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

2020
Vol.41 No.9
第41卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第9期
2020年9月15日

目 次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析 …… 肖致美，徐虹，蔡子颖，李鹏，刘彬，元洁，郑乃源，唐邈，陈魁，邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市$PM_{2.5}$中水溶性离子污染特征 …… 尹寒梅，陈军辉，冯小琼，姜涛，钱骏，刘政(3889)
宿迁市$PM_{2.5}$中水溶性无机离子的季节特征和来源分析 …… 马红璐，赵欣，陆建刚，王辉，许纯领，欧阳琰，朱新胜，殷堂兵，漆丹，陆亚秋，汪玖阳，陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布 …… 李安娜，温天雪，华维，杨员，孟泽，胡波，辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析 …… 林孜，姬亚芹，林宇，国纪良，马妍，赵静琦(3918)
西安市冬季$PM_{2.5}$中WSOC的光谱特性和来源解析 …… 杨毅，张亚楠，刘焕武，田萍萍，李亚飞，雷颖，王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测 …… 杜盈盈，陈军，张家洛，甘桂城，刘瑜存，苏明旭，楼晟荣，周敏，陶士康，乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析 …… 崔金梦，王体健，李秋潼，董立文，黄丛吾，曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析 …… 王成辉，陈军辉，韩丽，徐晨曦，王波，李英杰，刘政，钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案 …… 严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征 …… 屈加豹，王鹏，伯鑫，薛晓达，董广霞，崔磊，康明雄，王彤，汤铃，朱法华，李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征 …… 赵睿东，于兴娜，侯新红，沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选 …… 赵思岚，奚鹏飞，郭凤艳，邓双，贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源 …… 韩婷婷，张明军，王圣杰，杜勤勤，马转转，郭蓉，曹晏凤(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素 …… 张涛，王明国，张智印，刘廷，何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制 …… 崔佳琪，李仙岳，史海滨，孙亚楠，安海军，邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析 …… 李笑，于爽，李亮，郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素 …… 季鹏飞，许海，詹旭，朱广伟，邹伟，朱梦圆，康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域河湖系统营养盐时空分布机制分析 …… 李新艳，李恒鹏，姜三元，马培，赖锡军，邓建才，陈东强，耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响 …… 康丽娟，许海，邹伟，朱广伟，朱梦圆，季鹏飞，陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析 …… 刘明坤，童俊，朱慧峰，白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征 …… 孙琳婷，赵祯，唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响 …… 周昕原，王言仔，苏建强，黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价 …… 廖杰，魏晓琴，肖燕琴，李青松，范洪勇，刘学军，庄马展，刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异 …… 叶金梅，赵莉，罗旭，彭亮，雷腊梅(4088)
妫水河湿地植物作用及调水水质响应模拟 …… 李亚娟，杜彦良，毕二平，王亮，陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验 …… 张佳炜，李田，张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输 …… 李佳，谢文霞，姜智绘，单溪环，廖云杰，赵洪涛，李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(Ⅴ)：性能与机制 …… 石松，吴乾元，李新正，黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含萘磺酸废水 …… 章晋门，卢钧，刘晓琛，陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响 …… 刘智斌，刘秀红，周桐，章世勇，李健敏，杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能 …… 缪新年，汪倩，郭凯成，刘文如，沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能 …… 刘雨馨，王建芳，钱飞跃，陈倩苗，乔伟，沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨 …… 郭志娟，周亚龙，杨峥，赵传冬，成杭新，孔牧，彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价：以北京某工业污染场地为例 …… 吴志远，张丽娜，夏天翔，贾晓洋，李慧颖，王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价 …… 张富贵，彭敏，王惠艳，马宏宏，徐仁廷，成晓梦，侯召雷，陈子万，李括，成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力 …… 张龙，张云霞，宋波，吴勇，周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期 …… 胡雨丹，周航，辜娇峰，霍洋，邓鹏辉，魏宾纭，刘俊，廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率 …… 郭俊姆，杨俊兴，杨军，郑国砥，周小勇，陈同斌，卞建林，孟晓飞，李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果 …… 段春燕，沈育伊，徐广平，滕秋梅，张德楠，何成新，张中峰，周龙武，孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响 …… 杨彩迪，卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应 …… 王燕，程东会，檀文炳，余红，席北斗，姜永海，党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响 …… 理鹏，吴建强，沙晨燕，叶春梅，黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响 …… 张拓，徐飞，怀宝东，杨雪，隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应 …… 李娜，王宝荣，安韶山，焦峰，黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响 …… 程跃扬，靳振江，王晓彤，贾远航，袁武，周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系 …… 尚秋彤，黄瑞林，倪浩为，隋跃宇，孙波，梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性 …… 王显，龙健，李娟，刘灵飞，廖洪凯，李宜蓉，杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附 …… 刘玉玲，朱虎成，彭鸥，李丹阳，杨蕊嘉，彭晶，铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法 …… 梁杏，孙立群，张鑫，张洁，付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233，4293，4304)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第9期 2020年9月
Vol.41, No.9 Sep., 2020

浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征

赵睿东, 于兴娜*, 侯新红, 沈丽
(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: 通过收集各类氨排放源的活动水平数据,选取合适的排放因子以及估算方法,建立了 2017 年浙江省人为源氨排放清单,分析各排放源的排放分摊率以及浙江省各市的排放情况,并利用 ArcGIS 对浙江省氨排放量和排放强度的空间分布进行分析. 结果表明, 2017 年浙江省人为源氨排放量为 122.00 kt,以农业源排放为主,其中农田生态系统氨排放量最高,达到 36.06 kt,并以氮肥施用贡献最大(87.12%); 其次是禽畜养殖,占到人为源氨排放总量的 29.44%. 非农业源中废物处理和人体排放源贡献最大,分别占到非农业源氨排放量的 44.07% 和 28.49%. 2017 年杭州市氨排放量最高,占浙江省氨排放总量的 17.83%; 但嘉兴市的氨排放强度最大,达到 3.82 $t \cdot km^{-2}$. 从空间分布来看,氨排放量主要集中在浙江省北部和东南部,而浙江省北部和东北部的氨排放强度相对较高.

