

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琄(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

2013 ~ 2017 年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征

侯新红*, 于兴娜*, 沈丽, 赵睿东, 王国桢, 张毓秀

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 根据江苏省各类氨排放源活动水平数据, 采用合理的清单测算方法和排放因子, 建立了 2013 ~ 2017 年江苏省人为源氨排放清单, 对其历年来人为源氨排放量的变化趋势进行分析. 利用 ArcGIS 软件对江苏省人为源氨排放量及排放强度的分布特征进行分析. 结果表明, 江苏省的氨排放量由 2013 年的 624.84 kt 减少至 2017 年的 562.47 kt, 年均下降率约为 2.6%. 农业源一直是江苏省最主要的氨排放源, 2017 年时占江苏省氨排放总量的 82.4%; 蛋鸡是畜禽养殖源中最大的氨排放源, 占畜禽源氨排放量的 49.3%. 2017 年江苏省氨平均排放强度为 $5.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 其中盐城市和徐州市是江苏省人为源氨排放量和排放强度最大的两个城市, 镇江市的氨排放量和排放强度最小.

关键词: 氨; 排放因子; 排放清单; 排放强度; 江苏省

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4862-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904129

Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017

HOU Xin-hong, YU Xing-na*, SHEN Li, ZHAO Rui-dong, WANG Guo-zhen, ZHANG Yu-xiu

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: According to activity level data of various ammonia emission sources in Jiangsu Province, using a reasonable inventory calculation method and emission factor, an ammonia emission inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017 was established, and the trend of anthropogenic ammonia emissions over these years was analyzed. The distribution characteristics of anthropogenic ammonia emissions and emission intensity in Jiangsu Province were analyzed using ArcGIS software. The results showed that the ammonia emissions in Jiangsu Province decreased from 624.84 kt in 2013 to 562.47 kt in 2017 with an average annual rate of decline of approximately 2.6%. Agricultural has always been the most important source of ammonia emissions in Jiangsu Province and accounted for 82.4% of the total ammonia emissions in 2017. Laying hens are the largest source of ammonia emissions from livestock and poultry sources, accounting for 49.3% of the ammonia emissions from livestock and poultry. The average ammonia emission intensity in Jiangsu Province was $5.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ in 2017. Yancheng and Xuzhou are two cities with the largest anthropogenic ammonia emissions and emission intensity in Jiangsu Province. Zhenjiang City has the lowest ammonia emission and emission intensity.

Key words: ammonia; emission factor; emission inventory; emission intensity; Jiangsu Province

氨是大气中唯一的偏碱性气体, 是参与大气氮循环过程中最重要的成分之一^[1]. 大气中的氨能与 SO_2 和 NO_x 等气体发生反应生成硝酸铵和硫酸铵等铵盐, 这些铵盐是大气气溶胶细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 的重要前体物^[2], 对霾的形成、云雨水的酸性以及人体健康有重要的影响, 也会导致土壤酸化和水体富营养化等环境问题^[3]. 由此可见, 氨排放与大气污染问题密不可分, 研究氨排放水平及其分布特征对于改善环境问题具有重要的现实意义.

近年来, 大气雾、霾污染日益严峻, 氨排放清单的研究日益受到国内外学者的重视. 国外学者对氨排放的研究较早, 如 Sutton 等^[4]对英国地区氨排放估算进行了研究, 氨排放源覆盖了农业源、非农业源和天然源. 国内对于大气氨排放清单的研究较少, 主要集中在较大尺度范围内. 例如, 孙庆瑞等^[5]及王文兴等^[6]利用排放因子法, 基于畜禽养殖、氮肥施用和氮肥生产量, 估算了全国氨排放量

及其分布特征; 王琛等^[7]估算了河南省各市的氨排放特征, 结果表明农业源为主要氨排放源. 董艳强等^[8]估算了长江三角洲地区各市的氨排放量; 尹沙沙等^[9,10]估算了珠江三角洲人为源氨排放量及其时空特征. 此外, 在城市尺度上, 苏州市^[11]、西安市^[12]和南通市^[13]等均对其建立了氨排放清单及其分布特征. 这些研究均表明农业源是大气氨排放的最大贡献源.

江苏省地处中国大陆东部沿海中部, 是长江三角洲的重要组成部分. 近年来, 随着当地工业化城市化进程不断加快, 大气污染从城市空气污染向区域、复合型大气污染转变, 并已表现出明显的区域

收稿日期: 2019-04-12; 修订日期: 2019-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203501); 国家自然科学基金项目(41775154); 江苏省“六大人才高峰”项目(JNHB-057); 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介: 侯新红(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: houxinhonghkh@163.com

* 通信作者, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

大气污染特征, 严重威胁人民群众的身体健康^[14]. 因此, 江苏省地区人为源氨排放清单也需及时更新, 沈丽等^[3]建立的 2006~2014 年江苏省人为源氨排放清单已不能满足最新形势下江苏地区氨排放特征, 江苏省需根据最新的统计数据建立一份最新最全面的人为源氨排放清单. 弄清该地区大气氨排放情况, 有利于了解氨排放对雾、霾污染形成的影响, 是阐明区域性大气污染问题的关键. 本研究将每个氨排放源进行细分, 根据江苏省统计局获取所需的活动水平数据, 对于清单测算方法和排放系数参考文献^[15], 建立 2013~2017 年江苏省人为源氨排放清单, 以期环保工作者研究该地区氨排放对雾、霾形成机制的影响以及制定相关控制对策和管理政策等提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域及对象

研究区域为江苏省, 包括南京市、苏州市、无锡市和南通市等 13 个地级市, 估算的人为氨源包括两类: 农业源和非农业源. 农业源包括畜禽源和农田氮肥施用, 非农业源包括工业生产、人体排放、燃料燃烧、生物质燃烧、废弃物处理和交通源.

