

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

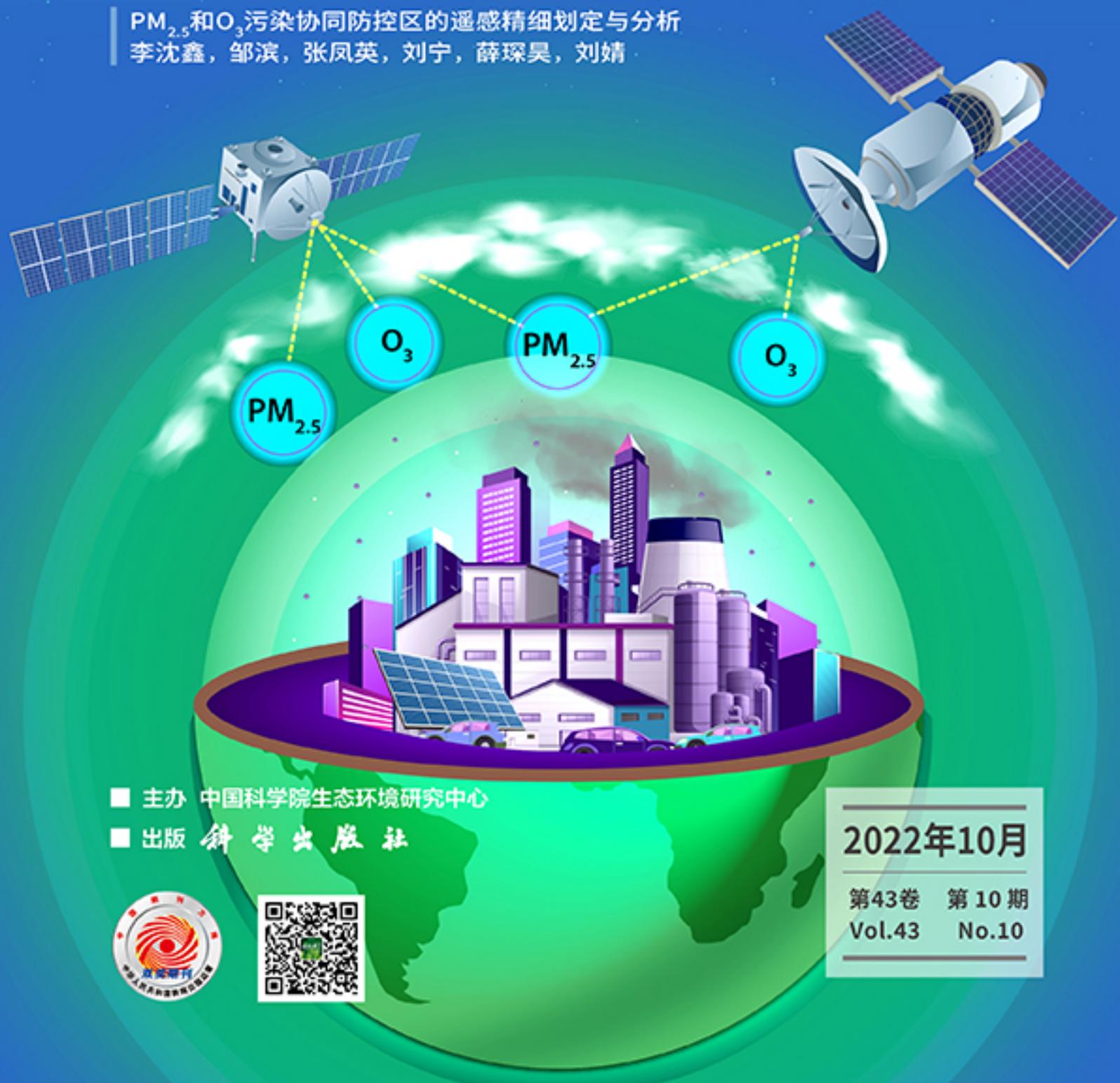
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 王雨吻, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞檀, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO₂/FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

浙江省 2008 ~ 2018 年人为源氨排放清单及分布特征

方利江¹, 杨一群², 叶观琼²

(1. 舟山市生态环境保护技术中心, 舟山 316000; 2. 浙江大学海洋学院, 舟山 316000)

摘要:以浙江省为研究区域,通过收集 11 个地级市各类氨排放的活动水平数据,采用排放因子法建立了 2008 ~ 2018 年浙江省人为源氨排放清单,并利用 ArcGIS 进行 1 km × 1 km 空间网格分配.结果表明,2008 ~ 2018 年浙江省人为源氨排放量总体呈现下降趋势,年均下降率约 3.97%;2018 年浙江省氨排放量为 108.52 kt,其中农业源为 90.02 kt,非农业源为 18.50 kt,排放强度为 1.03 t·km⁻²;杭州市、嘉兴市和温州市的氨排放量高于其他城市,分别占全省总量的 14.72%、11.86% 和 11.80%;空间分布特征显示,氨排放主要分布在浙江省北部区域,呈现出“北高南低”的排放趋势;不确定性分析表明,氨排放量模拟平均值为 108.37 kt,在 95% 置信区间的不确定度范围为 -5.40% ~ 5.60%.

关键词:浙江省;人为源;氨排放清单;年际变化;空间分布特征;不确定性分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4380-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112258

Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018

FANG Li-jiang¹, YANG Yi-qun², YE Guan-qiong²

(1. Zhoushan Ecology and Environment Protection Technical Center, Zhoushan 316000, China; 2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316000, China)

Abstract: As ammonia is the main component of PM_{2.5}, long time series of ammonia emission characteristics are an important basis for studying the historical causes of PM_{2.5} pollution. In this study, the activity data of various anthropogenic ammonia emissions from 11 cities were collected in Zhejiang. The anthropogenic ammonia emissions inventory in Zhejiang was established using emission factors, and then a 1 km × 1 km spatial grid distribution was carried out using ArcGIS software. The results showed that from 2008 to 2018, the ammonia emissions from anthropogenic sources in Zhejiang exhibited a downward trend, with an average annual decline rate of approximately 3.97%. The ammonia emissions were 108.52 kt in 2018, and the emission intensity was 1.03 t·km⁻², in which there was 90.02 kt from agricultural sources and 18.50 kt from non-agricultural sources. The ammonia emissions of Hangzhou, Jiaxing, and Wenzhou were higher than those of the other cities, accounting for 14.72%, 11.86%, and 11.80% of the total ammonia emissions, respectively. The spatial distribution characteristics showed that ammonia emissions were mainly distributed in the northern part of Zhejiang, showing an emission trend of “high in the north and low in the south.” Uncertainty analysis showed that the simulated average value of ammonia emissions was 108.37 kt, and the uncertainty range in the 95% confidence interval was -5.40% - 5.60%.

Key words: Zhejiang Province; anthropogenic sources; ammonia emissions inventory; interannual variation; spatial distribution characteristics; uncertainty analysis

氨(NH₃)是大气中唯一的天然碱性气体和第三高含量的含氮化合物^[1],气态氨浓度的增加会严重影响区域空气质量、人类健康和生态系统的氮循环^[2].排放到大气中的 NH₃ 可以与二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)等酸性物质经化学反应转化为硝酸铵(NH₄NO₃)、硫酸铵[(NH₄)₂SO₄]、硫酸氢铵(NH₄HSO₄)和氯化铵(NH₄Cl)等铵盐,成为 PM_{2.5}的重要组成部分,是造成大气 PM_{2.5}污染的重要排放来源^[3].形成的铵盐可以远距离传送到较远地方,通过干湿沉降返回土壤或水体中,导致土壤酸化和水体富营养化甚至生物多样性下降,从而引起区域性大气环境污染问题^[4,5].有研究表明,1990 ~ 2013 年间,全球氨排放对 PM_{2.5} 贡献率从 25% 增加到 32%^[6].在美国约有 47% 的 PM_{2.5} 由铵盐贡献^[7],在中国约占 29.8%^[8],在欧洲为 30%^[9].如果 NH₃ 排放减少 50%,将导致铵盐减少 22%,硝酸盐减少 39%,PM_{2.5} 总量则减少 15%^[10].

近年来,随着对气溶胶污染形成和作用机制研究的不断深入,国内学者对氨排放越发关注,建立了

国家级、区域级和省市级等不同尺度的氨排放清单. Fu 等^[11]估算了 1980 ~ 2016 年中国的氨排放量,从 4.7 Tg·a⁻¹ 增长到 11 Tg·a⁻¹. Yu^[12]建立了长三角地区 2006 ~ 2014 年的氨排放清单,排放量范围在 981.65 ~ 1 014.30 kt. 王琛等^[13]认为河南省 2013 年的氨排放量为 1 035.3 kt,排放强度为 6.4 t·km⁻².全面掌握氨排放清单和空间分布规律,有助于了解氨排放对当地气溶胶污染的影响,是阐明区域性复合型空气污染问题的关键.

