. 2007. Development of multiple-species $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ resolution hourly basis emissions inventory for Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 41: 3428–3439
- Amann W A H. 1992. Ammonia Emission in Europe: updated emission and emission variation [R]. 481507002 Bilthoven The Netherlands National Institute of Public Health and Environmental Protection
- Battye R, Battye W, Overcash C, *et al*. 1994. Development and selection of ammonia emission factors [R]. EPA/600/R-94/190 Final report prepared for U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development USEPA Contract No. 68-D3-0034, Work Assignment 0-3
- Bouwman A, Lee D, Asman A, *et al*. 1997. A global high-resolution emission inventory for ammonia [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(4): 561–587
- 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 2005. 秸秆露天焚烧排放的 TSP 等污染物清单 [J]. *农业环境科学学报*, 24(4): 800–804
- Cao G L, Zhang X Y, Wang D, *et al*. 2005. Inventory of emissions of pollutants from open burning crop residue [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 24(4): 800–804 (in Chinese)
- 陈长虹, 黄成, 李莉, 等. 2007. 长三角区域大气污染输送研究 [R]. 上海: 上海市环境科学研究院, 30–31
- Chen C H, Huang C, Li L, *et al*. 2007. Study of atmospheric pollutants transportation over the Yangtze River Delta Region [R]. Shanghai Shanghai Academy of Environmental Sciences, 30–31 (in Chinese)
- 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 2006. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响 [J]. *土壤*, 38(3): 263–269
- Deng M H, Yin B, Zhang S L, *et al*. 2006. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields [J]. *Soils*, 38(3): 263–269 (in Chinese)
- EEA. 2006. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook-2006 [R]. No. 11/2006 Denmark European Environment
- 伏晴艳. 2006. 上海市大气污染物排放清单的建立研究-项目总报告 [R]. 上海: 上海市环境监测中心, 145
- Fu Q Y. 2006. Study of atmospheric pollutants emission inventory in Shanghai [R]. Shanghai Shanghai Environment Monitor Center 145 (in Chinese)

- Goebes M D, Strader R, Davidson C. 2003. An ammonia emission inventory for fertilizer application in the United States [J]. *Atmospheric Environment* 37: 2539—2550
- 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 2003. 黑土区水田化肥氮去向的研究 [J]. *应用生态学报*, 14(11): 1859—1862
- Han X Z, Wang S Y, Song C Y, *et al.* 2003. Fate of fertilizer nitrogen in paddy field of black soil region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 14(11): 1859—1862 (in Chinese)
- 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 2005. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究 [J]. *土壤学报*, 42(2): 253—258
- He F Y, Yin B, Jin X X, *et al.* 2005. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs [J]. *Acta Pedologica Sinica* 42(2): 253—258 (in Chinese)
- Heeb N V, Forss A M, Br hmann S, *et al.* 2006. Three-way catalyst-induced formation of ammonia-velocity- and acceleration- dependent emission factors [J]. *Atmospheric Environment* 40: 5986—5997
- Heeb N V, Saxer C J, Forss A M, *et al.* 2008. Trends of NO₂, NO₂, and NH₃-emissions from gasoline-fueled Euro-3- to Euro-4-passenger cars [J]. *Atmospheric Environment* 42: 2543—2554
- 李贵桐, 李保国, 陈德立. 2002. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发 [J]. *华北农学报*, 17(1): 76—81
- Li G T, Li B G, Chen D L. 2002. Ammonia volatilization from large field planted with winter wheat and summer maize [J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica* 17(1): 76—81 (in Chinese)
- 林岩, 段雷, 杨永森, 等. 2007. 模拟氮沉降对高硫沉降地区森林土壤酸化的贡献 [J]. *环境科学*, 28(3): 640—645
- Lin Y, Duan L, Yang Y S, *et al.* 2007. Contribution of simulated nitrogen deposition to forest soil acidification in area with high sulfur deposition [J]. *Environment Science*, 28(3): 640—645 (in Chinese)
- 刘煜, 李维亮, 周秀曦. 2005. 夏季华北地区二次气溶胶的模拟研究 [J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 35(增刊 I): 156—166
- Liu Y, Li W L, Zhou X J. 2005. Model study of springtime secondary aerosol over the North China [J]. *Science in China Ser D Earth Sciences* 35(Supplement I): 156—166 (in Chinese)
- M isselbrook T H, Van Der Weerden T J, Pain B F, *et al.* 2000. Ammonia emission factors for UK agriculture [J]. *Atmospheric Environment* 34: 871—880