1.2 数据来源

畜禽源、农田氮肥施用、工业生产、人体排放、生物质燃烧、交通源以及废弃物处理源中烟气脱硝的活动水平数据来自所分析年江苏省统计年鉴^[16~20]. 燃料燃烧的活动水平数据来自所分析年江苏省统计年鉴和中国能源统计年鉴^[21~25]. 废弃物处理源中垃圾和污水处理的活动水平数据来自所分析年中国城市建设统计年鉴^[26~30]. 本研究排放因子主要参考国家环保部最新编制的技术指南以及国内外研究成果, 优先选用国家环保部制定的技术指南.

1.3 估算方法

本研究采用排放因子法, 根据各市的活动水平, 对江苏省人为源的氨排放量进行估算, 计算公式为:

$$E_{i,j} = \sum_j A_{i,j} \times EF_j \times \gamma \quad (1)$$

式中, E 为氨排放量 (kg); i, j 分别为地区、源类别; A 为活动水平 [头、人和吨 (t) 等]; EF 为排放因子 ($\text{kg} \cdot \text{头}^{-1}$ 、 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$ 等); γ 为氮-大气氨转换系数, 畜禽源取 1.214, 其它排放源取 1.0. 以下针对具体排放源分别做介绍.

1.3.1 畜禽养殖

畜禽养殖排放的氨主要来自畜禽排泄物释放,

粪便包括室内和户外两部分, 畜禽粪便管理阶段包括户外、圈舍内、粪便存储处理和后续施肥, 排泄物种类分为液态和固态. 由于畜禽排泄物的产生量受畜禽种类影响, 所以确定养殖畜禽的种类是畜禽氨排放清单的关键^[31~33]. 根据文献^[16~20]获取 2013~2017 年江苏省黄牛、水牛、奶牛、母猪、山羊、蛋鸡、蛋鸭、肉牛、肉猪、肉鸡、肉鸭、肉鹅和兔等 13 个子排放源的畜禽年饲养量, 按养殖模式均可划分为散养与集约化养殖, 参考文献^[34]得到江苏地区猪、牛、家禽和羊的散养比例分别为 10%、5%、5% 和 50%. 由于黄牛、水牛、奶牛、母猪、山羊、蛋鸡和蛋鸭的饲养周期大于 1 a 及 1 a 以上, 则将其按年末存栏数统计; 肉牛、肉猪、肉鸡、肉鸭、肉鹅和兔则按照年末出栏数统计. 参考文献^[15]中的计算方法及各类畜禽的排放系数, 计算各畜禽不同养殖方式的室内、户外总铵态氮 (TAN) 以及不同粪便管理阶段铵态氮量, 然后再根据对应的排放系数计算各类畜禽, 分散养和集约化养殖方式下, 不同阶段的氨排放量. 畜禽源的氨排放系数如表 1 所示. 由于文献^[15]中未给出黄牛、水牛和兔的排放系数, 其排放因子参考文献^[35], 分别为 15.44、9.74 和 0.23 $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1}$.

1.3.2 氮肥施用

氮肥是指含有或者能产生铵离子的化肥, 氮肥施放到农田后通过微生物作用或自身分解, 氮以氨的形式释放到大气中, 这个过程氨挥发是大气氨排放的重要来源. 氮肥施用氨排放量的大小不仅与氮肥种类有关, 还会受到施肥方式、气候与土壤特性等因素的影响^[36]. 本研究基于江苏省统计年鉴^[16~20]收集得到 2013~2017 年江苏省各市农用氮肥施用总量, 其中氮肥包括尿素、碳酸氢铵、硝酸铵、硫酸铵及其他含氮肥料. 不同类型氮肥的施用份额参考文献^[37], 再结合其排放因子估算 2013~2017 年江苏省各市由于氮肥施用导致的氨排放量. 不同类型氮肥的排放因子参考文献^[9], 详见表 2.

1.3.3 工业生产过程

工业生产导致的氨排放主要来源于合成氨和氮肥生产, 基于产品产量和其排放因子进行估算. 本研究通过文献^[16~20]获取 2013~2017 年江苏省各市合成氨和氮肥的年产量. 通过文献^[15]获得合成氨生产排放因子为 0.01 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 氮肥生产为 5.0 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$.