浙江省位于中国东部沿海,是国家确定的蓝天保卫战重点区域之一,尽管在“十三五”期间,通过实施“打赢蓝天保卫战三年行动计划”等系列措施,大气污染防治攻坚战取得了阶段性胜利,2020 年设区市 ρ(PM_{2.5}) 平均值为 25 μg·m⁻³,比 2015 年降低 43.2%^[14],但以 PM_{2.5} 为代表的大气复合型污染天

收稿日期: 2021-12-26; 修订日期: 2022-03-03

基金项目: 生态环境部中央专项资金项目(H2019330999Q-00001, H2019330999Q-00002)

作者简介: 方利江(1986 ~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为大气污染物排放清单构建, E-mail: fljiang@yeah.net

气仍时有发生,“十四五”时期进一步改善环境空气质量,实现全省“全面消除重污染天气,基本消除中度污染天气”的目标依旧面临较大压力.目前,浙江省的氨排放清单已有相关研究成果^[15,16],但缺乏长时间序列和较全面排放源的评估计算.本文采用“自下而上”的评估方法,建立了 2008 ~ 2018 年浙江省人为源氨排放清单,并首次计算了以港口船舶为典型代表的非道路移动源氨排放量,研究结果对解析浙江省大气污染的历史成因、溯源和作用机制等具有积极意义,也可为浙江省大气污染治理和空气质量管理决策提供有力的数据支持和科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域与对象

研究区域为浙江省,包括杭州市、宁波市、温州市、嘉兴市、湖州市、绍兴市、金华市、衢州市、舟山市、台州市和丽水市等 11 个地级市.估算的人为源包括农业源和非农业源共计 11 种排放源.其中,农业源包括畜禽养殖、氮肥施用、土壤本底、固氮植物和生物质燃烧;非农业源包括人体排放、工业生产、废物处理、燃料燃烧、道路移动源和非道路移动源.

1.2 估算方法和数据来源

以地级市为基础单元,对浙江省各排放源的氨排放量进行估算^[17],计算公式如下:

$$E_{i,j} = \sum A_{i,j} \cdot EF_{i,j} \cdot \gamma$$

式中, E 为排放量; i 和 j 分别为地区和排放源; A 为活动水平; EF 为排放因子; γ 为氮-大气氨转换系数,畜禽养殖取值 1.214,其他行业取值 1.0.

文中所涉及的活动水平数据来自政府官方统计

资料,其中畜禽养殖、固氮植物、人体排放、工业生产、道路移动源和非道路移动源的活动水平取自各地市统计年鉴,氮肥施用、土壤本底、生物质燃烧、废物处理的活动水平取自文献^[18],燃料燃烧的活动水平取自文献^[19],氨排放因子除个别单独注释引用外,其余均取自文献^[17].

1.2.1 畜禽养殖

畜禽养殖排放的氨主要由动物排泄物所释放,是大气 NH_3 排放的重要来源之一,约占总排放量的 47.5% ~ 58%^[20,21].粪便管理包括户外、圈内、粪便存储处理和后续施肥共 4 个阶段,各阶段的总铵态氮量依据文献^[17]进行计算.根据浙江省养殖情况,养殖方式主要分为散养和集约化,畜禽种类主要以常见的饲养品种为计算口径,分为:母猪、生猪、奶牛、肉牛、绵羊、肉羊、兔、肉兔、蛋鸡、蛋鸭、肉鸡、肉鸭和肉鹅这 13 类.对于饲养周期大于 1 a 的畜禽,以“年末存栏数”作为活动水平;饲养周期小于 1 a 的畜禽,以“年内出栏数”作为活动水平.散养时畜禽排泄物在室内户外各占 50%,集约化养殖条件下畜禽排泄物在室内户外分别占 100% 和 0^[17].猪、牛、家禽和羊的非集约化比例分别为 10%、5%、5% 和 50%^[22],考虑兔的养殖环境和养殖方式与家禽相似,其非集约化比例以 5% 计.因文献^[17]未明确兔类在不同排泄物管理阶段和不同粪便形态下的排放系数,因此兔和肉兔的氨排放因子参考 GAINS 模型^[23],通过物质流循环的畜禽排放计算方法获得其氨排放因子分别为 $0.58 \text{ kg} \cdot (\text{d} \cdot \text{只})^{-1}$ 和 $0.24 \text{ kg} \cdot (\text{d} \cdot \text{只})^{-1}$.浙江省家禽饲养类别中,鸡、鸭和鹅分别约占 58%、32% 和 4%,蛋鸭和蛋鸡存栏比为 6:4^[24].单位畜禽排泄量、含氮量和铵态氮比例见表 1.

表 1 畜禽粪便排泄物铵态氮量的估算参数¹⁾

Table 1 Parameters used in estimating annual TAN excretion per animal for each livestock class

畜禽种类	饲养周期 /d	排泄量/ $\text{kg} \cdot (\text{d} \cdot \text{头})^{-1}$		含氮量/%		铵态氮比例 /%	粪便用作 饲料比重
		尿液	粪便	尿液	粪便		
母猪	365	5.7	2.1	0.4	0.34	70	30
生猪	180	3.2	1.5	0.4	0.34	70	30
奶牛	365	19	40	0.9	0.38	60	20
肉牛	365	10	20	0.9	0.38	60	20
绵羊	365	0.75	2.6	1.35	0.75	50	20
肉羊	365	0.66	1.5	1.35	0.75	60	20
兔	365	0.3	0.15	0.15	1.72	60	0
肉兔	150	0.3	0.15	0.15	1.72	60	0
蛋鸡	365	0	0.12	0	1.63	70	50
蛋鸭	365	0	0.13	0	1.1	70	0
肉鸡	50	0	0.09	0	1.63	70	50
肉鸭	55	0	0.1	0	1.1	70	0
肉鹅	70	0	0.1	0	0.55	70	0

1) 兔和肉兔的参数引自文献^[25],其余引自文献^[17]; 畜禽种类中的“兔”指统计年鉴中“年末存栏”兔

1.2.2 氮肥施用

氮肥施用后会发生一系列物理化学反应,以气态氨的形式从土壤挥发到大气造成很大的氮亏损,成为大气氨的第二个重要来源^[26].浙江省在农用化肥方面施用的种类为氮肥、磷肥、钾肥和复合肥,涉及氨排放的主要为氮肥和复合肥.为进一步提高清单精度,实现排放因子本地化,从文献^[27]中“各地区农作物化肥投入情况”获悉,浙江省施用氮肥和复合肥的农作物主要为稻谷(包括早籼稻、粳稻、晚籼稻)和油菜籽,施用的氮肥种类主要包括尿素、碳铵和其他氮肥;复合肥主要包括二铵和三元素复合肥.

根据各地市氮肥和复合肥施用量,并结合文献^[27]中农作物不同氮肥的每亩折纯用量及其年种植面积,计算出研究期历年氮肥和复合肥各成分的施用比例,结果如表2所示.浙江省土壤类型以酸性为主,因此采用校正后的本地化排放因子,尿素、碳铵、其他氮肥和二铵、三元素复合肥的排放因子分别为38.8、27.5、1.8和3.2、7.4 kg·t⁻¹^[15],其中二铵和三元素复合肥的氮挥发率与硝铵和硫铵相差较小^[28],排放因子分别引用文献^[15]中的硝铵和硫铵.

表2 浙江省历年不同化肥施用份额/%
Table 2 Different fertilizer application shares
in Zhejiang province over the years/%

年份	尿素	碳铵	其他氮肥	二铵	三元素复合肥
2008	74.89	24.72	0.39	71.89	0
2009	79.31	20.44	0.25	0	36.76
2010	79.17	20.64	0.19	0	69.71
2011	80.11	19.89	0	0	73.19
2012	80.12	19.88	0	0	73.51
2013	82.48	17.52	0	0.26	71.97
2014	86.05	13.95	0	0.93	64.96
2015	87.29	12.71	0	0.05	67.28
2016	91.73	8.27	0	0	74.34
2017	90.54	9.46	0	0	81.08
2018	95.02	4.98	0	0	87.57

1.2.3 土壤本底

土壤中的生物参与有机物分解排泄出氨或易于水解成氨的氮类化合物,产生一定量的氨挥发^[29].选用各地市耕地面积作为活动水平,排放因子为180 kg·km⁻².