关键词: 氨(NH_3); 人为源; 排放清单; 空间分布; 浙江省
中图分类号: X51 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)09-3976-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202001207

Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province

ZHAO Rui-dong, YU Xing-na*, HOU Xin-hong, SHEN Li
(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: The ammonia emissions inventory of Zhejiang Province was established in 2017 using the activity data of various ammonia emission sources, emission factors, and an estimation method. Ammonia emissions for each source and city in Zhejiang Province were analyzed. The spatial distribution and intensity of ammonia emissions in 2017 were mapped using ArcGIS software. The total anthropogenic ammonia emissions in Zhejiang Province in 2017 were 122.00 kt. The farmland ecosystem was the major source of total ammonia emissions (36.06 kt), and nitrogen fertilizer applications was the largest contributor in this category (87.12%), followed by the livestock and poultry source (29.44%). The waste and human-activity sources were the two major non-agricultural sources, accounting for 44.07% and 28.49%, respectively. Hangzhou City had the highest ammonia emissions in 2017, accounting for 17.83% of the total ammonia emissions in Zhejiang Province. However, the ammonia emission intensity in Jiaxing City was the highest, reaching 3.82 $t \cdot km^{-2}$. The spatial distribution map revealed that ammonia emissions in the northern and southeastern Zhejiang were relatively higher, while ammonia emission intensity was higher in the northern and northeastern region.

Key words: NH_3; anthropogenic sources; emissions inventory; spatial characteristics; Zhejiang Province

氨(NH_3)是大气中重要的微量气体[1],是参与大气氮循环的关键成分[2],对于大气环境和生态系统都有重要的影响. 作为大气中唯一的碱性气体,氨能与大气中的 SO_2 和 NO_x 等酸性气体发生中和反应[3],减弱酸雨的危害; 但反应生成的硝酸铵(NH_4NO_3)、硫酸铵[$(NH_4)_2SO_4$]、硫酸氢铵(NH_4HSO_4)和氯化铵(NH_4Cl)等铵盐是大气中细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分[4],可造成大气能见度下降,加重雾-霾污染,严重影响人体健康. 此外,氨的排放会破坏 CH_4 的氧化,从而加剧温室效应[5]; 通过湿沉降到达地面的 NH_4^+ 还会引起土壤酸化[6]和水体富营养化[7]等诸多环境问题. 因此,研究和掌握氨的排放特征和时空分布对控制大气 $PM_{2.5}$ 污染以及改善生态系统环境有着极为重要的意义.

为更好地控制大气 $PM_{2.5}$ 污染,国内外学者发现氨排放清单的建立对大气环境具有重要意义. Olivier 等[8]估算了 1990 年全球的氨源排放清单,发现总排放量的 80% 来自人为源. 董艳强等[9]运用排放因子法对长江三角洲人为源氨排放量进行了估计,涵盖的排放源较为全面; 尤翔宇等[10]建立了长株潭地区人为源氨排放清单,分析了氨排放量的空间分布特征,并运用蒙特卡洛法对清单不确定性进行了定量分析; Wu 等[11]研究了福建省氨排放量和排放强度的时空分布,并将研究尺度精确到了县级; 侯新红等[12]建立了 2013 ~ 2017 年江苏省人为源氨排放清单,并分析了 5 年来江苏省氨排放特征的变化趋势. 此外,针对兰州市[13]、南京市[14]和西安

收稿日期: 2020-01-28; **修订日期**: 2020-03-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(41775154); 江苏省"六大人才高峰"项目(JNHB-057)
作者简介: 赵睿东(1997 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气物理学与大气环境,E-mail: dangdang970220@163.com
* 通信作者,E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

市[15]等城市尺度的氨排放清单建立研究也陆续展开.

浙江省位于中国东南沿海、长江三角洲南翼. 经济实力雄厚,工业化进程快,人口密集,且省内平原以及盆地地区畜牧业和种植业十分发达；因此,不论农业源或非农业源,浙江省的人为源氨排放情况都需引起足够重视. 余飞翔等[16]于 2013 年对浙江省氨排放清单进行了估计,并研究了氨排放量的空间分布特征,但在排放源上仅限于农业源；董艳强等[9]和刘波等[17]对长江三角洲地区氨排放清单的估算研究中涉及到浙江省部分地区,但鲜见针对浙江省,并且涵盖农业源以及非农业源的氨排放清单建立的研究. 自 2013 年以来,浙江省大气 $PM_{2.5}$ 污染状况有所改善,但依然严峻. 因此,明晰浙江省农业源和非农业源氨排放的分布及排放特征,核算其排放总量以及排放强度,对于控制浙江省大气气溶胶污染以及改善生态系统环境工作起到指导意义.

1　材料与方法

1.1　研究区域、对象及数据来源

本研究基准年为 2017 年,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. 估算的大气氨源可分为农业源和非农业源两类. 其中农业源包括禽畜养殖和农田生态系统,非农业源包括人体排放、机动车排放、化工生产、生物质燃烧和废物处理.

禽畜养殖、农田生态系统中的氮肥施用和固氮植物、人体排放、机动车排放、化工生产以及生物质燃烧中的秸秆露天焚烧活动水平数据均来自文献[18],废物处理活动水平数据来自文献[19]. 农田生态系统中的土壤本地和秸秆堆肥,以及生物质燃烧中的秸秆、薪柴燃烧活动水平数据来自文献[20]. 本研究排放因子的选取主要参考文献[21]以及国内外研究成果,其中优先选用文献[21]中推荐的排放因子.

1.2　清单构建

本研究采用排放因子的计算方法对浙江省各市人为源氨排放量进行估算,计算公式如式(1)：

$$E_{i,j,y} = A_{i,j,y} \times \mathrm{EF}_{i,j,y} \times \gamma \qquad (1)$$

式中,i、j 和 y 分别为地区、排放源和年份,$E_{i,j,y}$ 为 i 地区 j 排放源在 y 年的氨排放量. A 为活动水平(头、t 和量等),EF 为排放因子($kg\cdot 头^{-1}$、$kg\cdot t^{-1}$ 和 $mg\cdot km^{-1}$等). γ 为氮-大气氨转换系数,对于畜禽养殖源取 1.214,其他源取 1.0. 针对不同的源,活动水平数据的处理方法、排放因子的选取途径等有所不同,下面分别进行详细介绍.