1.3.4 人体排放

人体排放氨的途径有人体呼吸、汗液及粪尿. 人体排放产生的氨与人口数量关系密切, 本研究采

表 1 畜禽养殖集约化养殖和散养氨排放系数¹⁾/%

Table 1 Factors affecting ammonia emissions in intensive cultivation and with free range livestock/%											
畜禽种类	户外	圈舍-液态		圈舍-固态		储存-液态		储存-固态		氮肥液态	氮肥固态
		集约	散养	集约	散养	集约	散养	集约	散养		
奶牛 >1 a	30	14	14	14	14	15.8	20	4.2	27	55	79
奶牛 <1 a	53	7	7	7	7	15.8	20	4.2	27	55	79
母猪	30	14.3	14.7	14.3	14.7	3.8	14	4.6	45	40	81
山羊 >1 a	75	14	14	14	14	15.8	28	4.2	28	90	81
山羊 <1 a	53	7	7	7	7	15.8	20	4.2	27	55	79
蛋鸡	69	0	45.2	35.9	45.2	0	0	3.7	14	0	63
蛋鸭	54	0	45.2	35.9	45.2	0	0	3.7	24	0	63
肉牛 >1 a	53	14	14	14	14	15.8	20	4.2	27	55	79
肉牛 <1 a	53	7	7	7	7	15.8	20	4.2	27	55	79
肉猪 >75 d	0	18.5	10.2	18.5	10.2	3.8	14	4.6	45	40	81
肉猪 <75 d	0	15.6	15.6	15.6	15.6	3.8	14	4.6	45	40	81
肉鸡	66	0	40.3	40.3	40.3	0	0	0.8	17	0	63
肉鸭	54	0	40.3	40.3	40.3	0	0	0.8	24	0	63
肉鹅	54	0	40.3	40.3	40.3	0	0	0.8	24	0	63

1) 江苏地区 2013 ~ 2017 年的年均气温在 10 ~ 20℃ 之间, 排放系数参考文献[15] 中 10 ~ 20℃ 的值

表 2 不同氮肥的排放因子/%

Table 2 Emission factors of different nitrogen fertilizers/%					
项目	尿素	碳酸氢铵	硝酸铵	硫酸铵	其他
排放因子	21.3	17.4	2	8	3

用江苏省统计年鉴中江苏各市年末常住人口作为活动水平数据. 由于我国农村地区人口较多, 且卫生处理设施不完善, 因此对于人体氨排放的活动水平数据, 本研究将城镇人口和农村人口分开考虑. 城市人口的排放因子参考董文煊等^[38] 的研究成果, 取 0.25 kg·人⁻¹; 而农村人口的排放因子参考文献[15], 为 0.787 kg·人⁻¹.

1.3.5 道路移动源

机动车车用燃料尾气排放是道路移动源氨排放的主要来源. 车辆的氨排放量与车辆类型和年均行驶里程有关, 根据车型和燃料类型, 将机动车分为轻型汽油客车、轻型汽油货车、重型汽油客车、重型汽油货车、轻型柴油客车、轻型柴油货车、重型柴油客车、重型柴油货车和摩托车等 9 类. 活动水平数据可从江苏省统计年鉴中获得, 由于数据的局限性, 参考江苏省统计年鉴中分车型的机动车保有量比例推算出江苏省分车型的机动车保有量, 各类机动车的燃料比例参考文献[39]. 根据不同类型机动车保有量和不同类型机动车的年均行驶里程按照公式(2)进行估算. 根据文献[15]得到各类型机动车的排放因子, 详见表 3, 车辆的年均行驶里程的取值参考文献[40], 详见表 4.

$$E = \sum_i 10^{-6} \times P_{i,j} \times M_{i,j} \times EF_j \quad (2)$$

式中, E 为机动车氨排放量(t); i 为地区, j 为车辆类型; P 为机动车保有量(辆); M 为机动车年均行驶里程(km); EF 机动车排放因子(mg·km⁻¹).

表 3 机动车尾气排放因子/mg·km⁻¹

Table 3 Vehicle exhaust emission factors/mg·km ⁻¹					
项目	轻型汽油车	轻型柴油车	重型汽油车	重型柴油车	摩托车
排放因子	26.00	4.00	28.00	17.00	7.00

表 4 各种车型的年均行驶里程 × 10⁴/km

Table 4 Annual average travel of different vehicle categories × 10 ⁴ /km					
项目	小客车	小货车	大客车	大货车	摩托车
年均行驶里程	2.59	3.23	4.00	4.40	0.99

1.3.6 燃料燃烧

燃料燃烧根据燃料类型和使用部门, 主要分为居民生活和工业的燃煤、燃油和天然气. 其中, 居民生活燃料燃烧的活动水平数据通过中国能源统计年鉴^[21-25] 获得江苏省各类民用燃料的年消耗量, 结合各市年末常住人口数比例估算; 工业燃料燃烧量可直接通过江苏省各市统计年鉴获得. 燃料燃烧源中的排放因子的选取参考文献[35], 详见表 5.

表 5 燃料燃烧源 NH₃ 排放因子

Table 5 Ammonia emission factors from fuel combustion sources			
项目	燃煤 /kg·t ⁻¹	燃油 /kg·(10 ³ L) ⁻¹	燃天然气 /kg·(10 ⁶ m) ⁻¹
生活燃料燃烧	1	0.12	320.38
工业燃料燃烧	0.01	0.1	51.26

1.3.7 生物质燃烧

生物质燃烧是除煤、石油和天然气以外的第四大能源. 根据江苏省地形地貌及植被情况, 本研究估算了由废弃秸秆的露天燃烧以及家用秸秆和薪柴的燃烧导致的氨排放, 暂不考虑森林火灾和草原燃烧导致的氨排放. 对于废弃秸秆的露天燃烧, 基于其燃烧量按照公式(3)来计算:

$$M = \sum_j P_j \times C_j \times R_j \times D \times F \quad (3)$$

式中, M 为秸秆露天焚烧量(t); j 表示农作物类型; P 为农作物的产量(t); C 为农作物的谷草比; R 为谷草干燥比; D 为秸秆焚烧比例; F 为焚烧效率. 本研究选取的谷草比和谷草干燥比参考文献[3, 10]; 对于秸秆焚烧比例, 本研究采用王书肖^[41]的调查结果, 取 0.329; 秸秆燃烧效率参考国内学者张鹤丰^[42]对我国水稻、小麦和玉米这 3 种作物秸秆燃烧率所测结果, 取平均值为 92.5%. 根据江苏省统计年鉴口径分类, 确定主要农作物种类有稻谷、小麦、玉米、大豆、薯类、棉花、花生、菜油和蔬菜等, 主要农作物产量活动水平数据来自统计年鉴. 根据文献[15]获得小麦、玉米和其他作物的秸秆露天燃烧的排放因子分别为 0.37、0.68 和 0.52 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$.