1.2.4 固氮植物

浙江省广泛种植的固氮作物主要包括大豆、花生和绿肥这3类,选用播种面积作为活动水平.排放因子分别为105、120和135 kg·km⁻².

1.2.5 人体排放

人体主要通过排泄物排放氨,排放量与人口数

量和处理条件密切相关^[30].考虑到农村地区卫生处理设施存在不完善,以各地市统计年鉴中的农村人口数量和农村卫生厕所普及率作为活动水平,排放因子取值0.787 kg·人⁻¹.

1.2.6 生物质燃烧

生物质燃烧包含秸秆灶膛燃烧、薪柴燃烧、秸秆露天焚烧(田间堆肥)、草原火灾和森林火灾.考虑浙江省的地形地貌及植被类型,氨排放不涉及草原火灾.自2014年以来,浙江省大力推进秸秆“五化”利用,杜绝露天焚烧,至2016年浙江省秸秆年综合利用率达92%^[31],由此将秸秆处置利用划分为两个阶段,分别为露天焚烧和田间堆肥.

(1)2008~2015年,主要估算秸秆露天焚烧量,计算公式如下:

$$E_{i,j} = \sum P_{i,j} \cdot N_j \cdot F \cdot B_j \cdot R \cdot EF_j$$

式中, E 为秸秆露天焚烧的氨排放量; i 和 j 分别为地区和农作物种类; P 为农作物产量; N 为谷草比; B 为秸秆干燥比; F 为秸秆露天焚烧的燃烧率; R 为农作物露天焚烧比例; EF 为秸秆露天焚烧的氨排放因子.相关计算参数见表3.

(2)2016~2018年,主要估算秸秆田间堆肥量,计算公式如下:

$$E_{i,j} = \sum P_{i,j} \cdot N_j \cdot R \cdot EF_j$$

式中, E 为秸秆田间堆肥的氨排放量; P 为农作物产量; N 为谷草比; R 为秸秆堆肥比例,取值6.40%^[32]; EF 为秸秆堆肥的氨排放因子,取值为0.32 kg·t⁻¹.

(3)森林火灾的生物质燃烧量,计算公式如下:

$$E_i = \sum A_i \cdot B \cdot \eta \cdot EF$$

式中, E 为森林火灾的氨排放量; A 为森林火灾受害面积; B 为森林的平均地上生物量,取值为221.94 t·hm⁻²^[33]; η 为森林的燃烧效率,取值为0.33^[34]; EF 为森林火灾的氨排放因子,取值为2.9 g·kg⁻¹^[33].

1.2.7 工业生产

氮肥生产和合成氨是主要的工业氨排放行业.根据全国排污许可证管理信息平台(<http://permit.mee.gov.cn/>)中的氮肥生产和合成氨企业情况,明确全省工业过程氨排放源分布.合成氨排放因子为0.01 kg·t⁻¹,氮肥生产为5.0 kg·t⁻¹.

1.2.8 废物处理

废物处理主要分为污水处理、垃圾填埋、垃圾焚烧、垃圾堆肥和烟气脱硝等.由火力发电、钢铁、水泥等工业企业生产过程中燃煤消耗引起的烟气脱硝设施的氨排放量已包含在“燃料燃烧”的工业源

表 3 秸秆露天焚烧氨排放的估算参数^[28,31,35]

Table 3 Parameters used for emission estimation from straw burning

农作物	谷草比(N)	干燥比(B)	秸秆焚烧比例(R)/%	排放因子(EF)	燃烧率(F)
水稻	0.9	0.89	25.90	0.78	0.93
小麦	1.1	0.89	31.40	0.37	0.92
玉米	1.2	0.87	33.70	0.68	0.92
豆类	1.6	1.6	31.90	0.53	0.68
薯类	0.5	0.45	31.90	0.53	0.68
棉花	9.2	0.83	36.60	0.78	0.804
花生	0.8	0.94	31.90	0.53	0.82
油菜	1.5	0.83	31.90	0.78	0.804

中,因此未予重复计算. 氨排放因子分别为污水($0.003 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)、填埋($0.56 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$)、堆肥($1.275 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$)和焚烧($0.21 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$).

1.2.9 燃料燃烧

燃料燃烧主要为工业和生活消耗的煤炭、油品和天然气等燃烧而产生的氨排放. 根据文献[19]中“浙江能源平衡表”获取上述3种燃料的工业和生活消耗量,其中工业燃料消耗量包括终端消费量和用于加工转换其他能源的消费量,生活燃料消耗量只涉及终端消费量. 由于各地市统计年鉴对煤炭、油品和天然气等能源消耗数据较为有限,只统计了规模以上企业,无法反映全行业全领域能源消耗水平,因此各地市工业燃料消耗量通过全省活动水平数据,结合文献[36]中“各市国民经济主要指标”的“各市工业生产总值”按占全省比例进行折算. 各地市生活燃料消耗量根据其年末常住人口数占全省比例进行折算. 燃料燃烧的氨排放因子如表4.

表 4 燃料燃烧源氨排放因子^[37]

Table 4 Ammonia emission factors from fuel combustion sources

燃料类型	燃煤 / $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	燃油 / $\text{kg}\cdot(10^3 \text{ L})^{-1}$	天然气 / $\text{kg}\cdot(10^6 \text{ m}^3)^{-1}$
工业消耗	0.014	0.096	51.259
生活消耗	0.820	0.120	320.370

1.2.10 道路移动源

机动车排放的氨由尾气催化净化装置将氮氧化物转化为 N_2 和 O_2 过程中的二次产物产生^[38]. 相比于人为源的氨排放总量,机动车产生的氨排放虽然相对较小,但随着经济发展和机动车保有量的逐年攀升,机动车尾气的氨排放较其他排放源呈现更为明显的增长趋势. 机动车流量与 NH_3 浓度的日变化特征相似,对 NH_3 早高峰的贡献率可达40%^[39]. 本文将机动车分为大型客车、小型客车、大型货车、小型货车和摩托车这5大类,历年保有量由各地市统计年鉴获得. 排放因子和年均行驶里程见表5.

表 5 各车型年均行驶里程和排放因子^[40]

Table 5 Annual average mileages for various types of vehicles and emission factors

机动车类型	大型客车	小型客车	大型货车	小型货车	摩托车
年均行驶里程 $\times 10^4/\text{km}$	4.00	2.59	4.40	3.23	0.99
排放因子/ $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$	28.00	26.00	17.00	4.00	7.00

1.2.11 非道路移动源

非道路移动源包括工程机械、农业机械、小型通用机械、柴油发电机组、船舶、铁路内燃机车和飞机等. 考虑到浙江省作为海洋大省,海洋和内陆港口较为发达,拥有宁波舟山港、嘉兴港、温州港和台州港,以及体现与海洋港口联动发展的义乌国际陆港、湖州港、金华兰溪港、衢州港和丽水青田港等内河(陆)港,因此本文主要将沿海和内河船舶的氨排放量作为非道路移动源的典型,其他形式的非道路移动源由于机械保有量较小,日常使用频率较低,其氨排放量较小,暂不予以估算.

对于内河和沿海船舶氨排放量,基于燃油消耗量计算,计算公式如下:

$$E_i = \sum (Y_i \times \text{EF}) \times 10^{-6}$$

$$Y = (0.065 \times Z_{\text{客}} + Z_{\text{货}}) \times \text{YX}$$

式中, E 为船舶的氨排放量; Y 为船舶燃油消耗量; EF 为船舶的氨排放因子,货船取值为 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[41],客船取值为 $4.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[42]; $Z_{\text{客}}$ 为船舶客运周转量; $Z_{\text{货}}$ 为船舶货物周转量; YX 为船舶油耗系数,推荐取 50 ^[43].