1.2.1　畜禽养殖

畜禽养殖过程中氨主要由动物排泄物释放,粪便包括室内和户外两部分. 粪便管理阶段包括户外、圈舍内、粪便存储处理和后续施肥,后 3 种方式属于室内粪便管理,具有尿液(液态)和粪便(固态)两种形态. 养殖方式包括散养、集约化养殖以及放牧,由于浙江省内几乎无放牧活动,因此本研究只考虑散养和集约化养殖两种养殖方式. 由于畜禽排泄物与畜禽种类直接相关,因此本研究将畜禽分为肉牛、奶牛、肉猪、母猪、山羊、蛋鸡、蛋鸭、肉鸡、肉鸭、肉鹅和兔等 11 类,并通过调研文献[18]获取了这 11 个子排放源的年饲养量. 其中,对于肉牛、肉猪、肉鸡、肉鸭、肉鹅和兔等饲养周期小于 1 a 的畜禽,获取其年底出栏数；对于奶牛、山羊、母猪、蛋鸡和蛋鸭等饲养周期大于 1 a 的畜禽,获取其年底存栏数. 而奶牛、肉牛和山羊年龄大于 1 a,肉猪年龄大于 75 d 的比例根据文献[22]得到,分别为 29.54%、27.59%、19.28% 和 39.44%. 根据文献[21]中的计算方法,将散养和集约化养殖两种养殖方式的铵态氮量(TAN)分开计算,具体方法为分别计算两种养殖方式中户外、圈舍、粪便存储和施肥 4 个阶段的铵态氮量,并将其中后 3 个阶段内排泄物种类分为液态和固态；然后依据相应的排放因子计算出不同养殖方式下不同阶段不同排泄物种类的氨释放量. 参考文献[17]得知浙江省牛、猪、家禽以及羊的集约化养殖比例分别为 95%、90%、95% 和 50%. 由于文献[21]中没有给出兔的相关排放因子,通过文献[23]得到该排放因子为 0.23 $kg\cdot 只^{-1}$. 不同养殖方式下不同阶段不同排泄物种类的氨排放因子如表 1 所示.

1.2.2　农田生态系统

根据文献[21]和实际获取的活动水平数据,将农田生态系统分为氮肥施用、土壤本底、固氮植物和秸秆堆肥.

(1) 氮肥施用

氮肥是指含有作物营养元素氮的肥料,这类肥料施入农田后经微生物的作用和自身分解,最终会使氮损失并挥发出氨,成为重要的氨排放源. 氮肥种类、施肥方式、土壤条件以及气象条件都是影响氨挥发的主要因素.

通过查阅文献得知氮肥可分为尿素、碳酸氢铵、硝酸铵、硫酸铵以及其他含氮肥料[24], 并得到了我国不同类型氮肥的施用份额,如表 2 所示. 根据文献[21],氮肥施用的氨排放因子按式(2)计算：

$$\mathrm{EF} = \mathrm{EF}_{基准} \times m \times n \qquad (2)$$

其中,$\mathrm{EF}_{基准}$ 为基准排放因子；m 为施肥率校正因

子；n 为施肥方式校正因子. 基准排放因子根据浙江省各市土壤酸碱性特征[25]以及月均温度[18]选取. 施肥率校正因子与每亩耕地施氮肥的量有关，施氮肥量大于 1.94×10^4 kg·km^{-2}时取 1.18，反之则取 1.0. 施肥方式校正因子根据土壤施肥方式[26]选取，在施基肥时取 0.32，在施追肥时取 1.0.

通过式(2)以及上述取值方法，参考文献[16]，得到各种氮肥的氨排放因子如表 2 所示.

表 1 畜禽养殖排放因子/%

Table 1 Ammonia emission factors in livestock and poultry breeding/%

禽畜种类	户外	圈舍-液态		圈舍-固态		储存-液态		储存-固态		液态施肥	固态施肥
		散养	集约	散养	集约	散养	集约	散养	集约		
奶牛 <1 a	53	7	7	7	7	20	15.8	27	4.2	55	79
奶牛 >1 a	30	14	14	14	14	20	15.8	27	4.2	55	79
肉牛 <1 a	53	7	7	7	7	20	15.8	27	4.2	55	79
肉牛 >1 a	53	14	14	14	14	20	15.8	27	4.2	55	79
母猪	0	14.7	14.3	14.7	14.3	14	3.8	45	4.6	40	81
肉猪 <75 d	0	15.6	15.6	15.6	15.6	14	3.8	45	4.6	40	81
肉猪 >75 d	0	10.2	18.5	10.2	18.5	14	3.8	45	4.6	40	81
山羊 <1 a	53	7	7	7	7	20	15.8	27	4.2	55	79
山羊 >1 a	75	14	14	14	14	28	15.8	28	4.2	90	81
蛋鸡	69	45.2	0	45.2	35.9	0	0	14	3.7	0	63
蛋鸭	54	45.2	0	45.2	35.9	0	0	24	3.7	0	63
肉鸡	66	40.3	0	40.3	40.3	0	0	17	0.8	0	63
肉鸭	54	40.3	0	40.3	40.3	0	0	24	0.8	0	63
肉鹅	54	40.3	0	40.3	40.3	0	0	24	0.8	0	63

表 2 各种氮肥的施用比例及氨排放因子

Table 2 Application of various N fertilizers and standard emission factors

种类	尿素	碳酸氢铵	硫酸铵	硝酸铵	其他氮肥
比例/%	71.00	28.00	0.09	0.70	1.21
排放因子/kg·t^{-1}	13.75	6.46	0.37	1.27	0.21

(2) 土壤本底

根据文献[21]，土壤本底氨排放量基于耕地面积计算，排放因子为 1.79×10^2 kg·km^{-2}.