- 彭应登, 杨明珍, 申立贤. 2000. 北京氨源排放及其对二次粒子生成的影响 [J]. *环境科学*, 21(6): 101—103
- Peng Y D, Yang M Z, Shen L X. 2000. Ammonia emission and its effects on the formation of secondary particles in Beijing [J]. *Environment Science* 21(6): 101—103 (in Chinese)
- Streets D G, Bond T C, Camichael G R, *et al.* 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research* 108(D21): 8809
- 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 等. 2007. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发 [J]. *中国环境科学*, 27(3): 409—413
- Su F, Ding X Q, Gao Z L, *et al.* 2007. Ammonia volatilization from nitrogen fertilization of winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain [J]. *China Environmental Science* 27(3): 409—413 (in Chinese)
- 孙庆瑞, 王美蓉. 1997. 我国氨排放量和时空分布 [J]. *大气科学*, 21(5): 590—598
- Sun Q R, Wang M R. 1997. Ammonia emission and concentration in the atmosphere over China [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* 21(5): 590—598 (in Chinese)
- Sutton M A, Place C J, Eager M, *et al.* 1995. Assessment of the magnitude of ammonia emissions in the UK [J]. *Atmospheric Environment* 29: 1393—1411
- Sutton M A, Dragosits U, Tang Y S, *et al.* 2000. Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK [J]. *Atmospheric Environment* 34: 855—869
- 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 2001. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素 [J]. *土壤学报*, 38(3): 324—331
- Tian G M, Cai Z C, Cao J L, *et al.* 2001. Ammonia volatilization from paddy field and its affecting factors in Zhenjiang Hilly Region [J]. *Acta Pedologica Sinica* 38(3): 324—331 (in Chinese)
- USEPA. 1996. Compilation of air pollutant emission factors Vol 1: Stationary point and area sources (5th edition). U. S.
- Van Der Hoek K W. 1998. Estimating ammonia emission factors in Europe: summary of the work of the UNECE ammonia expert panel [J]. *Atmospheric Environment* 32(3): 315—316
- 王文兴, 卢筱凤, 庞燕波, 等. 1997. 中国氨的排放强度地理分布 [J]. *环境科学学报*, 17(1): 2—6
- Wang W X, Lu X F, Pang Y B, *et al.* 1997. Geographical distribution of NH₃ emission intensities in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 17(1): 2—6 (in Chinese)
- 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 2002. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氨挥发的原位测定 [J]. *生态学报*, 22(3): 359—365
- Wang Z H, Liu X J, Ju X T, *et al.* 2002. In situ determination of ammonia volatilization from wheat-maize rotation system field in the North China [J]. *Acta Ecologica Sinica* 22(3): 359—365 (in Chinese)
- 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. *气象学报*, 64(4): 510—518
- Wu D, Bi X Y, Deng X J, *et al.* 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River Delta [J]. *Acta Meteorologica Sinica* 64(4): 510—518 (in Chinese)
- 颜鹏, 张养梅, 杨东贞, 等. 2005. 2003年夏季临安地区大气气溶胶离子成分的尺度分布特征 [J]. *气象学报*, 63(6): 980—986
- Yan P, Zhang Y M, Yang D Z, *et al.* 2005. The characteristics of aerosol ionic size distributions at Lin'an in summer of 2003 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* 63(6): 980—986 (in Chinese)
- 叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 等. 2002. 中国主要湖泊营养氮沉降临界负荷的研究 [J]. *环境污染与防治*, 24(1): 54—58
- Ye X M, Hao J M, Duan L, *et al.* 2002. On critical loads of nutrient nitrogen deposition for some major lakes in China [J]. *Environment Pollution and Control* 24(1): 54—58 (in Chinese)
- 张玉铭, 胡春胜, 董文旭. 2005. 华北太行山前平原农田氨挥发损失 [J]. *植物营养与肥料学报*, 11(3): 417—419
- Zhang Y M, Hu C S, Dong W X. 2005. Ammonia volatilization from wheat-maize rotation field in the piedmont of Taihang [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 11(3): 417—419 (in Chinese)
- 朱兆良, 范晓晖, 孙永红, 等. 2004. 太湖地区水稻土上稻季氮素循环及其环境效应 [J]. *作物研究*, (4): 187—191
- Zhu Z L, Fan X F, Sun Y H, *et al.* 2004. Environment effect and cycle of N in paddy fields in the Taihu lake region during rice growth season [J]. *Crop Research*, (4): 187—191 (in Chinese)
- 朱兆良, Simpon J R, 张绍林, 等. 1989. 石灰性稻田土壤上化肥氮损失的研究 [J]. *土壤学报*, 26(4): 337—342
- Zhu Z L, Simpson J R, Zhang S L, *et al.* 1989. Investigations on nitrogen losses from fertilizers applied to flooded calcareous paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica* 26(4): 337—342 (in Chinese)