对于家用秸秆和薪柴的燃烧, 基于其燃烧量采用公式(1)进行氨排放的估算^[35]. 根据文献[43~45]获取到 2005~2007 年江苏省农村地区秸秆和薪柴的消费情况. 本研究按照江苏地区农村人口增长比例推导出 2013~2017 年江苏省的各年消费量, 然后由江苏省各市主要农作物播种面积占江苏省总农作物播种面积比例, 将秸秆家用总量采用自上而下的方法分配; 而薪柴则根据江苏省各市农村人口数量占江苏省总农村人口数量的比例进行分配. 家用秸秆的排放因子参考文献[35], 取 1.30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 薪柴的排放因子参考文献[15], 取 1.30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.3.8 废弃物处理

废弃物处理产生的氨主要来自污水处理过程、垃圾处理过程以及烟气脱硝过程. 污水处理和垃圾处理基于江苏省 13 市污水和垃圾处理量估算, 其中垃圾处理过程包括垃圾的焚烧、填埋和堆肥^[46], 本研究仅考虑由填埋和焚烧这两种方式所释放的氨排放量; 烟气脱硝过程中所释放的氨基于钢铁和水泥生产燃煤的消耗量进行估算. 排放因子参考文献[15], 详见表 6.

表 6 废弃物处理排放因子

Table 6 Emission factors of waste disposal				
污水处理 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	垃圾处理/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$		烟气脱硝/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	
	焚烧	填埋	SCR	SNCR
3.2	0.21	0.56	0.155	0.17

2 结果与讨论

2.1 江苏省氨排放量变化趋势

根据上述研究方法和活动水平数据, 得到了江苏省 2013~2017 年人为源氨排放量的变化趋势(如图 1). 可以看出, 2013~2017 年间, 江苏省人为源氨排放量总体为下降趋势, 从 2013 年的 624.84 kt 下降到 2017 年的 562.47 kt, 年均下降率为 2.6%.

这一下降趋势与沈丽等^[3]的研究结果不同, 说明近几年氨排放源已经发生了变化. 其中农业源、人体排放、生物质燃烧以及工业生产源排放的氨均表现为下降趋势, 尤其是农业源下降得最为明显, 由 2013 年的 517.90 kt 到 2017 年的 463.46 kt. 农业源(畜禽养殖及氮肥施用)一直是江苏省氨排放的主要来源, 研究期间两者的总贡献均超过 80%. 2013~2017 年畜禽养殖和氮肥施用排放的氨分别下降了 27.15 kt 和 27.10 kt. 人体排放源产生的氨表现出略微下降的趋势, 可能是由于江苏省城市人口增加, 而农村人口减少造成的. 生物质燃烧源则由于秸秆、薪柴以及农作物产量降低导致氨排放量下降. 由于氮肥产量不断减少导致工业生产源产生的氨排放量也逐年减少. 与上述排放源不同, 燃料燃烧和道路移动源产生的氨排放量却表现出逐年增加趋势. 由于近年来江苏省汽车保有量不断增加导致机动车排放的氨逐年增加, 比如汽车保有量由 2013 年的 954.38 万辆增加到 2017 年的 1619.46 万辆. 燃料燃烧源产生的氨排放量在 1.88~5.57 kt 之间变化, 主要是由于工业化城市化进程不断加快引起天然气、煤和油等使用量不断增多所致. 废弃物处理排放的氨无明显变化, 其中垃圾处理、污水处理和烟气脱硝过程产生的氨年均排放量分别约为 4、11 和 12 $\text{kt} \cdot \text{a}^{-1}$.

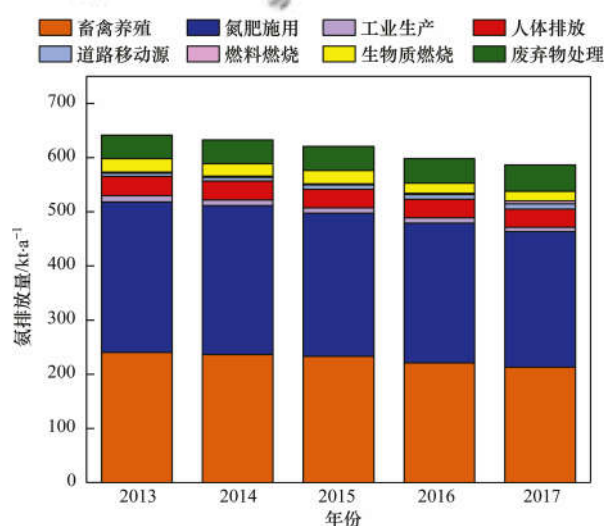


图 1 2013~2017 年江苏省氨排放总量变化趋势

Fig. 1 Trends in total ammonia emissions in Jiangsu Province from 2013 to 2017

2.2 2017 年江苏省氨排放清单

江苏省 2017 年人为源大气氨排放清单如表 7 所示. 可以看出, 该地区 2017 年人为源氨排放总量为 562.47 kt, 其中农业源和非农业源的排放量分别占总排放量的 82.4% 和 17.6%. 可见, 农业源是江苏省大气氨排放的最主要来源, 这与文献[4, 9]的

研究结果一致. 主要原因与江苏省较大的种植面积以及较高的畜禽养殖量有关. 此外, 与其他排放源比较, 农业源排放因子较大也导致了农业源成为江苏省人为源氨排放主要来源的因素之一.