(3) 固氮植物

根据文献[21]，固氮植物主要有大豆、花生和绿肥. 通过调研文献[18]获取了这 3 种植物的播种面积，排放因子分别为 1.04×10^2 kg·km^{-2}、1.19×10^2 kg·km^{-2}和 1.34×10^2 kg·km^{-2}.

(4) 秸秆堆肥

可用于秸秆堆肥的农作物有 8 种，分别为水稻、小麦、玉米、棉花、大豆、花生、油菜籽和其他粗粮[10]，本研究暂不考虑其他粗粮用于堆肥的秸秆量. 用于堆肥的秸秆量按式(3)计算：

$$M_i = N_i \times P_i \times 43.2\% \quad (3)$$

式中，i 为农作物种类；M 为用于堆肥的秸秆量，t；P 为农作物产量，t；N 为谷草比. 43.2% 为秸秆的施肥比例[27]. 排放因子根据文献[21]取 0.32 kg·t^{-1}.

1.2.3 人体排放

人体主要通过呼吸、汗液以及粪尿 3 个环节向大气中排放氨，且排放量与人口数量密切相关，又由于粪尿的氨挥发量与卫生处理设施水平等因素有关. 根据文献[21]，只考虑农村人口的氨排放情况，相应地氨排放因子取 0.787 kg·人$^{-1}$.

1.2.4 化工生产

氮肥和合成氨生产是主要的工业氨排放源. 产量通过调研文献[18]得到，排放因子参考文献[21]分别取 5.0 kg·t^{-1}和 0.01 kg·t^{-1}.

1.2.5 机动车排放

机动车尾气催化装置在消除 NO_x 时会产生氨，而机动车的氨排放量又与机动车行驶里程有密切的关系. 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. 从文献[18]中获取各市分车型机动车保有量，再根据文献[28]得到各车型机动车的燃料比例. 各类机动车的氨排放因子参考文献[21]，如表 3 所示. 各种车型机动车的年均行驶里程参考文献[29]，如表 4 所示，其中小型和大型车分别对应轻型和重型车.

1.2.6 废物处理

根据文献[21]和实际获取的活动水平数据，将

表 3　各类机动车氨排放因子/g·km^{-1}

Table 3　Emission factors of various vehicles/g·km^{-1}

种类	轻型汽油	轻型柴油	重型汽油	重型柴油	摩托车
排放因子	0.026	0.004	0.028	0.017	0.007

表 4　各种车型机动车年均行驶里程 $\times 10^4$/km

Table 4　Annual average travel of various vehicle categories $\times 10^4$/km

种类	小型客车	大型客车	小型货车	大型货车	摩托车
年均行驶里程	2.59	4.00	3.23	4.40	0.99

废物处理分为垃圾处理、污水处理以及烟气脱硝过程. 垃圾处理过程主要包括卫生填埋、堆肥和燃烧，本研究暂不考虑垃圾堆肥造成的氨排放；污水处理过程产生的氨直接用污水排放量进行估算；烟气脱硝过程基于火力发电燃煤的消耗量进行估算. 废物处理排放因子如表 5 所示.

表 5　废物处理排放因子

Table 5　Emission factors of waste disposal

垃圾处理/kg·t^{-1}		烟气脱硝/kg·t^{-1}		污水处理
填埋	焚烧	SCR	SNCR	/g·m^{-3}
0.560	0.210	0.155	0.17	3.2

1.2.7　生物质燃烧

生物质燃烧主要分为森林火灾、草原火灾、露天秸秆焚烧、家用秸秆燃烧和家用薪柴燃烧这 5 大类. 考虑到浙江省地理特征，本研究暂不考虑森林火灾和草原火灾的氨排放.

对于露天秸秆燃烧，参考文献[30,31]得到计算公式(4)：

$$E_i = \sum_j (M_{i,j} \times G_j \times D_j \times \eta_j \times \xi \times \mathrm{EF}_j) \quad (4)$$

式中，E 为氨排放量，i 和 j 分别代表地区和农作物类型；M 为农作物产量，t；G 和 D 分别为农作物谷草比和谷草干燥比；η 为焚烧效率；ξ 为秸秆焚烧比例；EF 为氨排放因子. 公式(4)中 G、D、η 和 ξ 的取值如表 6.

生物质燃烧排放因子如表 7 所示.

表 6　露天秸秆焚烧排放源计算相关参量

Table 6　Parameters used in the calculation of open burning of straw

项目	谷草比(G)[32]	谷草干燥比(D)[32]	焚烧比例(ξ)[33]	焚烧效率(η)[32]
稻谷	0.9	0.89	0.329	0.930
小麦	1.1	0.89	0.329	0.920
玉米	1.2	0.87	0.329	0.920
大豆	1.6	1.6	0.329	0.680
薯类	0.5	0.45	0.329	0.680
棉花	9.2	0.83	0.329	0.804
花生	0.8	0.94	0.329	0.820
油菜籽	1.5	0.83	0.329	0.804
蔬菜	0.1	0.45	0.329	0.925

表 7　生物质燃烧排放因子/g·kg^{-1}

Table 7　Emission factors of biomass combustion/g·kg^{-1}

露天秸秆焚烧			家用秸秆燃烧	家用薪柴燃烧
小麦	玉米	其他		
0.37	0.68	0.52	1.3	1.3

2　结果与讨论

2.1　2017 年浙江省人为源氨排放特征分析

2017 年浙江省各市氨排放清单如表 8 所示. 可看出，2017 年浙江省人为源氨排放总量为 122.00 kt，其中农业源和非农业源氨排放量分别占总排放量的 59.00% 和 41.00%. 农业源中排放量最大的源为农田生态系统，达到了 36.07 kt，其次是禽畜养殖，排放量为 35.92 kt；在非农业源中，废物处理和人体排放贡献较大，分别达到 22.04 kt 和 14.25 kt，共占非农业源的 64.80%.

