

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)

河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)

海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)

环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测 李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)

环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)

海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)

水稻土中氮素对微生物固砷的扰动及效应机制 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)

中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)

中国油气系统甲烷逸散排放估算 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)

2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)

九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征 程宏, 陈荣 (4924)

厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)

九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)

福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)

厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)

改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附 赵浩, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)

基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)

紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 谯扬 (4992)

研究报告

2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)

伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)

城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)

南京北郊 BTEXS 特征及健康风险评估 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)

我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奕, 马长文, 叶建锋 (5040)

东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)

长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)

青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 刘智琦, 潘保柱, 韩语, 李刚, 王韬轶 (5073)

基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水地球化学特征及控制因素 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)

丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)

镉沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)

基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇, 厉巍 (5115)

寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)

中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新 (5131)

硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)

不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 缙广林 (5149)

不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)

基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)

基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)

基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)

老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)

磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)

牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)

磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和镉累积的影响 帅祖革, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)

重庆开州区菜地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 方林发, 叶莘莘, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)

基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)

黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)

土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)

氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)

碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)

中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 顾斌斌, 杜海波 (5305)

京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束樞 (5315)

我国塑料污染防治政策分析与建议 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

《环境科学》征订启事 (4821) 《环境科学》征稿简则 (5213) 信息 (5052, 5191, 5273)

2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征

李香^{1,2}, 吴水平^{1,2*}, 姜炳棋³, 刘怡靖³

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门 361102; 3. 福建省环境科学研究院, 福州 350013)

摘要: 收集厦漳泉地区各类大气氨排放源的区县活动水平, 基于排放因子法建立了 2017 年大气氨排放清单(1 km × 1 km), 同时对 2015 ~ 2020 年大气氨排放趋势进行了分析. 结果表明, 厦漳泉 2017 年大气氨排放量为 27.40 kt, 其中畜禽养殖、农田生态系统、人体排放、燃料燃烧和废物处理占排放总量的比例分别为 42.48%、22.04%、14.71%、7.08% 和 5.69%. 大气氨排放密度顺序为: 厦门(1.94 t·km⁻²) > 泉州(1.07 t·km⁻²) > 漳州(0.95 t·km⁻²), 高值区主要分布于人口集中的沿海城区和畜禽养殖业与种植业发达的内陆乡镇地区, 氨排放量月度分布与温度变化规律一致. 受不同地市经济结构和发展水平的影响, 2015 ~ 2020 年泉州市氨排放表现为下降, 而厦门和漳州两市氨排放变化存在一定的波动, 氨排放强度整体呈现随人均 GDP 上升而下降的趋势.

关键词: 大气氨; 排放清单; 时空分布; 排放密度; 厦漳泉地区

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-4914-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202006

Atmospheric NH₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020

LI Xiang^{1,2}, WU Shui-ping^{1,2*}, JIANG Bing-qi³, LIU Yi-jing³

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen 361102, China; 3. Fujian Provincial Academy of Environmental Science, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Based on the district and county activity level data of different types of atmospheric ammonia (NH₃) emission sources in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou (XZQ) Region and the modified emission factors, an ammonia emission inventory with a spatial resolution of 1 km × 1 km in 2017 was established. In addition, the annual variations in NH₃ emission from 2015 to 2020 in this region were analyzed. The results showed that the emission of NH₃ in the XZQ Region in 2017 was 27.40 kt with livestock and poultry breeding, farmland ecosystem, human emission, fuel combustion, and waste treatment accounting for 42.48%, 22.04%, 14.71%, 7.08%, and 5.69% of the total emission, respectively. The order of emission density of NH₃ was Xiamen (1.94 t·km⁻²) > Quanzhou (1.07 t·km⁻²) > Zhangzhou (0.95 t·km⁻²). High values of emission density were mainly concentrated in the coastal urban areas with a concentrated population and the inland township areas with developed livestock and poultry breeding and planting industries. The monthly variation in NH₃ emissions was consistent with the pattern of temperature change, with high values in summer. Due to the different economic structure and development level in different cities, NH₃ emissions in Quanzhou City showed a decline from 2015 to 2020, whereas there were fluctuations in the trends of ammonia emissions in Xiamen and Zhangzhou cities. The relationship between NH₃ emission intensity and per capita GDP was significantly negative.