在农业源中, 畜禽养殖和氮肥施用的氨排放量相差不大, 分别达到 212.91 kt 和 250.54 kt. 但非农业源对大气氨的贡献量也值得重视, 其中人体排放、废弃物处理和生物质燃烧源产生的氨排放量较

高, 分别为 33.55、24.83 和 17.47 kt, 共占人为源氨排放总量的 13.5%, 这与较大的人口数量、废物处理量以及秸秆薪柴的消费量较大有关. 此外, 在农业源中, 苏北地区尤其是徐州市和盐城市氨排放量较大, 苏南地区氨排放量较小, 镇江市是苏南地区氨排放量最小的城市; 在非农业源中, 各市氨排放量差距较小. 可见, 农业源是对人为源氨排放影响的关键因素.

表 7 2017 年江苏省各类人为氨源排放清单/ $\text{kt}\cdot\text{a}^{-1}$

项目	农业源		非农业源						总计
	畜禽源	氮肥施用	工业生产	人体排放	交通源	燃料燃烧	生物质燃烧	废弃物处理	
南京市	4.29	6.02	0.50	2.88	1.47	0.46	0.65	4.98	21.26
无锡市	2.55	3.54	2.51	2.48	1.09	0.56	0.41	3.18	16.33
徐州市	42.57	48.62	0.23	3.89	0.73	0.91	2.60	1.37	100.94
常州市	4.70	5.67	0.24	1.89	0.76	0.30	0.48	2.25	16.28
苏州市	3.42	5.62	2.01	4.06	1.89	0.98	0.64	6.44	25.06
南通市	31.78	18.11	0.05	3.17	0.96	0.42	1.81	0.90	57.20
连云港市	12.59	27.55	0.28	2.06	0.35	0.16	1.46	1.15	45.60
淮安市	15.81	32.97	0.59	2.25	0.32	0.40	1.82	0.83	54.99
盐城市	51.97	41.10	0.45	3.25	0.54	0.31	3.01	0.74	101.37
扬州市	7.20	15.95	0.03	1.95	0.44	0.26	1.14	1.10	28.07
镇江市	3.19	3.89	0.12	1.30	0.35	0.29	0.53	1.13	10.80
泰州市	10.57	12.46	0.03	2.04	0.43	0.38	1.28	0.44	27.62
宿迁市	22.28	29.04	0.87	2.32	0.35	0.11	1.64	0.33	56.94
合计	212.91	250.54	7.90	33.55	9.69	5.57	17.47	24.84	562.47
	463.46		99.01						

2.3 2017 年江苏省人为源氨排放特征分析

2017 年各类排放源对江苏省人为源氨排放量的贡献如图 2 所示. 可以看出, 氮肥施用源是江苏省最大的氨排放贡献源, 占江苏省氨排放总量的 44.4%; 其次为畜禽养殖(占比为 37.7%). 除此以外, 人体排放、废弃物处理和生物质燃烧的氨排放量在非农业源中占比相对较大, 其他排放源(交通源、工业生产、燃料燃烧)产生的氨排放量较小.

由于畜禽源导致的氨排放占总排放量的比重较大, 本研究中针对其做进一步的贡献率分析, 如图 3 所示. 从中可知, 蛋鸡、肉鸡、羊和肉猪这 4 种畜禽的氨排放量较大, 分别为 104.93、26.30、22.45

和 16.92 kt, 分别占江苏省畜禽源氨排放总量的 49.3%、12.4%、10.5% 和 7.9%. 这主要是因为鸡、羊和猪饲养周期短以及人们日常生活对鸡、羊和猪的消费量较大导致其饲养量大, 排放贡献率较高; 而较低的养殖数量和年平均氮排泄量使得蛋鸭、母猪、肉鸭、鹅和兔这 5 种畜禽的氨排放量较小. 对于较大牲畜如奶牛、肉牛、黄牛和水牛等, 由于其饲养周期长、占地面积较大以及大的畜牧场退居江苏地区以外等因素, 造成其排放量分摊率较小.

对人为源氨排放最大贡献源的农业源进行单独分析, 各城市氨排放贡献分布情况如图 4 所示. 从中

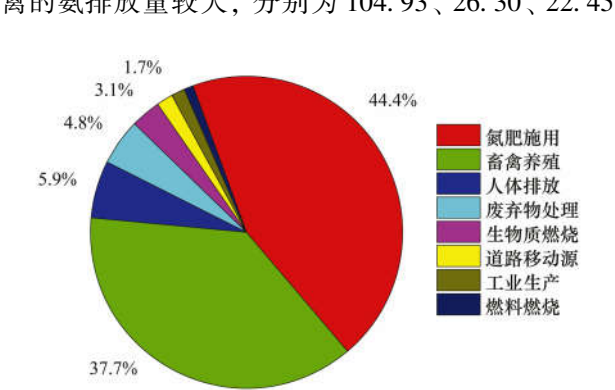


图 2 2017 年江苏省各源氨排放分摊率
Fig. 2 Contributions of ammonia emissions from various sources in 2017 in Jiangsu Province