农田生态系统和禽畜养殖是浙江省氨排放最大的源，分别占总排放量的 29.56% 和 29.44%，表明农业源在浙江省人为源氨排放中占主导地位，这与文献[8~12]的研究成果相一致. 主要是由于浙江省种植业主要以水稻为主，该作物对肥料的需求量较多；并以尿素和碳酸氢铵两种氮肥为主，比例共达到 90% 以上[34]，二者以氨的形式向大气中挥发排放的氮量远高于其他氮肥，因此氮肥施用源的排放量较大，进而导致整个农田生态系统的氨排放量增多. 浙江省人口众多，对畜牧产品的需求量增加，使得畜牧养殖规模扩大，加上禽畜源的氨排放因子

相对较大,因而使禽畜养殖源的贡献率较大. 此外,废物处理和人体排放的贡献率也较高,分别占到排放总量的 18.07% 和 11.68%; 废物处理中烟气脱硝的贡献率达到 50.02%,需引起重视.

表 8 2017 年浙江省各类人为源氨排放清单

Table 8 Anthropogenic ammonia emission inventory by category in Zhejiang Province in 2017

排放源	排放量/kt	分摊率/%
禽畜养殖	35.92	29.44
农田生态系统	36.07	29.56
人体排放	14.25	11.68
化工生产	0.65	0.53
机动车排放	9.15	7.50
生物质燃烧	3.92	3.22
废物处理	22.04	18.07
合计	122.00	100.00

对氨排放量最高的两个排放源(农田生态系统和禽畜养殖)进行单独分析. 其中农田生态系统氨排放分摊率如图 1 所示. 可见,氮肥施用占浙江省农田生态系统总排放量的比重最大(87.12%); 其中,尿素和碳酸氢铵占氮肥施用总排放量的比重最大,分别为 62.07% 和 37.68%. 主要是因为我国施用氮肥时尿素的施用份额最大,达到 71.00%,且温度高于 10℃的酸性或碱性土壤条件下,尿素和碳酸氢铵的氨排放因子都位列前二,故氮肥施用氨排放量较高.

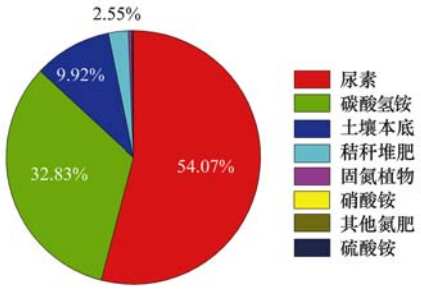

图 1 2017 年浙江省农田生态系统氨排放分摊率

Fig. 1 Contribution of ammonia emissions from the farmland ecosystem in Zhejiang Province in 2017

禽畜养殖氨排放分摊率如图 2 所示. 可见,蛋鸡排放量占浙江省禽畜养殖总排放量的比重最大,其次是山羊、肉猪和肉鸡,占比分别达到 21.79%、18.88%、16.41% 和 14.71%,这主要是由于人们日常对鸡蛋、鸡肉、羊肉和猪肉等畜牧产品的需求量较大,导致这些禽畜的饲养量较多,并且这些禽畜的饲养周期较短,导致相应的氨排放分摊率较大. 而肉鸭、奶牛、肉牛、兔以及肉鹅的排放分摊率较小,均不超过 6.00%; 与低的消费量、大牲畜(如奶牛、肉牛)的饲养周期长以及肉鸡、肉鹅和兔等禽畜的年均氮排泄量小有关.

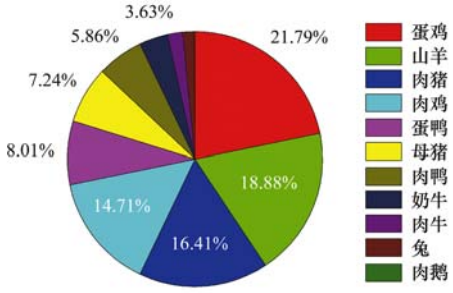

图 2 2017 年浙江省禽畜养殖氨排放分摊率

Fig. 2 Contribution of ammonia emissions from various types of livestock in Zhejiang Province in 2017

2.2 分地区氨排放特征分析

2017 年浙江省各市氨排放总量、各排放源分摊率和构成如图 3 所示. 可见,由于各市产业结构以及经济发展速度等的不同,氨排放总量以及各排放源的分摊率也存在明显差异. 省会城市杭州市氨排放总量位居全省第一,其次是嘉兴市和温州市,分别占浙江省氨排放总量的 17.83%、14.46% 和 13.61%. 而舟山市氨排放总量最小,仅为杭州市的 6.81%,由于地形以岛屿为主,种植业、畜牧业等占比较小,加之常住人口稀少,导致舟山市农业源和非农业源排放量都较小. 衢州、嘉兴和湖州这 3 个城市农业源占比较大,均超过 71%,其中衢州市(农业源氨排放贡献达到 78.12%)为传统的农业大市,既是华东地区最大的粮食批发市场,也是浙江省第二养猪大市. 而杭州、宁波和舟山等市非农业源排放量占比均超过农业源,为 52.19% ~ 63.34% 不等; 其中宁波市废物处理和机动车氨排放量占比均为全省最大,分别达到 34.53% 和 9.64%,这与宁波市城镇化水平高、人口密集、机动车保有量和废物产生量大有关; 舟山市农业源占比最小,仅为 36.66%,由此可以得出

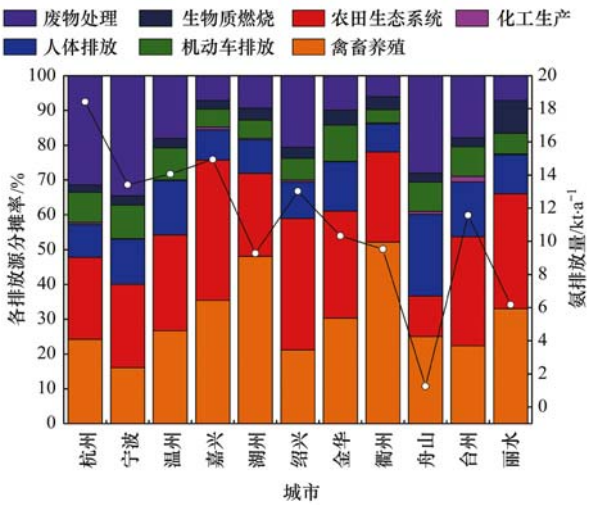

图 3 2017 年浙江省各市氨排放总量以及各排放源氨排放分摊率

Fig. 3 Emissions and contribution of different sources for various cities in Zhejiang Province in 2017

农业构成中种植业和畜牧业占比小是导致舟山市氨排放总量最小的直接原因.