2 结果与讨论

2.1 浙江省氨排放年际变化趋势

根据上述研究方法和活动水平数据,计算获得2008~2018年浙江省人为源氨排放量的年际变化趋势和各排放源贡献率,如表6和图1所示. 可以看出,氨排放量总体呈下降趋势,从2008年的 162.74 kt 下降到2018年的 108.52 kt ,年均下降

率约 3.97%。其中, 2008 ~ 2012 年间氨排放量比较稳定, 年均值为 165.97 kt, 介于 162.74 ~ 166.58 kt; 2013 ~ 2018 年间则逐年明显下降, 年均下降率 6.89%, 最大年下降率 9.52%, 出现在 2014 年。农业源是氨排放的主导因素, 约占历年氨排放总量的 82.96% ~ 91.22%, 从 2008 年的 148.20 kt 下降到 2018 年的 90.02 kt, 其中畜禽养殖由 117.72 kt 下降至 67.43 kt, 年均下降率 5.42%, 占氨排放总量 62.14% ~ 73.74%, 氮肥施用由 19.68 kt 下降至 16.84 kt, 占氨排放总量 11.85% ~ 15.52%。非农业源的氨排放量波动较小, 介于 14.54 ~ 18.50 kt。废物处理、道路移动源因污水和垃圾无害化处理能力提升及民用车辆保有量提高, 氨排放量逐年上升, 分别从 2.96 kt 增

长至 5.11 kt 和 2.43 kt 增长至 9.86 kt。人体排放由 4.91 kt 减少至 0.10 kt, 这与农村卫生厕所普及率的大幅度提高有关, 从 2008 年的 83.75% 提高至 2018 年的 99.65%。非道路移动源的贡献最小, 介于 1.31 ~ 3.55 t, 可见船舶氨排放量在各类排放源中影响很小。2014 年是人为源氨排放量明显下降的转折年, 较 2013 年下降 14.96 kt, 其中畜禽养殖下降了 14.15 kt, 分析原因主要是 2013 年底, 浙江省作出了“五水共治”的决策部署, 打响畜禽养殖污染治理攻坚战, 在 2014 年, 全省有畜牧业的 87 个县(市、区)全部重新调整划定禁、限养区, 关停搬迁禁、限养区养殖场 7.46 万个, 对年存栏 50 头以上规模畜禽养殖场开展污染治理, 因此导致畜禽养殖氨排放量明显减少。

表 6 2008 ~ 2018 年浙江省各排放源氨排放量清单/t

Table 6 Ammonia emission inventory of various sources in Zhejiang province from 2008 to 2018/t

氨排放源	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
氮肥施用	19 684.89	19 992.82	20 170.16	20 001.82	19 918.30	19 818.75	18 899.64	18 494.00	18 052.06	17 618.12	16 837.28
畜禽养殖	117 722.99	120 949.99	121 922.87	124 450.51	122 517.97	112 475.62	98 322.50	88 687.39	81 821.65	72 469.87	67 431.32
土壤本底	3 457.54	3 576.03	3 540.02	3 575.62	3 362.27	3 602.36	3 557.88	3 560.18	3 554.36	3 558.67	3 562.75
固氮作物	243.62	236.60	229.24	225.67	227.54	226.04	184.47	181.71	176.27	168.83	154.84
人体排放	4 907.39	4 123.91	3 415.13	3 005.01	2 622.16	2 138.21	1 620.68	1 067.82	635.67	406.00	103.44
生物质燃烧	7 094.76	5 984.30	5 600.94	5 569.57	5 243.29	5 062.39	4 481.33	3 471.33	2 495.43	2 756.53	2 034.77
工业生产	2 013.37	1 986.27	1 457.90	1 326.46	1 395.44	1 516.41	1 580.28	1 742.33	1 354.15	879.55	833.49
废物处理	2 964.03	3 647.57	3 751.97	3 865.33	3 842.17	4 000.72	4 199.28	4 705.12	5 112.26	5 555.05	5 110.83
燃料燃烧	2 228.84	2 219.11	2 266.29	2 351.56	2 324.59	2 246.30	2 576.18	2 819.15	2 699.15	2 564.01	2 584.56
道路移动源	2 425.02	2 992.33	3 689.59	4 391.97	5 122.16	5 962.00	6 670.17	7 391.35	8 145.93	9 056.12	9 859.29
非道路移动源	1.31	1.37	1.76	2.14	2.29	2.39	2.42	2.59	2.70	3.05	3.55
氨排放总量	162 743.75	165 710.30	166 045.86	168 765.66	166 578.15	157 051.19	142 094.84	132 122.97	124 049.64	115 035.80	108 516.11

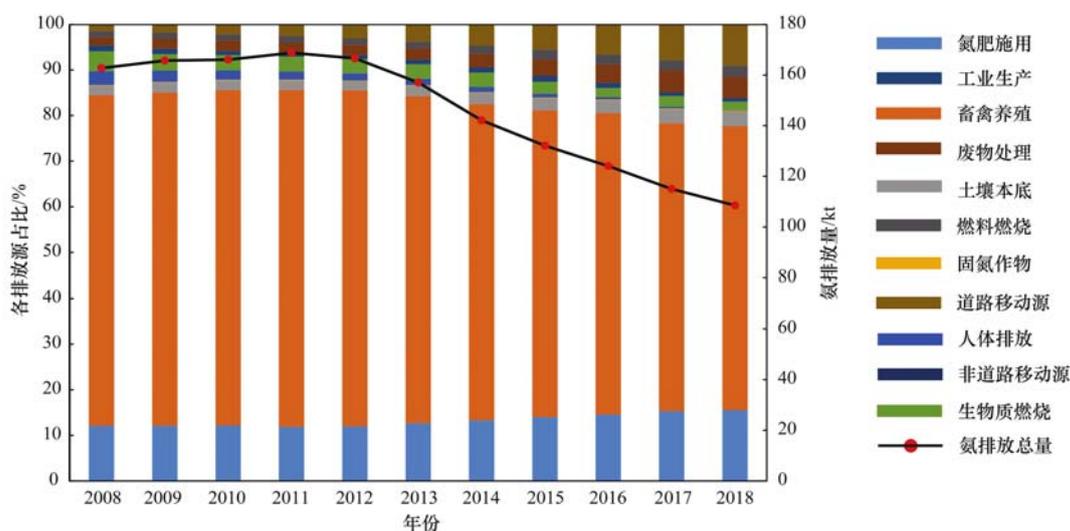


图 1 2008 ~ 2018 年浙江省氨排放量变化趋势及各排放源氨排放贡献率

Fig. 1 Trend of ammonia emissions and contribution for different sources in Zhejiang province from 2008 to 2018

2.2 浙江省各地市氨排放年际变化趋势

图 2 描述了 2008 ~ 2018 年各地市氨排放量变化趋势。结果表明, 各地市氨排放量呈现先稳定后下降的趋势, 2014 年受政府治水治污政策影响, 氨排

放量明显下降。杭州市和嘉兴市是浙江省历年氨排放量最大的地市, 年平均氨排放量分别为 20.18 kt 和 19.45 kt。嘉兴市从 2008 年的 25.08 kt 下降到 2018 年的 12.87 kt, 在 2012 ~ 2016 年呈现急剧下降

态势,年均下降率达 15.29%,主要是由于在此期间大量“散乱污”畜禽养殖场关闭,畜禽养殖规模快速减小,年末生猪存栏数从 2012 年的 273.10 万头下降至 2016 年的 18.34 万头,畜禽养殖氨排放量由 20.09 kt 下降到 8.17 kt. 杭州市氨排放量表现为先升后降趋势,从 2008 年的 20.82 kt 上升至 2013 年

的 23.07 kt,随后又逐渐下降至 2018 年的 15.98 kt,引起这一波动主要为畜禽养殖排放源的变化. 丽水市和舟山市氨排放量较小且较为稳定,分别介于 5.75 ~ 9.29 kt 和 0.70 ~ 1.40 kt. 宁波市、温州市、湖州市、绍兴市、金华市、衢州市和台州市氨排放量较为接近,年平均值在 11.72 ~ 15.52 kt.

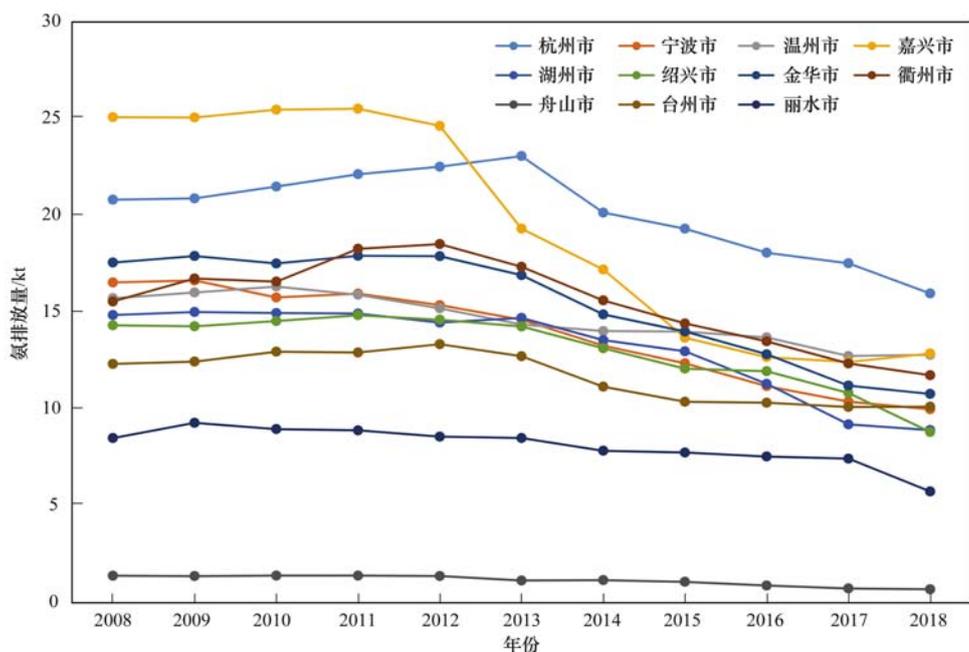


图 2 2008 ~ 2018 年浙江省不同地市氨排放量变化趋势

Fig. 2 Trends of ammonia emissions for different cities in Zhejiang province from 2008 to 2018