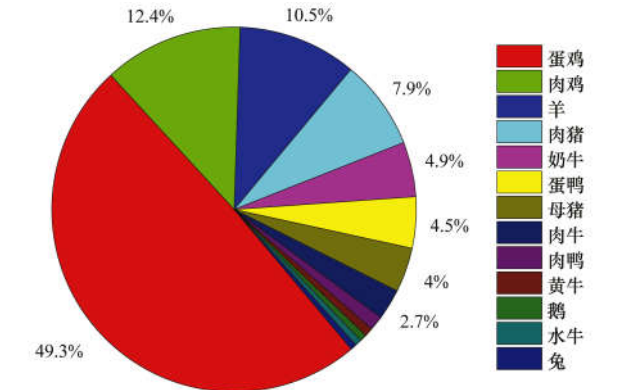


图 3 2017 年江苏省各类畜禽氨排放分摊率
Fig. 3 Contributions of ammonia emissions from various types of livestock in 2017 in Jiangsu Province

可知,各个城市畜禽养殖和氮肥施用氨排放贡献率存在较大差异,贡献率范围分别为 1.2%~24.4% 和 1.4%~19.4%。其中盐城市和徐州市是畜禽养殖和氮肥施用氨排放贡献最大的两个城市,分别占到 24.4%、20.0% 和 19.4%、16.4%。无锡市、镇江市、苏州市、常州市和南京市的排放贡献率较小。

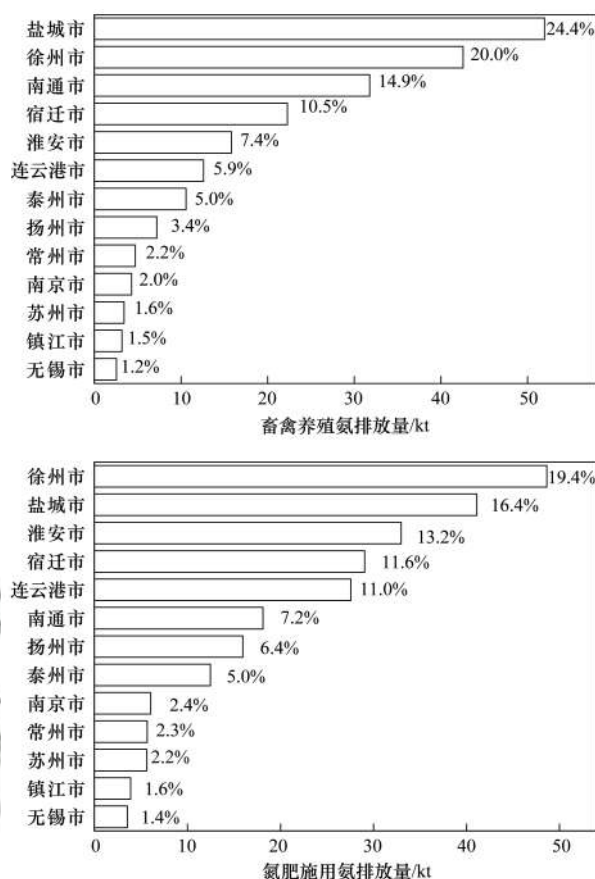


图 4 江苏省各市畜禽养殖和氮肥施用的氨排放量和相对贡献

Fig. 4 Ammonia emission and relative contribution from livestock waste and nitrogen fertilizer application in Jiangsu Province

另外,由于江苏地区各市经济发展和产业中心的差异,使得江苏省 13 个城市氨排放源特征不同。而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应综合考虑该地区的排放总量及其排放强度,这样才能更准确地反映该区域的污染情况。本研究利用 ArcGIS 提取江苏省地理边界信息,并绘制了江苏省 13 市 2017 年氨排放空间分布及氨排放强度空间分布如图 5 所示。从中可知,各个城市人为源氨排放贡献率存在较大差异。盐城市和徐州市依次是江苏省人为源氨排放量最大的两个城市,年排放量高达 101.37 kt 和 100.94 kt,其排放份额共占江苏省排放总量的 36.0%。这可能是由于盐城市和徐州市汇集了江苏省大部分养殖资源,畜禽养殖业发达,农作物播种面积较大,使得氮肥施用量较大;同时,这两个城市的农村人口较多也会导致氨排放量较大。而排放量最小的城市为镇江市,年排放量仅为 10.80 kt,占全省排放总量的 1.9%,这与镇江市的农牧业规模和产量都相对较小以及最少的人口数量有关。造成这种空间差异的主要原因是由于经济水平、人口数量、物质需求和农牧业结构等不同。苏北地区的氨排放强度明显高于苏南地区,其中排放强度最大的城市为徐州市,约为 $8.6 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,其他苏北城市的氨排放强度在 $4.3 \sim 6.7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 之间变化。相对于苏北地区,苏南地区氨排放强度较小,无锡市、常州市、南京市和苏州市的氨排放强度在 $2.9 \sim 3.7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 之间变化;镇江市氨排放强度最小,约为 $2.8 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。总体而言,2017 年江苏省大气氨平均排放强度为 $5.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。

2.4 人为源氨排放清单对比

本研究将江苏省人为源大气氨排放量与其他城市排放水平进行对比,结果如表 8 所示。可以看出,畜禽养殖和氮肥施用均是不同地区氨排放的主要贡献源,两者占比在 80% 以上。对比刘春蕾等^[47]估算的 2013 年南京市以及王平^[13]估算 2009 年南通市的氨排放量,本研究得到的 2017 年南京市和南