Key words: atmospheric NH₃; emission inventory; tempo-spatial distribution; emission density; Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou (XZQ) region

氮循环是全球生物地球化学循环的重要组成部分, 氨(NH₃)是氮循环中的重要物质之一. 大气中的氨能与 SO₂ 和 NO_x 等酸性气体发生中和反应, 生成硫酸铵和硝酸铵等二次无机气溶胶, 这些铵盐是大气 PM_{2.5} 的重要组成部分, 可导致大气能见度下降, 影响人体健康^[1,2]. 大气氨浓度过高还会增加对流层中羟基自由基的消耗, 影响甲烷的氧化作用, 加剧温室效应^[3]. 此外, 气态氨及颗粒态铵盐经大气沉降还会增加地表环境氮负荷, 引起土壤酸化和水体富营养化等一系列环境问题^[4,5]. 因此, 了解大气氨的排放水平和时空分布特征对降低大气 PM_{2.5} 污染和改善生态环境具有重要意义.

人为源大气氨可分为农业源和非农业源两类一级源, 其中农业源主要包括农田生态系统和畜禽养殖两类, 非农业源主要包括燃料燃烧、移动源、废弃物处理、生物质燃烧、化工生产和人体排放

等^[6]. 近些年, 在国家、区域和城市尺度上都开展了大气氨排放清单研究^[7-14], 部分研究将排放清单应用于空气质量模型, 进一步明确气态氨是影响大气 PM_{2.5} 的关键前体物^[15,16]. 大气氨排放的空间分布特征, 受区域内社会因素和自然因素的双重影响. 一般而言, 在城市及更大尺度上, 大气氨主要来自农业源的贡献, 而在人口和路网密集的城市建成区内, 人体排放、废弃物处理、化石燃料燃烧等非农业源氨的贡献更大^[17]. 在城市区域, 由于 NH₃、SO₂ 和 NO_x 的排放空间分布高度吻合, NH₃ 更易转化为 NH₄⁺, 且非农业源氨的排放季节特征也不同于农业源

收稿日期: 2022-02-04; 修订日期: 2022-03-21

基金项目: 福建省科技计划项目省属公益类科研院所基本科研专项(2020R1015002)

作者简介: 李香(2000 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染源排放清单, E-mail: 1332503139@qq.com

* 通信作者, E-mail: wsp@xmu.edu.cn

氨^[12,18]. 2013~2017 年安徽省和江苏省人为源氨排放量都呈下降趋势, 下降幅度分别为 3.3% 和 10.0%, 但此期间安徽省畜禽养殖氨排放量却一直处于持续增加状态^[8,9]. 2018 年山东省人为源氨排放量相比于 2012 年下降了 26.3%, 下降主要来自畜禽养殖的贡献^[10]. 2012~2015 年福建省人为源氨排放总量与非农业源氨排放量都呈增加趋势, 但畜禽养殖氨排放量为下降趋势^[17]. 以上研究表明, 在社会经济发展和城市化进程不断推进的背景下, 大气氨排放的时空格局会发生改变, 大气氨排放清单需要及时更新.

厦漳泉(XZQ)城市群包括闽南地区的厦门、漳州和泉州这 3 市(金门县资料暂缺), 尽管土地面积仅占福建省的 20.87%, 但 GDP 和人口却占到福建省的 47.9% 和 47.6% (图 1), 该区域已成为海峡西岸经济发展的重要引擎之一. 尽管近几年厦漳泉地区大气 PM_{2.5} 年均浓度呈逐年下降趋势且已达到《环境空气质量》(GB 3095-2012) 二级标准 (35 μg·m⁻³), 但仍远高于世界卫生组织最新的 PM_{2.5} 年均目标值 5 μg·m⁻³. 前期研究也显示, 福建沿海城市(含厦门和泉州)大气 PM_{2.5} 中硫酸铵和硝酸铵的质量贡献为 39.8%~46.1%^[16], 气态氨对厦门湾大气氮沉降的贡献为 27.4%~28.2%^[17], 大气氨的环境影响日益突出. 针对厦漳泉地区的大气污染现状, 有必要研究该地区大气氨的排放特征, 建立精细化的大气氨排放清单, 为深入了解氨排放对 PM_{2.5} 的影响提供基础数据. 为此, 本研究基于统计年鉴和第二