2.3 2018 年浙江省及各地市氨排放特征

2018 年浙江省氨排放清单和排放强度如表 7 和图 3 所示. 全年氨排放量为 108.52 kt, 其中农业源氨排放量为 90.02 kt, 非农业源为 18.50 kt, 分别占氨排放总量的 82.96% 和 17.04%. 农业源中的畜禽养殖、氮肥施用为最大贡献源, 氨排放量为 67.43 kt 和 16.84 kt, 分别占氨排放总量的 62.14% 和 15.52%, 两者共占农业源 93.61%. 非农业源中的道路移动源是第三大贡献源, 氨排放量为 9.86 kt, 占比 9.09%, 其中客车氨排放量为 9.35 kt、货车为 0.36 kt、摩托车为 0.15 kt. 由于现有民用车辆以燃油为主, 机动车尾气排放较大, 因此大力发展新能源汽车替代燃油大小型客车, 对氨减排具有重要意义. 废物处理是非农业源氨排放的另一个重要来源, 占比 4.71%. 非道路移动源的氨排放量相较其他排放源最小, 仅为 3.55 t, 集中在舟山市和宁波市, 分别为 1.33 t 和 1.25 t.

从各地市氨排放情况看, 杭州市、嘉兴市和温州市高于其他城市, 分别占全省氨排放总量 14.72%、11.86% 和 11.80%. 舟山市受土地面积制约且多为海岛地形, 各种产业规模较小, 其氨排放量为全省最小(0.70 kt), 仅占 0.64%. 农业源是主要

贡献源, 占 71.31% ~ 93.88%. 畜禽养殖氨排放最大的是杭州市和衢州市, 分别为 9.69 kt 和 9.34 kt, 主要是由于生猪年内出栏数较大所致, 分别达 219.23 万头和 176.58 万头. 杭州市的废物处理氨排放量居全省第一, 达 1.41 kt, 为宁波市的近 2 倍, 原因是在污水处理量接近情况下(分别为 $72\,987 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $63\,241 \times 10^4 \text{ m}^3$), 受不同垃圾填埋量所引起, 杭州市的垃圾填埋量是宁波市的近 10 倍, 分别为 $177.53 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $17.50 \times 10^4 \text{ t}$. 工业生产氨排放主要分布在杭州市、衢州市、绍兴市和金华市, 氨排放量分别达 481.66、189.70、95.37 和 66.00 t.

从氨排放强度看, 嘉兴市最高, 为 $3.05 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 其次为湖州市、衢州市、绍兴市和温州市, 分别为 1.53 、 1.33 、 1.07 和 $1.06 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 高于全省平均值 ($1.03 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$), 丽水市最低, 为 $0.33 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$. 各地市氨排放强度由氨排放总量和土地面积构成, 嘉兴市氨排放量居全省首位, 但其土地面积仅占全省 4.00%, 因此氨排放强度较大. 杭州市虽然具有较大的氨排放量, 但土地面积占全省 15.95%, 氨排放强度总体不大, 仅为 $0.95 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$. 丽水市氨排放量较小, 而土地面积最大, 占全省 16.35%, 氨排放强度最小 ($0.33 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$). 舟山市是全省土地面积最小的地

表 7 2018 年浙江省人为源氨排放清单/t

Table 7 Anthropogenic ammonia emission inventory in Zhejiang province in 2018/t

项目	农业源					非农业源						合计
	氮肥施用	畜禽养殖	土壤本底	固氮作物	生物质燃烧	人体排放	工业生产	废物处理	燃料燃烧	道路移动源	非道路移动源	
杭州市	1 610.28	9 690.52	375.84	18.60	259.19	0.00	481.66	1 408.97	465.75	1 666.25	0.06	15 977.11
宁波市	1 658.92	4 902.31	393.62	20.88	151.03	21.22	0.76	736.45	463.53	1 643.40	1.25	9 993.38
温州市	1 790.59	8 332.19	436.16	9.25	91.29	18.08	0.00	382.33	338.84	1 408.69	0.13	12 807.55
嘉兴市	2 844.55	8 098.35	369.71	10.65	143.32	0.83	0.00	293.93	243.65	869.38	0.08	12 874.44
湖州市	973.25	6 698.86	273.04	3.51	102.92	2.81	0.00	188.02	137.17	540.79	0.04	8 920.41
绍兴市	2 317.64	4 131.60	357.21	29.52	260.84	7.62	95.37	475.99	244.07	904.65	0.01	8 824.52
金华市	1 587.00	6 358.40	397.34	15.47	264.36	21.41	66.00	686.74	222.29	1 169.33	0.00	10 788.34
衢州市	1 218.63	9 338.71	255.57	16.54	205.56	4.73	189.70	186.46	85.65	252.39	0.00	11 753.93
舟山市	95.08	283.61	41.48	1.58	16.44	3.40	0.00	91.81	45.98	118.31	1.33	699.01
台州市	1 777.79	5 983.82	347.89	12.44	202.75	16.21	0.00	504.15	256.00	1 025.00	0.64	10 126.68
丽水市	963.56	3 612.95	314.88	16.41	337.08	7.14	0.00	155.99	81.64	261.10	0.00	5 750.74
浙江省	16 837.28	67 431.32	3 562.75	154.84	2 034.77	103.44	833.49	5 110.83	2 584.56	9 859.29	3.55	108 516.11

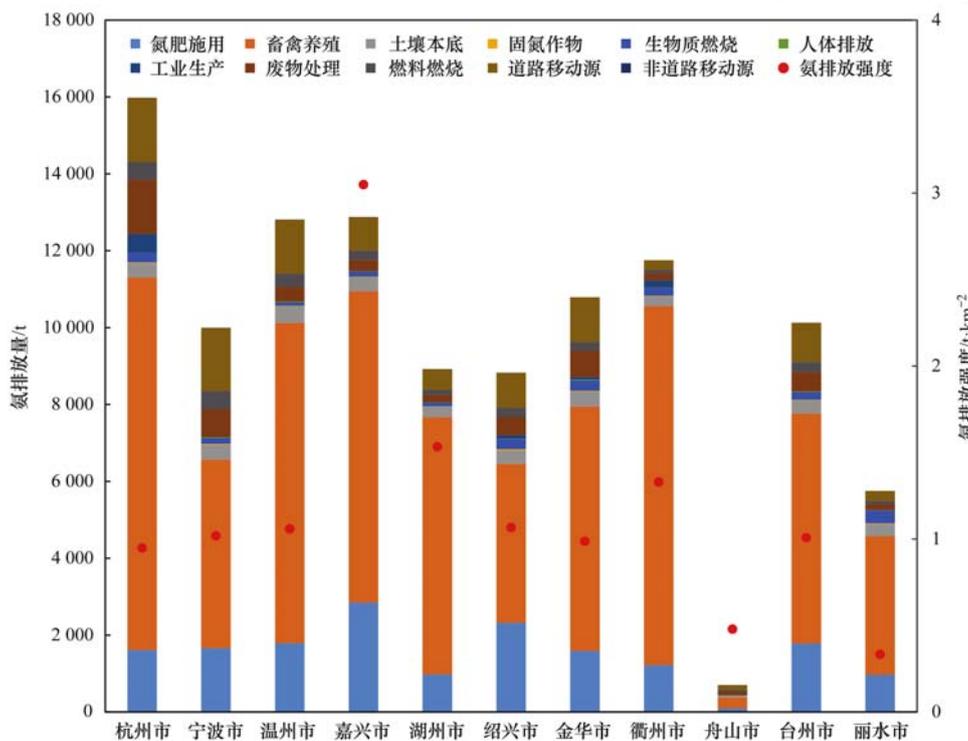


图 3 2018 年浙江省各地市各排放源氨排放量及氨排放强度

Fig. 3 Different ammonia emissions and emission intensities for each city in Zhejiang province in 2018

市,仅1 459 km²,氨排放强度较小(0.48 t·km⁻²).