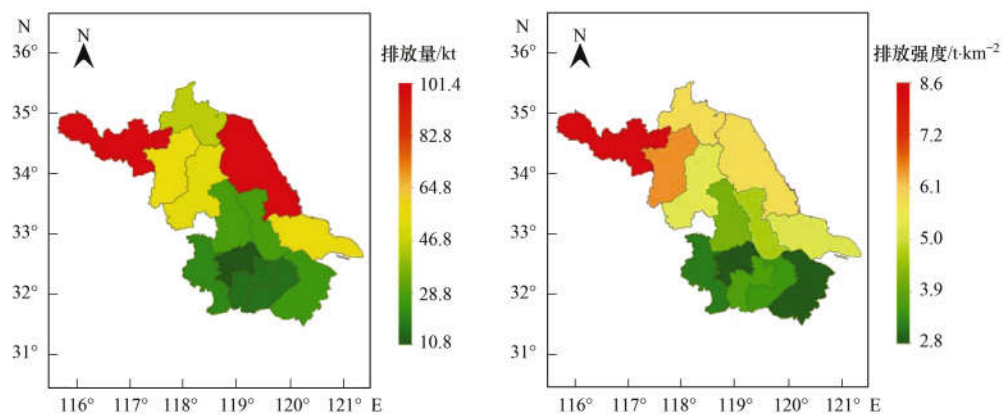


图 5 2017 年江苏省各市氨排放量和排放强度特征分布

Fig. 5 Characteristics of ammonia emissions and emission intensity in Jiangsu Province in 2017

通市的氨排放量均偏低,氨排放量分别降低了 4.53 kt 和 3 kt,可能是由于各研究中部分源的活动水平数据及排放因子不同.与沈丽等^[3]的研究相比,本研究估算氨排放量结果偏低,主要是由于本研究在测算畜禽养殖的排放量时,区分了集约化养殖和散养以及选取的畜禽养殖源的畜禽种类较全面.与河

南省 2013 年的结果相比^[7],江苏省 2017 年的氨排放量和氨排放强度均较低,而与西安市 2013 年的结果相比^[12],江苏省 2017 年的氨排放量和氨排放强度均较高,原因主要是江苏省在测算畜禽养殖的排放量时,区分了集约化养殖和散养以及两省畜禽源的活动水平数据相差较大所致.

表 8 与其他同类研究结果比较

Table 8 Comparison with other similar research results

地区	年份	排放量/kt	排放强度/t·km ⁻²	主要源占比	文献
江苏省	2017	562.47	5.3	畜禽养殖占 37.7%; 氮肥施用占 44.4%	本研究
江苏省	2014	729.8	4.4	畜禽养殖占 29.48%; 氮肥施用占 58.7%	[3]
河南省	2013	1 035.3	6.4	畜禽养殖占 56%; 氮肥施用占 29%	[7]
西安市	2013	47.17	4.57	畜禽养殖占 43.6%; 氮肥施用占 37.1%	[12]
南通市	2009	60.02	6.6	畜禽养殖占 52.5%; 氮肥施用占 39%	[13]
南京市	2013	25.79	3.9	畜禽养殖占 42.96%; 氮肥施用 25.98%	[47]

2.5 不确定性分析

排放清单估算分析过程中有许多不确定性来源会影响清单估算结果,主要原因包括排放源活动水平的可靠性和排放源氨排放因子的准确性^[48].本研究中采用的活动水平数据来自政府部门的统计资料,能够较好地保证数据的可靠性,但由于部分排放源缺乏所研究年份的数据,或者只有江苏省的总量,需根据其他数据折算,按照一定比例进行估算,使得估算结果存在不确定性.同时,排放因子的选取也会影响估算结果,而本研究在测算畜禽养殖的排放量时,区分了集约化养殖和散养,一定程度上提高了计算氨排放量的准确性,其他排放源的排放因子参考文献[15].总体而言,本清单采用的活动水平数据可靠;排放因子参考文献[15],不确定性最小;并且排放源较全面.对比不同学者研究结果,本研究估算的江苏省人为源氨排放量具有可比性,建立的排放清单存在一定合理性,能在一定程度上反映江苏省人为源氨的实际排放情况.

3 结论

- (1)利用排放因子法,计算得 2013~2017 年江苏省氨排放总量逐年下降,年均减少率约为 2.6%.2013 年~2017 年江苏省人为氨源排放强度由 5.9 t·km⁻²下降至 5.3 t·km⁻².
- (2)2017 年江苏省氨排放的主要来源是农业源.非农业源中的人体排放、废弃物处理、生物质燃烧的排放量较大.在畜禽养殖源中,蛋鸡是最大的排放源,其次是肉鸡和羊.
- (3)盐城市和徐州市是 2017 年江苏省人为源氨排放量最大的两个城市,排放最小的城市为镇江市.在排放强度方面,徐州市最大,镇江市最小.

参考文献:

[1] Galloway J N, Dianwu Z, Thomson V E, *et al.* Nitrogen mobilization in the United States of America and the People's Republic of China [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30** (10-11): 1551-1561.

[2] Battye W, Aneja V P, Roelle P A. Evaluation and improvement of ammonia emissions inventories[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(27): 3873-3883.

[3] 沈丽, 于兴娜, 项磊. 2006~2014 年江苏省氨排放清单[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(1): 26-34.

Shen L, Yu X N, Xiang L. Estimation of ammonia emissions inventories in Jiangsu province from 2006 to 2014 [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(1): 26-34.

[4] Sutton M A, Dragosits U, Tang Y S, *et al.* Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(6): 855-869.

[5] 孙庆瑞, 王美蓉. 我国氨的排放量和时空分布[J]. *大气科学*, 1997, **21**(5): 590-598.