利用 ArcGIS 提取浙江省地理边界信息,并绘制了 2017 年浙江省氨排放量和排放强度的空间分布(图 4). 由图 4(a)可知,包括杭州市和嘉兴市在内的杭嘉湖平原以及包括温州市在内的温台平原氨排放量较大,分别占浙江省氨排放总量的 34.95% 和 20.01%,主要原因是平原地区畜牧业和种植业较为发达,且杭州和温州两市农村人口较多. 丽水地区和舟山群岛氨排放量较小,二者之和仅为浙江省氨排放总量的 6.09%,这主要是因为丽水地区位于浙西南,属于山地地形,而舟山群岛属于滨海岛屿地形,二者特殊的地形地貌特征使得畜牧业和种植业发展落后,进而导致低氨排放量.

氨的排放强度定义为单位面积上氨的排放量,能够反映某地区氨的污染情况. 由图 4(b)可知,浙北和浙东北地区(舟山群岛除外)氨排放强度较高,其中嘉兴市氨排放强度最高,达到 3.82 $t \cdot km^{-2}$,其他城市如湖州市、宁波市和绍兴市的氨排放强度在 1.38 $t \cdot km^{-2}$以上. 相对于浙北和浙东北地区,浙江中南部地区的氨排放强度较小,在 0.36 ~ 1.23 $t \cdot km^{-2}$之间变化,其中丽水市氨排放强度为全省最小,约为 0.36 $t \cdot km^{-2}$. 总体而言, 2017 年浙江省氨排放强度约为 1.16 $t \cdot km^{-2}$.

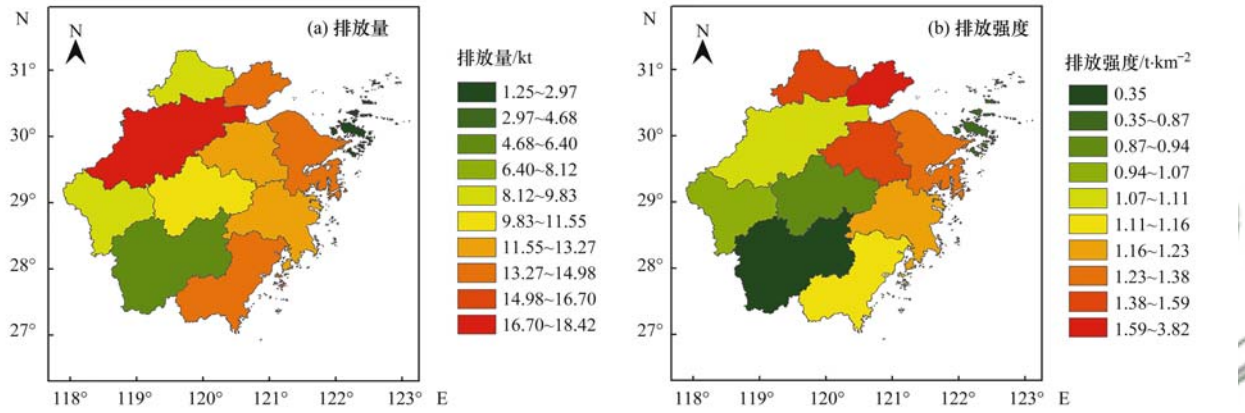

图 4　2017 年浙江省氨排放量和排放强度空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of ammonia emissions and emissions intensity in Zhejiang Province in 2017

2.3　同类排放清单的比较

通过文献调研,将浙江省、长江三角洲地区以及我国其他一些地区的相关研究与本研究的结果进行对比,结果如表 9 所示. 可以看出,以畜禽养殖和氮肥施用为代表的农业源在各地氨排放水平中均占比最大,文献[9,35]中农业源占比均超过 80%,而本研究农业源占比仅为 59.00%,是因为近年来浙江省城镇化速度快,畜禽养殖量、农作物播种量等迅速下降[18,36~39],导致浙江省农业源氨排放量低于我国其他地区. 在农田生态系统中的氮肥施用氨排放量估算方面,针对苏州市[40]的年估算量为 4.84 kt,与本研究得到的杭州市估算量(3.89 kt)相近; 针对长株潭地区[10]的年估算量(21.61 kt)与本研究得到的浙江省估算量(31.42 kt)也较为接近; 而针对京津冀地区[41]和河南省[35]的年估算量则远大于本研究得到的浙江省估算量. 主要是因为浙江省、江苏省南部地区和长株潭地区都地处长江以南,土壤类型均以酸性土壤为主,而酸性土壤条件下各类氮肥的基准排放因子都明显小于碱性土壤[21]; 京津冀地区和河南省均位于长江以北,土壤多呈中性或碱性,故造成氮肥施用氨排放量偏大. 在禽畜养殖氨排放量估算方面,余飞翔等[16]得到的 2013 年浙江省的估算值为 77.10 kt,而本研究得到的 2017 年浙江省全省估算值仅为 35.92 kt. 这主要是因为本研究在估算牛、山羊和肉猪的氨排放量时,考虑了它们的年龄构成,并依据文献[21]选取不同年龄阶段三者的氨排放因子进行氨排放量的估算; 另外刘波等[17]通过整合得到了分别适用于蛋禽和肉禽的氨排放因子,而本研究分别将蛋禽和肉禽细分为蛋鸡、蛋鸭,肉鸡和肉鸭等,并直接使用指南中相应的排放因子,由此使得本研究对于家禽的氨排放量值小于文献[17]的. 由于畜禽养殖和氮肥施用等主要氨排放源的排放量估计值偏低,使得本研究估算得到的浙江省氨排放总量明显小于我国其他地区,排放强度也相应偏小.