2.4 2018 年主要贡献源氨排放特征

畜禽养殖是浙江省氨排放最大贡献源,在各地市的氨排放总量占比达到 40.57%~79.45%,随着全省粪污综合利用及处置率和规模化畜禽养殖场粪污处理设施配套比例要求的不断提高,畜禽养殖的氨减排存在较大空间,故本文针对不同畜禽种类的氨排放贡献作进一步分析,结果如图 4 所示.可见,禽类养殖是最大的畜禽养殖排放贡献源,氨排放量达 29.08 kt,占畜禽养殖氨排放总量 43.12%,其中蛋禽占比 33.79%,肉禽占比 9.33%.浙江省蛋禽养

殖数量较肉禽少,但由于蛋禽养殖周期以 365 d 计,长于肉禽的 50~70 d,因此蛋禽氨排放量较肉禽高.从养殖种类看,蛋鸭氨排放贡献率最大,占畜禽养殖氨排放总量 19.61%,其次为生猪(19.38%)、蛋鸡(14.18%)、肉牛(11.16%)、绵羊(9.99%)和肉羊(8.47%),共占畜禽养殖氨排放总量 82.79%,母猪、奶牛和兔类氨排放贡献率较低,均在 3% 以下.猪肉、牛肉和禽蛋是浙江省居民日常生活食用的必需品,具有较大的饲养规模,氨排放贡献也较高.相比肉羊,肉牛年内出栏数为 8.15 万头,远少于肉羊的 135.06 万头,但由于肉牛粪尿等排泄物的铵态氮

量 $[99.6 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{头})^{-1}]$ 远高于肉羊 $[12.10 \text{ g} \cdot (\text{d} \cdot \text{头})^{-1}]$, 因此肉牛仍具有较高的氨排放量. 在实现畜禽养殖氨减排途径方面, 宜推广应用低蛋白日粮及粪污密闭或覆盖贮存、种养结合与粪便深施等技术^[44], 同时合理控制猪、牛和羊等大牲畜的养殖规模, 实行宜养区以地定畜措施, 将对氨排放的有效减少发挥较大作用.

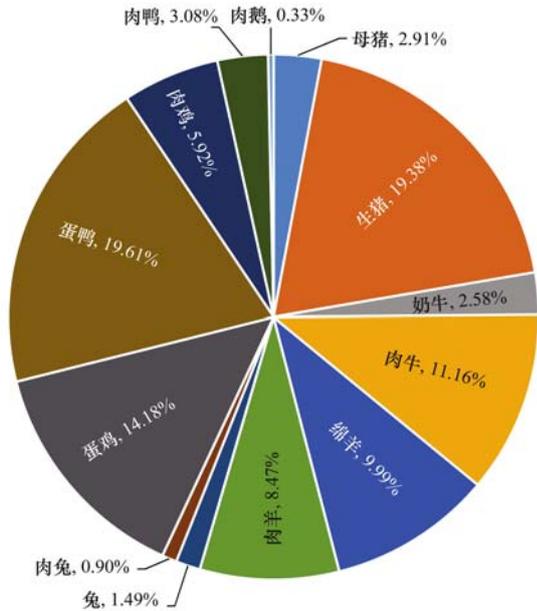


图 4 2018 年不同畜禽养殖种类氨排放贡献率

Fig. 4 Contribution of ammonia emissions from various types of livestock in Zhejiang province in 2018

氮肥施用是浙江省氨排放第二大贡献源, 在各地市的氨排放总量占比达到 10.08% ~ 26.26%, 图 5 为各地市不同氮肥类型的氨排放情况. 尿素是各地市氮肥施用的主要贡献源, 占氮肥氨排放总量的

82.59% ~ 94.33%, 施用量达 $38.15 \times 10^4 \text{ t}$. 碳铵贡献率最小, 占 3.05% ~ 3.50%, 主要是因为浙江省年均气温较高, 碳铵的分解挥发损失量比尿素大, 同时施肥过程中需深施等多种原因, 致使其施用范围较小, 施用量较低 ($1.99 \times 10^4 \text{ t}$). 嘉兴市和绍兴市因尿素产生的氨排放量最高, 分别为 2 683.23 t 和 2 101.10 t, 由三元素复合肥产生的氨排放最大的为宁波市和金华市, 分别为 238.05 t 和 236.45 t. 舟山市农业种植面积有限, 氮肥施用产生的氨排放量在全省中最小 (95.08 t). 在实现氮肥施用氨减排途径方面, 建议推广测土配方施肥和新型肥料应用等氮肥减量技术与模式.

2.5 2018 年浙江省氨排放空间分布特征

本文基于 ArcGIS 空间分析技术, 综合考虑人口空间分布、农村居民点分布、土地利用类型、GDP 空间分布和道路网等空间特征标准数据, 利用多因子权重分配法, 将各地市为基本统计单元的不同活动水平氨排放量展布到栅格单元, 建立了 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格化人为源氨排放清单, 相关栅格数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 分配结果如图 6 所示. 从中可知, 浙江省人为源氨排放空间分布总体较为分散, 主要在浙江省北部区域, 呈现出“北高南低”的排放趋势, 高值区集中于环杭州湾带, 分布在嘉兴市、湖州市东部、杭州市东北部、绍兴市北部和宁波市中北部, 单位网格氨排放量大于 10.00 t. 台州市和温州市的沿海区域、金华市和衢州市的中部地区也存在部分高值区, 舟山市和丽水市高值区较少, 仅为

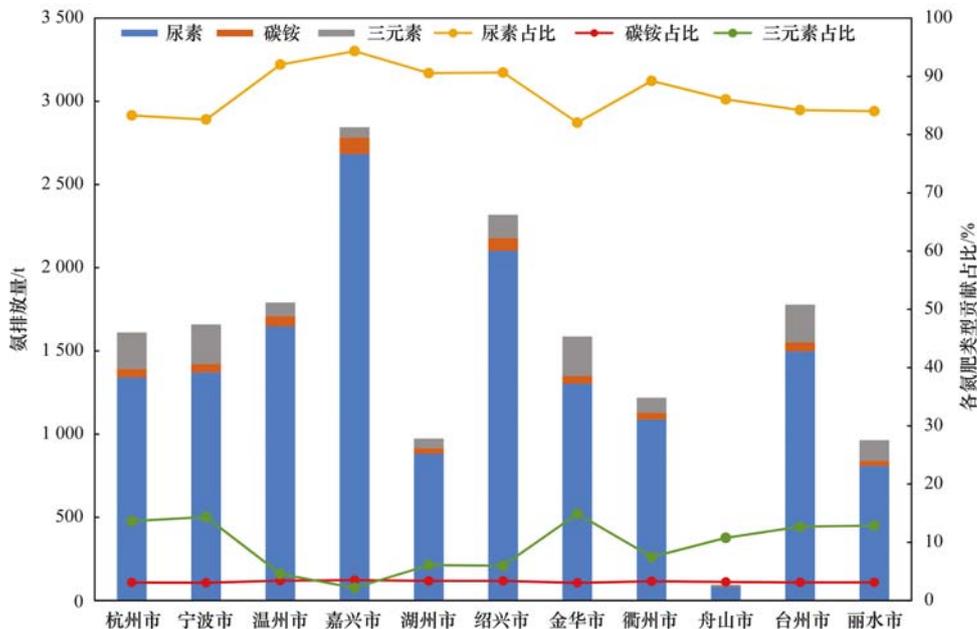


图 5 2018 年浙江省各地市不同氮肥类型氨排放量及贡献率

Fig. 5 Ammonia emissions and contribution from different fertilizer types for each city in Zhejiang province in 2018

零星分布. 高值区的分布与浙江省杭嘉湖、宁绍等平原区域一致, 这是由于平原地区主要是粮食作物的主产区与畜禽养殖区, 而城市中心、丘陵和山地等区域农业活动水平较少, 因此氨排放量较小.