Sun Q R, Wang M R. Ammonia emission and concentration in the atmosphere over China [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, **21**(5): 590-598.

[6] 王文兴, 卢筱凤, 庞燕波, 等. 中国氨的排放强度地理分布[J]. *环境科学学报*, 1997, **17**(1): 2-7.

Wang W X, Lu X F, Pang Y B, *et al.* Geographical distribution of NH₃ emission intensities in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, **17**(1): 2-7.

[7] 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 等. 河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1023-1030.

Wang C, Yin S S, Yu S J, *et al.* A 2013-based atmospheric ammonia emission inventory and its characteristic of spatial distribution in Henan Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1023-1030.

[8] 董艳强, 陈长虹, 黄成, 等. 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*, 2009, **29**(8): 1611-1617.

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

[9] 尹沙沙, 郑君瑜, 张礼俊, 等. 珠江三角洲人为氨源排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1146-1151.

Yin S S, Zheng J Y, Zhang L J, *et al.* Anthropogenic ammonia emission inventory and characteristics in the Pearl River Delta

- Region[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(5): 1146-1151.
- [10] 尹沙沙. 珠江三角洲人为源氨排放清单及其对颗粒物形成贡献的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [11] 周静, 刘松华, 谭译, 等. 苏州市人为源氨排放清单及其分布特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(8): 1137-1144.
- Zhou J, Liu S H, Tan Y, *et al.* Anthropogenic ammonia emission inventory and its spatial distribution in Suzhou City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(8): 1137-1144.
- [12] 苏航, 闫东杰, 黄学敏, 等. 西安市人为源大气氨排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4117-4123.
- Su H, Yan D J, Huang X M, *et al.* Inventory and characteristics of anthropogenic ammonia emission in Xi'an[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4117-4123.
- [13] 王平. 南通市人为源大气氨排放清单及特征[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(11): 25-28.
- Wang P. Estimation on anthropogenic emissions of ammonia in Nantong[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, **37**(11): 25-28.
- [14] Kang Y M, Liu M X, Song Y, *et al.* High-resolution ammonia emissions inventories in China from 1980 to 2012 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(4): 2043-2058.
- [15] 环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578.pdf>, 2014-08-19.
- [16] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [17] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [18] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [19] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [20] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [21] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [22] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [23] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [24] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [25] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [31] Buijsman E, Maas H F M, Asman W A H. Anthropogenic NH₃ emissions in Europe[J]. *Atmospheric Environment*, 1987, **21**(5): 1009-1022.
- [32] Ryden J C, Whitehead D C, Lockyer D R, *et al.* Ammonia emission from grassland and livestock production systems in the UK[J]. *Environmental Pollution*, 1987, **48**(3): 173-184.
- [33] 杨志鹏. 基于物质流方法的中国畜牧业氨排放估算及区域比较研究[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [34] 刘波, 童仪, 李安, 等. 长江三角洲地区畜禽养殖业氨排放清单研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, **34**(11): 1042-1049.
- Liu B, Tong Y, Li A, *et al.* Study on ammonia emission inventory of livestock over Yangtze River Delta[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, **34**(11): 1042-1049.
- [35] 沈兴玲. 广东省高分辨率人为源氨排放清单建立及控制成效研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [36] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. *土壤*, 2006, **38**(3): 263-269.
- Deng M H, Yin B, Zhang S L, *et al.* Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soils*, 2006, **38**(3): 263-269.
- [37] 邓明君, 罗文兵. 中国农业氨排放的时空演变趋势与减排潜力分析[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(9): 1257-1268.
- Deng M J, Luo W B. Space-time evolution of China's agricultural ammonia emission and emission reduction potential[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(9): 1257-1268.
- [38] 董文焯, 邢佳, 王书肖. 1994~2006 年中国人为源大气氨排放时空分布[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1457-1463.
- Dong W X, Xing J, Wang S X. Temporal and spatial distribution of anthropogenic ammonia emissions in China: 1994-2006[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1457-1463.
- [39] 车汶蔚. 珠江三角洲高时空分辨率机动车污染排放清单开发及控制对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [40] 车汶蔚, 郑君瑜, 钟流举. 珠江三角洲机动车污染物排放特征及分担率[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(4): 456-461.
- Che W W, Zheng J Y, Zhong L J. Vehicle exhaust emission characteristics and contributions in the Pearl River Delta Region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(4): 456-461.
- [41] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布[J]. *中国科技论文在线*, 2008, **3**(5): 329-333.
- Wang S X, Zhang C Y. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China[J]. *Sciencepaper Online*, 2008, **3**(5): 329-333.
- [42] 张鹤丰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [43] 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [44] 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [45] 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [46] 卜美东, 张田. 中国城市生活垃圾填埋气甲烷产量评估[J]. *可再生能源*, 2012, **30**(5): 89-94, 99.
- Bu M D, Zhang T. Assessment of methane production from domestic waste landfill in China[J]. *Renewable Energy Resources*, 2012, **30**(5): 89-94, 99.
- [47] 刘春蕾, 杨峰. 南京市 2013 年人为源大气氨排放清单及特征[J]. *安徽农业科学*, 2015, **43**(29): 263-266.
- Liu C L, Yang F. Nanjing anthropogenic ammonia emission inventory and its characteristics in 2013[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(29): 263-266.
- [48] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(4): 15-20.
- Zhong L J, Zheng J Y, Louie P, *et al.* Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: methodology and case study[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(4): 15-20.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)