次全国污染普查(二污普)提供的活动水平数据, 结合文献[6]的测算方法与排放因子, 建立 2015~2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单, 分析其演变趋势, 以期为进一步提升空气质量和减少大气氮沉降提供参考.

1 材料与方法

1.1 数据来源

基于二污普数据的获取年份, 本研究以 2017 年为基准年估算大气氨排放. 根据前期调研和文献[6]给出的分类方法, 将氨排放源分为农业源和非农业源两类一级源. 农业源包括: 畜禽养殖(猪、牛、羊、鸡、鸭、鹅和家兔)和农田生态系统(氮肥施用、秸秆堆肥、固氮作物和土壤本底)两大类二级源; 非农业源包括: 人体排放(呼吸、排汗、排泄、抽烟、染发和婴儿尿布)、生物质燃烧(生物燃料、露天焚烧和森林火灾)、化石燃料燃烧(煤、油、天然气和液化石油气)、废物处理(污水处理厂、垃圾填埋和垃圾焚烧)、移动源(机动车尾气和农业机械)、化工生产、城市宠物(猫和狗)和城市绿地等 10 类. 排放源活动水平主要来自地方统计年鉴^[19~21], 工业点源和畜禽养殖的空间分布信息来自二污普. 对于部分区县缺乏统计数据, 则基于土地利用类型、路网、人口和经济指标等信息对地市统计数据再进行再分配得到. 估算氨排放需要用到的气象数据如温度和降水等来自厦门市气象站 (<https://www.rp5.ru/>).

1.2 氨排放量估算

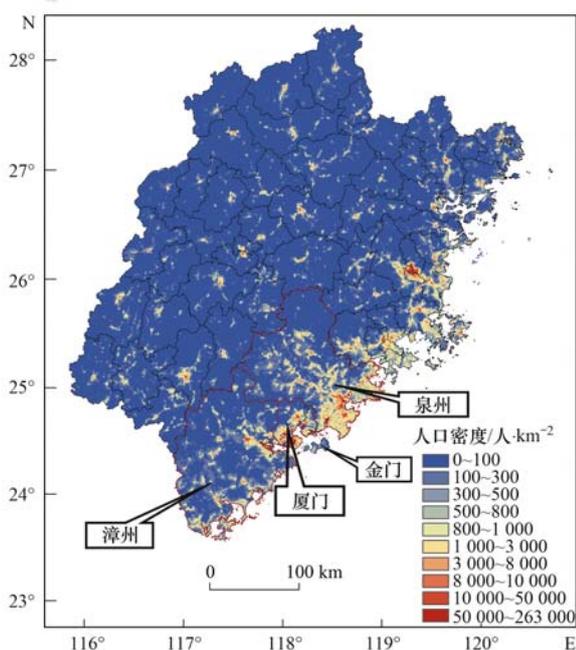
采用文献[6]给出的排放因子法来估算大气氨排放量, 计算公式如下:

$$E_{ij} = \sum_j (A_{ij} \times EF_{ij} \times \gamma) \quad (1)$$

式中, E 为氨排放量(t), i 为地区, j 为氨排放源类别, A 为活动水平, EF 为排放因子, γ 为氮-大气氨转换系数(畜禽养殖业取 1.214, 其他行业取 1.0). 排放因子主要依据指南中推荐的排放因子本地化计算方法, 依据本地区实际情况计算得到本地化排放因子; 对于指南中没有的排放因子, 则采用国内外相关研究提供的数据. 不同排放源氨排放量估算中的活动水平数据的处理方法和排放因子的选取等都有所不同, 下面分别介绍.