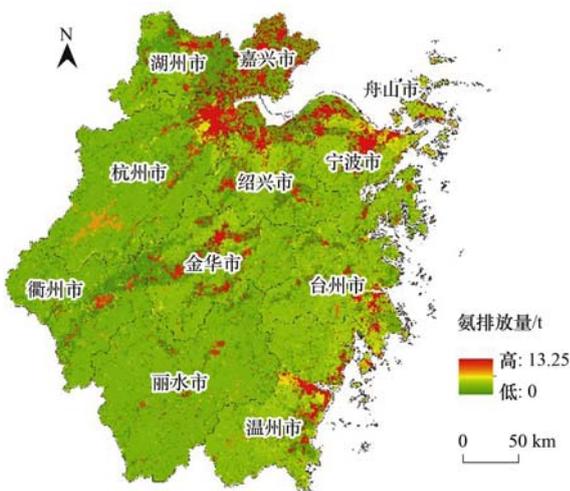


图 6 2018 年浙江省氨排放空间分布 (1 km × 1 km)

Fig. 6 Spatial distribution of ammonia emissions in Zhejiang province in 2018

2.6 不同地区氨排放清单对比

本文对比了与其他学者在江苏^[40]、山东^[45]和安徽^[46]等地区相近基准年的氨排放清单 (表 8). 结果表明, 畜禽养殖和氮肥施用是各地区氨排放主要贡献源, 基本维持在氨排放总量的 78.31% ~ 85.90%. 本文估算的氨排放量相较这些地区均处于较低水平, 分别是其氨排放量的 20.45%、15.17% 和 17.11%. 差异较大的氨排放源主要为氮肥施用和畜禽养殖, 其中氮肥施用除了与当地年施用量有关外, 还与所选用的各类型氮肥的排放因子有关, 本

文基于浙江省酸性土壤条件选择的氨排放因子远小于其他中性或碱性土壤地区, 例如文献^[40]中江苏省尿素和碳铵的氨排放因子分别为 21.3% 和 17.4%, 是本文的 5.49 倍和 6.33 倍. 畜禽养殖则主要与各地区不同的养殖品种及规模大小直接相关. 总体看来, 氨排放量的高低体现了不同地区间经济发展水平、人口规模、物质需求、农牧业结构和自然条件等的差异.

对比相同基准年的浙江省氨排放结果, 本文估算的 2017 年浙江省氨排放量为 115.04 kt, 与赵睿东等^[16]的研究结果相近, 相对偏小 6.96 kt, 差异较大的氨排放源主要体现在氮肥施用、畜禽养殖、人体排放和废物处理等这 4 种. 其中, 氮肥施用相比偏小 13.40 kt, 主要是由于本文将各类型氮肥的施用份额实现本地化, 且所选用的校正排放因子也存在差异. 畜禽养殖相比高出 36.55 kt, 是因为本文在估算氨排放量较大的畜禽种类时, 考虑到出栏的肉牛和肉羊饲养周期大于 1 a^[47], 因此将其饲养周期以 365 d 计, 从而导致畜禽养殖氨排放量较大. 人体排放相比偏小 13.84 kt, 则是由于本文在同样基于农村人口基础上, 额外考虑了农村卫生厕所普及率, 使其更加符合实际, 浙江省 2017 年农村卫生厕所普及率已达 98.64%^[18]. 废物处理相比偏小 16.48 kt, 是因为本文对烟气脱硝相关企业燃煤产生的氨排放已在“燃料燃烧源”中予以计算, 因此未对烟气脱硝过程再次估算, 且燃料燃烧源中工业燃煤消耗的排放因子 (0.014 kg·t⁻¹) 较烟气脱硝 (0.155 kg·t⁻¹) 相差一个数量级, 致使同等煤炭消耗量所计算的烟气脱硝氨排放量明显高于燃料燃烧源.

表 8 与其他地区氨排放研究结果比较/kt

Table 8 Comparison of ammonia emissions with other regions/kt

氨排放源	浙江		江苏 ^[40]	山东 ^[45]	安徽 ^[46]
	本研究	文献 ^[16]			
基准年	2017	2017	2017	2018	2017
氮肥施用	17.62	31.02	250.54	132.15	268.57
畜禽养殖	72.47	35.92	212.91	509.42	308.83
土壤本底	3.56	3.58	/	19.98	/
固氮作物	0.17	/	/	0.99	/
人体排放	0.41	14.25	33.55	46.85	25.79
生物质燃烧	2.76	3.92	17.47	8.31	44.08
工业生产	0.88	0.65	7.9	17.37	9.13
废物处理	5.56	22.04	24.84	8.16	2.59
燃料燃烧	2.56	/	5.57	/	3.20
道路移动源	9.06	9.15	9.69	15	7.08
非道路移动源	0.00	/	/	/	/
氨排放总量	115.04	122.00	562.47	758.23	672.16

2.7 不确定性分析

本文假设氨排放估算过程中的活动水平和排放

因子符合对数正态分布, 采用蒙特卡罗模拟方法, 以各类排放源活动水平和排放因子为参数, 选用

Oracle Crystal Ball 软件随机抽样运算 10 000 次, 定量分析了在 95% 置信区间下的 2018 年浙江省氨排放不确定度, 如表 9 所示. 结果表明, 模拟的氨排放总量平均值为 108.37 kt, 略低于本文估算的氨排放量 0.15 kt, 不确定度范围为 -5.40%~5.60%, 各排放源的不确定度在 -18.25%~21.13% 之间. 氮肥施用平均氨排放量为 16.84 kt, 与估算值相同, 不确定度为 -16.33%~18.48%. 畜禽养殖和燃料燃烧的不确定度较小, 分别为 -6.82%~7.23% 和 -8.37%~8.97%, 主要是由于本文估算的畜禽养殖氨排放考虑了浙江省比较全面的共 13 类畜禽饲养种类和室内散养、室外散养和集约化等 3 种饲养方式以及户外、圈舍、粪便存储处理、施肥这 4 个阶段的畜禽粪便管理; 燃料燃烧氨排放则对煤炭、油品和天然气等 3 种燃料区分了工业和生活两个方面的消费情况, 总体看来本文较为全面地细分了活动水平. 对比长三角^[12] (-55%~60%)、京津冀^[47] (-17%~27%) 和青海东部城市群^[48] (-9.8%~17.1%) 等其他研究区域, 本文模拟结果较好, 所建立的清单不确定度明显下降.

表 9 95% 置信区间下的 2018 年浙江省氨排放不确定度/%

Table 9 Uncertainty of ammonia emissions under 95% confidence interval in Zhejiang province of 2018/%

氨排放源	估算排放量 /kt	模拟平均值 /kt	不确定度 /%
氮肥施用	16.84	16.84	-16.33~18.48
畜禽养殖	67.43	67.41	-6.82~7.23
土壤本底	3.56	3.57	-18.25~21.08
固氮作物	0.15	0.15	-18.22~20.77
生物质燃烧	2.03	1.91	-13.83~15.55
人体排放	0.10	0.11	-17.94~21.02
工业生产	0.83	0.82	-18.08~20.36
废物处理	5.11	5.11	-12.03~13.22
燃料燃烧	2.58	2.58	-8.37~8.97
道路移动源	9.86	9.86	-16.86~19.61
非道路移动源	0.00	0.00	-18.03~21.13
氨排放总量	108.52	108.37	-5.40~5.60

3 结论

(1) 2008~2018 年浙江省人为源氨排放量总体呈现下降趋势, 从 2008 年的 162.74 kt 下降到 2018 年的 108.52 kt, 年均下降率为 3.97%. 农业源是浙江省氨排放的主要贡献源, 占氨排放总量的 82.96%~91.22%; 非农业源比较稳定, 氨排放总量介于 14.54~18.50 kt. 杭州市和嘉兴市是历年氨排放量最大的地市, 年平均分别为 20.18 kt 和 19.45 kt.

(2) 2018 年浙江省农业源氨排放量为 90.02 kt, 非农业源 18.50 kt. 杭州市、嘉兴市和温州市的氨排放量高于其他城市, 分别占全省氨排放总量的

14.72%、11.86% 和 11.80%. 浙江省氨排放强度为 $1.03 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 最高的是嘉兴市, 为 $3.05 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$. 禽类养殖氨排放量达到 29.08 kt, 占畜禽养殖氨排放总量的 43.12%. 尿素氨排放量约 14.80 kt, 占各地市氮肥氨排放总量的 82.59%~94.33%.

(3) 从空间分布特征看, 浙江省人为源氨排放主要分布在北部区域, 呈现“北高南低”的排放趋势, 高值区集中在嘉兴市、湖州市东部、杭州市东北部、绍兴市北部和宁波市中北部, 舟山市和丽水市高值区较少.

(4) 不确定性结果显示, 模拟的 2018 年浙江省氨排放总量平均值为 108.37 kt, 在 95% 置信区间的不确定度范围为 -5.40%~5.60%, 各排放源的不确定度在 -18.25%~21.13% 之间, 畜禽养殖和燃料燃烧的不确定度较小.