中国多尺度排放清单模型(Multi-resolution Emission Inventory for China,MEIC)是由清华大学开发和维护的基于云计算平台开发的中国大气污染物和温室气体人为源排放清单模型. 将 2016 年 MEIC 排放清单[42]中 NH_3 的农业源排放部分与本研究以及我国其他一些地区的相关研究结果进行了对比,如表 10 所示. 可以看出,文献[16,43]以及本研究分别估算得到的河南省和浙江省农业源氨排放量均

小于 MEIC 排放清单[42],而文献[44,45]分别估算得到的山东省和四川省农业源氨排放量均大于 MEIC 排放清单[42]. 这主要是因为在氮肥施用氨排放量的估算上各研究存在差异,文献[16, 43]以及本研究在估算时均综合考虑了土壤酸碱度、气温和施肥方式等因素对氮肥施用氨排放的影响,使得估算结果更符合当地实情; 而文献[44,45]通过引用国内外研究成果得到各类氮肥的排放因子并进行估算,因而造成氮肥施用乃至整个农业源氨排放量估算结果偏大.

表 9 与其他地区氨排放研究的比较

Table 9 Comparison of ammonia emissions between this study and other studies

地区	年份	排放量/kt	排放强度/t·km^{-2}	主要排放源贡献/%	文献
浙江省	2013	131.31	—	禽畜养殖 52.52 农田生态系统 47.48	[16]
长江三角洲	2004	460.68	4.2	禽畜养殖 44.1 氮肥施用 49.3	[9]
苏州市	2013	22.02	3.06	禽畜养殖 36.99 氮肥施用 21.99	[40]
长株潭地区	2013	72.7	2.59	禽畜养殖 58.60 氮肥施用 29.60	[10]
河南省	2013	1035.3	6.4	禽畜养殖 56 氮肥施用 29	[35]
京津冀地区	2015	1625.028	4.37	禽畜养殖 57.96 氮肥施用 42.04	[41]
浙江省	2017	95.52	0.91	禽畜养殖 29.44 农田生态系统 29.56	本研究

表 10 MEIC 排放清单与其他排放清单的比较

Table 10 Comparison of MEIC emission inventory with other emission inventories

地区	研究年份	MEIC 清单排放量[42]/kt	其他清单排放量/kt
浙江省	2017	147.54	71.99(本研究)
河南省	2015	920.31	882.5[43]
山东省	2015	661.03	1 058.31[44]
四川省	2014	727.51	953[45]

2.4 清单不确定性分析

排放清单估算结果的不确定性主要来源于活动水平、排放因子等关键数据的缺失,排放因子或其他参数的代表性不足,以及经验基础或知识的缺乏等. 本研究的活动水平数据主要来自各类统计年鉴,具有较好的代表性,但一部分数据难以从年鉴中直接获取,只能通过相关参数的比例进行推算,如部分城市奶牛、蛋鸡和蛋鸭等禽畜的饲养量,氮肥和合成氨的产量,以及花生、棉花等农作物的播种面积和产量等,这使得估算结果的不确定性增大. 此外,在禽畜养殖氨排放量的估算上,本研究考虑了各类禽畜散养和集约化养殖的比例以及部分大牲畜(如奶牛和肉猪等)的年龄构成,并依据文献[21]选取相应的排放因子; 在农田生态系统的氮肥施用排放量估算上,本研究定量分析了土壤酸碱度、气温以及施肥方式对氮肥施用过程氨排放的影响,这些都在一定程度上降低了估算的不确定性. 总体而言,本研究的不确定性主要来源于部分活动水平数据获取困难以及部分排放因子缺乏本地化特征、代表性不足; 而对排放源的细化(如将农田生态系统细分为氮肥施用、土壤本底、固氮植物和秸秆堆肥,将生物质燃烧细分为秸秆露天焚烧、家用秸秆和薪柴燃烧等),对影响排放量估算结果的各种因素较为细致的考虑等,又使得排放清单更具准确性和合理性.

3 结论

(1) 2017 年浙江省人为源氨排放总量为 122.00 kt,其中农业源占 59.00%,非农业源占 41.00%. 农田生态系统和畜禽养殖为最大的两个氨排放源,农田生态系统源中尿素施用的氨排放量最大,畜禽养殖源中蛋鸡的氨排放量最大.

(2) 2017 年浙江省人为源氨排放量最大的城市是杭州市,而舟山市氨排放量最小; 衢州、嘉兴、湖州这 3 个城市农业源氨排放量占比较大; 排放强度方面嘉兴市最大,丽水市最小.

(3) 从空间分布来看,浙江省北部和东南部氨排放总量相对较大,而氨排放强度的高值区主要集中在浙江省北部和东北部.

参考文献:

[1] 王振刚, 宋振东. 湖北省人为源氨排放的历史分布[J]. 环境科学与技术, 2005, **28**(1): 70-71.
Wang Z G, Song Z D. Emission of ammonia sourced from human activities in Hubei province [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **28**(1): 70-71.

[2] Galloway J N, Zhao D W, 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.

[3] Hamaoui-Laguel L, Meleux F, Beekmann M, *et al*. Improving ammonia emissions in air quality modelling for France[J]. Atmospheric Environment, 2014, **92**: 584-595.

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

[5] 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.

[6] 林岩, 段雷, 杨永森, 等. 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, 2007, **28**(3): 640-646.
Lin Y, Duan L, Yang Y S, *et al*. Contribution of simulated nitrogen deposition to forest soil acidification in area with high sulfur deposition[J]. Environmental Science, 2007, **28**(3): 640-646.

[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] Olivier J G J, Bouwman A F, Van der Hoek K W, *et al*. Global air emission inventories for anthropogenic sources of NOx, NH_3 and N_2O in 1990[J]. Environmental Pollution, 1998, **102**(1 Suppl 1): 135-148.

[9] 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.

[10] 尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 等. 长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 94-101.
You X Y, Liu Z, Zhang Q M, *et al*. Anthropogenic ammonia emission inventory and its spatial distribution in Chang-Zhu-Tan Region[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 94-101.

[11] Wu S P, Zhang Y J, Schwab J J. *et al*. High-resolution ammonia emissions inventories in Fujian, China, 2009-2015[J]. Atmospheric Environment, 2017, **162**: 100-114.

[12] 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.