1.2.1 畜禽养殖

畜禽排放是大气氨的主要来源之一, 排放途径主要为畜禽排泄物释放, 排泄物总量(液态和固态)和释放程度直接影响氨的排放量. 因此, 在估算畜禽养殖氨排放时, 要考虑养殖动物种类(母猪、奶牛、耕牛、肉牛、母羊、蛋鸡、蛋鹅、肉鸡、肉鸭、猪、



红线范围为厦漳泉地区

图 1 福建省人口密度分布

Fig. 1 Map of population density in Fujian Province

兔和山羊)、年龄(猪牛羊按照幼崽和成年分别计算)、养殖方式(散养和集约化)、排泄物管理阶段(户外、圈舍内、粪便储存处理和后续施肥)和温度等因素的影响^[17]。

依据文献[22],奶牛(>1 a)、耕牛(>1 a)、肉牛(>1 a)、猪(>75 d)和山羊(>1 a)的数量占比分别为 29.54%、24.36%、27.59%、39.44% 和 19.28%。由于母猪、奶牛、耕牛、肉牛、母羊、蛋鸡、蛋鹅和山羊的饲养周期超过 1 a,则按照年末存栏数来统计,而肉鸡、肉鸭、肉鹅、猪和家兔等则按照年内出栏数来统计。因统计年鉴中只有禽蛋产量,蛋鸡和蛋鸭的年末存栏数要按照蛋产量来间接估算:

$$A_i = O_i / (M_i \times N_i) \quad (2)$$

式中, A 为家禽年末存栏数(个), i 为蛋鸡或蛋鸭, O 为禽蛋总产量(t), M 为单个禽蛋平均重量($g \cdot \text{个}^{-1}$), N 为家禽年均产蛋数(个)。

根据我国畜禽集约化养殖划分标准和本地区畜禽养殖在不同养殖规模下饲养统计量,得出生猪、肉鸡和蛋鸡集约化养殖率分别为 47.62%、87.71% 和 38.92%,其他畜禽养殖均按照散养来考虑。根据文献[6]中的计算方法,不同养殖方式和不同粪便管理阶段铵态氮(TAN)的计算公式为:

$$\text{TAN}_{\text{室内,户外}} = \text{畜禽年内饲养量} \times \text{单位畜禽排放量} \times \text{含氮量} \times \text{铵态氮比} \times \text{室内户外} \quad (3)$$

$$A_{\text{户外}} = \text{TAN}_{\text{户外}} \quad (4)$$

$$A_{\text{圈舍}} = \text{TAN}_{\text{室内}} \times X \quad (5)$$

$$A_{\text{存储}} = A_{\text{圈舍}} - A_{\text{圈舍}} \times \text{EF}_{\text{圈舍}} \quad (6)$$

$$A_{\text{施肥}} = (A_{\text{存储}} - A_{\text{存储}} \times \text{EF}_{\text{存储}} - \text{EN}_{\text{N损失}}) \times (1 - R_{\text{饲料}}) \quad (7)$$

式中,单位畜禽排放量、含氮量、铵态氮比例、排放因子(EF)和存储过程中氮的损失($\text{EN}_{\text{N损失}}$)等参数来自文献[6]; A 为不同管理阶段铵态氮量; X 为液态或固态粪便占总排泄物的比例(散养方式液态粪便占比为 11%,集约化养殖畜类和禽类的液态粪便占比分别为 50% 和 0); $R_{\text{饲料}}$ 为粪肥用作生态饲料的比重,只考虑集约化养殖过程,猪和鸡分别取值 30% 和 50%,其他养殖动物取 0。