参考文献:

- [1] Ayers G P, Gras J L. Ammonia gas concentrations over the Southern Ocean[J]. *Nature*, 1980, **284**(5756): 539-540.
- [2] Chen S H, Cheng M M, Guo Z, *et al.* Enhanced atmospheric ammonia (NH_3) pollution in China from 2008 to 2016: evidence from a combination of observations and emissions [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114421.
- [3] Behera S N, Sharma M. Investigating the potential role of ammonia in ion chemistry of fine particulate matter formation for an urban environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(17): 3569-3575.
- [4] Krupa S V. Effects of atmospheric ammonia (NH_3) on terrestrial vegetation: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **124**(2): 179-221.
- [5] 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 NH_3 emission intensities in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, **17**(1): 2-7.
- [6] Gu B J, Zhang L, Van Dingenen R, *et al.* Abating ammonia is more cost-effective than nitrogen oxides for mitigating $\text{PM}_{2.5}$ air pollution [J]. *Science*, 2021, **374**(6568): 758-762.
- [7] Anderson N, Strader R, Davidson C. Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and other sources [J]. *Environment International*, 2003, **29**(2-3): 277-286.
- [8] 薛文博, 许艳玲, 唐晓龙, 等. 中国氨排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(12): 3531-3539.
Xue W B, Xu Y L, Tang X L, *et al.* Impacts of ammonia emission on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(12): 3531-3539.
- [9] Hamaoui-Lague L, Meleux F, Beekmann M, *et al.* Improving ammonia emissions in air quality modelling for France [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 584-595.
- [10] Megaritis A G, Fountoukis C, Charalampidis P E, *et al.* Response of fine particulate matter concentrations to changes of emissions and temperature in Europe [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(6): 3423-3443.
- [11] Fu H, Luo Z B, Hu S Y. A temporal-spatial analysis and future trends of ammonia emissions in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.

- 138897.
- [12] Yu X N, Shen L, Hou X H, *et al.* High-resolution anthropogenic ammonia emission inventory for the Yangtze River Delta, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126342.
- [13] 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.
- [14] 浙江省发展和改革委员会. 浙江省生态环境保护“十四五”规划 [EB/OL]. http://fzggw.zj.gov.cn/art/2021/7/12/art_1229123366_2310857.html, 2021-07-12.
- [15] 余飞翔, 晁娜, 吴建, 等. 浙江省 2013 年农业源氨排放清单研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(10): 41-46. Yu F X, Chao N, Wu J, *et al.* Research on agricultural ammonia emission inventory of Zhejiang Province in 2013 [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(10): 41-46.
- [16] 赵睿东, 于兴娜, 侯新红, 等. 浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3976-3984. Zhao R D, Yu X N, Hou X H, *et al.* Establishment and spatial distribution of anthropogenic ammonia emission inventory in Zhejiang province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3976-3984.
- [17] 环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578.pdf>, 2014-08-20.
- [18] 浙江省统计局. 浙江自然资源与环境统计年鉴-2009-2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2019.
- [19] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2009-2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2019.
- [20] Xu P, Zhang Y S, Gong W W, *et al.* An inventory of the emission of ammonia from agricultural fertilizer application in China for 2010 and its high-resolution spatial distribution [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **115**: 141-148.
- [21] Ye Z L, Guo X R, Cheng L, *et al.* Reducing PM_{2.5} and secondary inorganic aerosols by agricultural ammonia emission mitigation within the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **219**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116989.
- [22] 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.
- [23] Klimont Z, Winiwarter W. Integrated ammonia abatement-modelling of emission control potentials and costs in GAINS [R]. IR-11-027. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2011.
- [24] 俞国乔, 何世山, 宋美娥. 浙江省家禽业发展现状及对策建议 [J]. *浙江农业科学*, 2014, (12): 1922-1924.
- [25] 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. Yang Z P. Estimation of ammonia emission from livestock in China based on mass-flow method and regional comparison [D]. Beijing: Peking University, 2008.
- [26] Harrison R, Webb J. A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions [J]. *Advances in Agronomy*, 2001, **73**: 65-108.
- [27] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编-2009-2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2019.
- [28] 高榕. 山东省农业源氨排放清单及其减排潜力研究 [D]. 济南: 济南大学, 2018. Gao R. Inventories of the ammonia emission from agriculture and the potential mitigation for future emission [D]. Jinan: University of Jinan, 2018.
- [29] 覃思, 孔少飞, 吴剑, 等. 1996-2016 年湖北省氨排放时空差异及影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(4): 1403-1413. Qin S, Kong S F, Wu J, *et al.* Spatial-temporal diversities of ammonia emissions and impacting factors in Hubei Province from 1996 to 2016 [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1403-1413.
- [30] 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.
- [31] 裘一冰, 叶波, 陆若辉. 浙江省农作物秸秆饲料化利用现状的分析与探讨 [J]. *浙江农业科学*, 2018, **59**(2): 331-332.
- [32] 李飞, 邵建均. 浙江省农作物秸秆资源台账制度建设现状及对策建议 [J]. *浙江农业科学*, 2020, **61**(8): 1640-1641, 1646. Li F, Shao J J. Status of agricultural resources accounting construction and its countermeasures [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, **61**(8): 1640-1641, 1646.
- [33] 刘元隆. 福建省人为源氨排放清单研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2016. Liu Y L. Research on ammonia emission inventory in Fujian Province [D]. Xiamen, Xiamen University, 2016.
- [34] Ito A, Penner J E. Global estimates of biomass burning emissions based on satellite imagery for the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109** (D14): D14S05.
- [35] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单 [J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(8): 1109-1118. Peng L Q, Zhang Q, He K B. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(8): 1109-1118.
- [36] 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴-2009-2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2019.
- [37] 沈兴玲, 尹沙沙, 郑君瑜, 等. 广东省人为源氨排放清单及减排潜力研究 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 43-53. Shen X L, Yin S S, Zheng J Y, *et al.* Anthropogenic ammonia emission inventory and its mitigation potential in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 43-53.
- [38] Heeb N V, Forss A M, Brühlmann S, *et al.* Three-way catalyst-induced formation of ammonia-velocity-and acceleration-dependent emission factors [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(31): 5986-5997.
- [39] Gu M N, Pan Y P, Walters W W, *et al.* Vehicular emissions enhanced ammonia concentrations in winter mornings: insights from diurnal nitrogen isotopic signatures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(3): 1578-1585.
- [40] 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 等. 2013-2017 年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4862-4869. Hou X H, Yu X N, Shen L, *et al.* Establishment and characteristics of an artificial ammonia emissions inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017 [J]. *Environmental Science*,

- 2019, **40**(11): 4862-4869.
- [41] 黄学良, 张洲, 杨威强, 等. 广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3162-3168.
Huang X L, Zhang Z, Yang W Q, *et al.* Emission factors and preliminary emission estimates of air pollutants from ships at berth in the Guangzhou Port [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3162-3168.
- [42] Cooper D A. Exhaust emissions from high speed passenger ferries [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(24): 4189-4200.
- [43] 环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>, 2014-12-31.
- [44] 刘学军, 沙志鹏, 宋宇, 等. 我国大气氨的排放特征、减排技术与政策建议[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(1): 149-157.
Liu X J, Sha Z P, Song Y, *et al.* China's atmospheric ammonia emission characteristics, mitigation options and policy recommendations [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 149-157.
- [45] 赵国梁, 常景云, 成杰民, 等. 2008-2018 年山东省人为源氨排放清单研究[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(2): 259-265.
Zhao G L, Chang J Y, Cheng J M, *et al.* Anthropogenic ammonia emission inventory in Shandong Province from 2008 to 2018 [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, **43**(2): 259-265.
- [46] 王康宏, 沈丽, 赵睿东. 2006-2017 年安徽省人为源氨排放清单及特征[J]. 大气科学学报, 2020, **43**(3): 547-556.
Wang K H, Shen L, Zhao R D. Anthropogenic ammonia emission inventory and its spatial distribution in Anhui Province from 2006 to 2017 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, **43**(3): 547-556.
- [47] 叶枝兰. 京津冀地区氨排放历史特征及减排潜力预测研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
Ye Z L. Historical characteristics and prediction of mitigation potential of ammonia emissions within the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- [48] 张津建, 李广英, 张元勋, 等. 青海东部城市群大气氨排放清单研究[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(9): 2113-2121.
Zhang J J, Li G Y, Zhang Y X, *et al.* Ammonia emission inventory in eastern urban agglomeration of Qinghai Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(9): 2113-2121.



CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)