[13] 栗世学, 郭文凯, 何昕, 等. 兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1172-1178.
Li S X, Guo W K, He S, *et al*. Inventory and spatiotemporal distribution of ammonia emission from agriculture and animal husbandry in Lanzhou City[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1172-1178.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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 and Control, 2016, **38**(10): 41-46.

[17] 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.

[18] 浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2018[M]. 北京：中国统计出版社, 2018.

[19] 中国城市建设统计年鉴委员会. 中国城市建设统计年鉴 2018[M]. 北京：中国统计出版社, 2018.

[20] 浙江省统计局. 浙江自然资源与环境统计年鉴 2018[M]. 北京：中国统计出版社, 2018.

[21] 环保部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行)[M]. 北京：中国环境科学出版社, 2014.

[22] Huang X, Song Y, Li M M, *et al*. A high-resolution ammonia emission inventory in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, **26**(1): GB1030.

[23] 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.

[24] Zhang Y S, Luan S J, Chen L L, *et al*. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China[J]. Journal of Environmental Management, 2011, **92**(3): 480-493.

[25] 边武英. 浙江省标准农田土壤酸碱度现状及改良措施[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(22): 10605-10607.
Bian W Y. Status of Soil pH values of standardized farmlands in Zhejiang province and its improvement measures[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, **37**(22): 10605-10607.

[26] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 我国水稻、小麦、玉米基肥和追肥用量及比例分析[J]. 土壤通报, 2008, **39**(2): 329-333.
Wang J Q, Ma W Q, Jiang R F, *et al*. Analysis about amount and ratio of basal fertilizer and topdressing fertilizer on rice, wheat, maize in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, **39**(2): 329-333.

[27] 国家发展改革委, 农业部, 财政部. 关于印发"十二五"农作物秸秆综合利用实施方案的通知[EB/OL]. http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201112/t20111221_617842.htm, 2011-11-29.

[28] 李新兴. 杭州市道路机动车污染物排放特征及减排策略研究[D]. 杭州：浙江大学, 2013.

[29] 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.

[30] 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.

[31] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 186-194.
Lu B, Kong S F, Han B, *et al*. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent in 2007[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(2): 186-194.

[32] 王书伟, 廖千家骅, 胡玉婷, 等. 我国 NH_3-N 排放量及空间分布变化初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(3): 619-626.

Wang S X, Liao Q J H, Hu Y T, *et al*. A preliminary inventory of NH_3-N emission and its temporal and spatial distribution of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(3): 619-626.

[33] 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.

[34] 房效凤, 沈根祥, 徐昶, 等. 上海市农业源氨排放清单及分布特征[J]. 浙江农业学报, 2015, **27**(12): 2177-2185.
Fang X F, Shen G X, Xu C, *et al*. Agricultural ammonia emission inventory and its distribution characteristics in Shanghai [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, **27**(12): 2177-2185.

[35] 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.

[36] 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.

[37] 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.

[38] 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.

[39] 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.

[40] 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.

[41] 程龙. 京津冀农业氨排放清单建立及其控制方案研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.

[42] 清华大学. 中国多尺度排放清单模型 MEIC(Multi-resolution Emission Inventory for China) [EB/OL]. http://www.meicmodel.org/, 2018-01-15.

[43] Wang C, Yin S S, Bai L, *et al*. High-resolution ammonia emission inventories with comprehensive analysis and evaluation in Henan, China, 2006-2016 [J]. Atmospheric Environment, 2018, **193**: 11-23.

[44] 杨新明, 庄涛, 周伟, 等. 山东省农业源氨排放清单研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, **35**(6): 568-574.
Yang X M, Zhuang T, Zhou W, *et al*. Agricultural ammonia emission inventory in Shandong province [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, **35**(6): 568-574.

[45] 冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 等. 四川省2005~2014年农业源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2728-2737.
Feng X Q, Chen J H, Jiang T, *et al*. Agricultural ammonia emission inventory and its spatial distribution in Sichuan province from 2005 to 2014[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2728-2737.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2020

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020 ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, *et al.* (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ in Chengdu Based on the MARGA ····· YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, *et al.* (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in $PM_{2.5}$ in Suqian City ····· MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, *et al.* (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu ····· LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, *et al.* (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan ····· LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, *et al.* (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of $PM_{2.5}$ in Winter of Xi'an ····· YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, *et al.* (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta ····· DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, *et al.* (3932)
Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City ····· CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, *et al.* (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area ····· WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, *et al.* (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer ····· YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction ····· QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, *et al.* (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province ····· ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, *et al.* (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas ····· ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, *et al.* (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City ····· HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, *et al.* (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin ····· ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, *et al.* (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area ····· CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, *et al.* (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin ····· LI Xiao, YU Shi, LI Liang, *et al.* (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River ····· JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017 ····· LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, *et al.* (4042)
Influence of *Potamogeton crispus* on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure ····· KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, *et al.* (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir ····· LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, *et al.* (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyflouralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks ····· SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water ····· ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, *et al.* (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir ····· LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, *et al.* (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of *Cylindrospermopsis raciborskii* Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources ····· YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, *et al.* (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion ····· LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, *et al.* (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer ····· ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City ····· LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, *et al.* (4113)
Adsorption of Sb(Ⅴ) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism ····· SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, *et al.* (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation ····· ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, *et al.* (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater ····· LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, *et al.* (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process ····· MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, *et al.* (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature ····· LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiong'an New District ····· GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, *et al.* (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example ····· WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, *et al.* (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China ····· ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, *et al.* (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province ····· ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, *et al.* (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress ····· HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, *et al.* (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of *Hylotelephium spectabile* Under Field Conditions ····· GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, *et al.* (4226)
Effects of *Eucalyptus* Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a *Eucalyptus* plantation in Northern Guangxi ····· DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, *et al.* (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil ····· YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources ····· WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, *et al.* (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields ····· LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, *et al.* (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River ····· ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, *et al.* (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau ····· LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, *et al.* (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland ····· CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, *et al.* (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content ····· SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, *et al.* (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou ····· WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, *et al.* (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism ····· LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, *et al.* (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil ····· LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, *et al.* (4333)