1.2.2 农田生态系统和生物质燃烧

农田生态系统氨排放主要包括氮肥施用、固氮

植物、秸秆堆肥和土壤本底,其中氮肥施用是大气氨的另一个重要来源。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(温度、降水和风速)和土壤特性(土壤 pH、含水量和钙含量等)等因素的影响^[23]。本研究基于 2015 ~ 2020 年厦漳泉 3 地市统计年鉴得到农用化肥施用量数据(折纯),再按照一定比例分配至尿素、碳酸氢铵、硝酸铵、硫酸铵、磷酸二铵和复合肥(表 1)。根据英国国家氨减排措施评价系统(NARSES)模型,某种肥料施用后氨排放因子是土壤 pH 值(soil pH)、土地类型(landuse)、肥料使用强度(rate)、降雨(rainfall)和温度(temperature)的函数^[17],计算公式如下:

$$\text{EF}_i = \text{EF}_{i, \text{max}} \times \text{RF}_{\text{soil pH}} \times \text{RF}_{\text{landuse}} \times \text{RF}_{\text{rate}} \times \text{RF}_{\text{rainfall}} \times \text{RF}_{\text{temperature}} \quad (8)$$

式中, EF_i 为一定条件下施用肥料 i 的氨排放因子, $\text{EF}_{i, \text{max}}$ 为施用肥料 i 的最大潜在氨排放因子, RF 为不同影响因素的衰减因子。土壤酸度是影响氨挥发的重要因素之一,碱性土壤更有利于氨挥发释放。徐福祥等^[24]给出 2009 年厦门、漳州和泉州土壤 pH 均值分别为 5.81、5.21 和 5.46。在此条件下,硫酸铵和磷酸二铵施用后土壤酸度衰减因子取值为 0.088 9,其他肥料为 1^[17,25]。植株较高的果园和茶园,需要考虑植被冠层对地表风速和温度的影响,该土地类型氨挥发衰减因子取值 0.7^[17]。根据中国不同区域化肥使用强度的调研结果^[26],福建省属于高施氮区($>400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),因此,氮肥使用强度衰减因子取 1.0^[27];根据 NARSES 模型,只有当降雨强度较大时才会影响土壤中的氨挥发,在 24、24 ~ 48、48 ~ 72、72 ~ 96、96 ~ 120 和 $>120 \text{ h}$ 时段内降雨量 $>10 \text{ mm}$ 时,相应的降雨衰减因子为 0.75、0.80、0.85、0.90、0.95 和 1.0。温度是影响土壤中氨挥发的重要气象因子,可根据月均气温(T_{month})与年均气温(T_{year})之差来间接估算不同温度下氨挥发衰减因子^[17,27],一定温度下尿素和其他氮肥施用后氨挥发衰减因子的计算公式如下:

$$\text{RF}_{\text{temperature, 尿素}} = 0.5 \times \exp[0.1386 \times (T_{\text{month}} - T_{\text{year}})/3] \quad (9)$$

$$\text{RF}_{\text{temperature, 其他肥料}} = 0.5 \times \exp[0.2197225 \times (T_{\text{month}} - T_{\text{year}})/3] \quad (10)$$

表 1 不同施肥比例及最大潜在氨排放因子^[17,22]/%

Table 1 Different fertilizing proportion and the maximum potential emission factors of NH_3 /%

项目	尿素	碳酸氢铵	硝酸铵	硫酸铵	磷酸二铵	复合肥
施用份额	67 ¹⁾	31 ¹⁾	0.83 ¹⁾	0.1 ¹⁾	30 ²⁾	15 ³⁾
N 含量	46	17	33	20	18	15
$\text{EF}_{\text{max}}/\text{N}$ 含量	45	10(旱地); 20(水田)	4	45	45	5

1) 在氮肥中; 2) 在磷肥中; 3) 在其它肥料中

农田生态系统中的固氮植物,在漳州和泉州考虑大豆、花生和绿肥这 3 种,在厦门只考虑大豆和花生这 2 种,活动水平为固氮植物的耕种面积.农作物秸秆处理方式有露天焚烧、燃料燃烧和堆肥这 3 种,根据粮食和经济作物产量统计数据,结合草谷比估算出秸秆产量,再结合干物质比例、燃烧比例、燃烧系数、堆肥比例和排放因子计算 3 种秸秆处理方式下氨排放量.此外,土壤本身也会挥发一部分氨进入大气,相应排放因子和参数选择参见指南和前期研究^[6,17].生物质燃烧部分,除农作物秸秆外,还包括薪柴燃烧和森林火灾.薪柴产量根据统计年鉴中木材和毛竹采伐量计算得到,排放因子参考秸秆燃烧的排放因子^[17],而森林火灾为偶发事件,在估算时未考虑.

1.2.3 道路移动源

道路移动源包括机动车尾气和农用机械 2 大类.农用机械活动水平数据由统计年鉴中农用柴油使用量统计所得.机动车在行驶过程中通过尾气管排放的氨受机动车类型、燃油类型和行驶里程影响,在交通路网密集区域,机动车尾气氨的排放不可忽略.根据统计年鉴,机动车类型分为客车、货车和摩托车,其中客车又分为大型、中型、小型和微型,货车又分为重型、中型、轻型和微型.自 2015 年后,厦漳泉 3 市开始陆续投放新能源公交车、出租车和小汽车,在计算活动时按照市场占有率进行扣除.由于公交车和出租车出行规律不同于其他车辆,在计算时单独列出.文献^[6,17]将机动车分为小型客车、小型货车、大型客车、大型货车、摩托车、公交车和出租车这七类,燃油类型分汽油/燃气和柴油两类(表 2).根据不同类型机动车保有量、年均行驶里程和排放因子估算道路移动源氨排放量:

$$E = \sum_m P_{m,n} \times VKT_m \times EF_{m,n} \quad (11)$$

式中, E 为机动车氨排放量, m 为车辆类型, n 为燃油类型, P 为机动车保有量, VKT 为 m 车型年均行驶里程, EF 为排放因子^[17].

表 2 厦漳泉地区 2017 年机动车类型和年均行驶里程

Table 2 Types of motor vehicles and average annual mileage in XZQ region in 2017

车辆类型	汽油/燃气车 占比/%	柴油车占比 /%	年均行驶 $\times 10^4$ /km
小型客车	99.78	0.22	1.94
小型货车	88.4	11.6	2.04
大型客车	61.06	38.94	2.78
大型货车	8.34	91.66	2.71
摩托车	100	/ ¹⁾	0.52
公交车	22.8	77.2	7.30
出租车	100	/ ²⁾	20.82

1) 由于国内无柴油发动机摩托车,故无柴油车占比; 2) 由于国内未引进柴油发动机出租车,故无柴油出租车占比

1.2.4 燃料燃烧

尽管化石燃料燃烧过程中氨排放的贡献很小且存在较大的不确定性,但化石燃料的使用量大,其燃烧导致的氨排放也不可忽略.根据燃料类型和使用部门分为居民生活和工业生产燃烧的煤、油和天然气.其中,不同居民人均生活能源消费量来自中国能源统计年鉴^[26],再结合各地市常住人口数进行估算;工业燃料燃烧量可由各地市统计年鉴获得.燃料燃烧源中的氨排放因子采用 USEPA 提供的数据^[27],工业燃煤、燃油和燃气氨排放因子分别为 $0.02 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $51.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,民用燃煤、燃油和燃气氨排放因子分别为 $0.9 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $0.12 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $320.51 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.2.5 人体排放

人体排放氨主要包括人体正常的代谢过程(呼吸、出汗和排泄)、吸烟、染发和婴儿尿布.人体排放产生的氨与人口数量关系密切,本研究采用统计年鉴中厦漳泉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取 $0.25 \text{ kg}\cdot\text{人}^{-1}$,而农村人口的排放因子取 $0.787 \text{ kg}\cdot\text{人}^{-1}$.

1.2.6 其他排放源

废物处理包括污水处理厂、垃圾填埋、垃圾焚烧和烟气脱硝这 4 种,其中污水处理过程中氨排放因子取值 $0.28 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[28],垃圾填埋、垃圾焚烧和烟气脱硝过程中氨排放因子 ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$) 分别为 0.56、0.21 和 0.155 (SCR) 或 0.17 (SNCR)^[6].厦漳泉 3 市污水处理厂日处理量来自二污普数据,生活垃圾清运量来自统计年鉴.研究区生活垃圾已全部实现无害化处理,其中焚烧处理占比为 74%.烟气脱硝过程中氨排放量基于火力发电、钢铁和水泥生产燃煤的消耗量进行估算,燃煤量来自二污普数据.

化工生产中涉及到的氨排放行业主要包括合成氨和化肥生产,合成氨和化肥生产企业的氨排放量数据来自二污普.由于厦门市和泉州市均仅有一家化肥生产公司,且氨排放量每年仅有 0.001t,故在本研究中没有考虑;漳州市有 28 家化肥生产公司,合成氨和化肥生产的排放因子分别为 $0.01 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 和 $5 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ^[6].

城市绿地氨挥发按照年施氮量为 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和挥发损失率为 2.5%,计算得到氨排放因子为 $5.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[29],高于文献报道草坪表面氨排放因子 $3.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[30].设区市绿地总面积来自统计年鉴,再根据建成区面积和土地利用类型划分到不同区县.

随着社会经济的发展,人民生活水平的逐渐提高,使得宠物(主要为猫和狗)成为越来越多家庭的成员,宠物数量呈逐渐增长的趋势.由于难以获得饲养宠物的具体数量,按照每13人饲养一只宠物来估算饲养总量,其中猫和狗的占比分别为19%和62%^[17],采用的氨排放因子分别为 $0.11 \text{ kg}\cdot\text{只}^{-1}$ 和 $0.61 \text{ kg}\cdot\text{只}^{-1}$ ^[31].

1.3 时空分配

氨排放清单估算采用的活动水平数据都是按照年度数据进行统计,部分活动水平数据也只有区、市的统计数据.因此,需要基于空间特征表征数据、活动水平和气象因素的季节变化规律,对排放清单进行时空分配.常见的空间特征表征数据有人口密度分布数据、土地利用分类数据、路网数据等,主要来自国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn/index.html>)和中国科学院资源与环境科学数据中心的土地利用数据(<http://www.resdc.cn>),利用ArcGIS地理信息系统基于空间表征数据将大气氨排放量分配到 $1 \text{ km}\times 1 \text{ km}$ 的网格.参照文献[33]的方法,将畜禽养殖、农田生态系统、生物质燃烧、城市绿地、人体排放和饲养宠物以面源形式进行空间分配,将道路移动源以线源形式进行分配.对于畜禽养殖源,由于不同养殖阶段污染物排放的空间特征存在较大差异,在户外、圈舍和储存畜禽粪便管理阶段排放的氨主要汇聚在农村居民点附近的畜禽养殖场,后续施肥阶段的畜禽粪便用于农作物播种生长,与耕地面积相关,因此畜禽养殖源根据农村居民区面积及耕地面积进行空间分配^[32];生物质燃烧按照MODIS火点图、农村居民区面积和耕地面积进行分配;人体排放和饲养宠物源以人口密度栅格矢量数据进行分配.道路移动源按照道路级别、道路长度和交通流量数据分配至网格中的不同路段^[33].氮肥施用排放源按照不同粮食作物和经济作物的生长季节分配每月的施肥比例,

对于作物秸秆堆肥、生物质露天焚烧、工业燃料燃烧和污水处理,则分别采用每月粮食产量、MODIS火点数、工业产品产量和每月污水处理量等指标进行月度分配,其他排放源活动水平未考虑时间变化.

2 结果与讨论

2.1 2017年厦漳泉地区大气氨排放清单

厦漳泉地区大气氨排放清单如表3所示.从中可见,2017年大气氨排放总量为27.40 kt,畜禽养殖是本地区最大的氨排放源,排放量为11.64 kt,占大气氨排放总量的42.48%,接近于西安市、郑州市和福建省的研究结果(43.07%~43.57%)^[11,12,17],但远低于山东省、珠三角地区和长株潭地区的研究结果(58.6%~67.2%)^[10,13,34].农田生态系统是第二大排放源,排放量为6.04 kt,占大气氨排放总量的比例为22.04%.由于厦漳泉各市经济结构的不同,畜禽养殖和农田生态系统氨排放量的相对占比存在较大差异.漳州市粮食、蔬菜和水果种植业发达,施肥量大,农田生态系统氨排放的相对占比最高(30.66%);厦门市农业用地很少,农田生态系统氨排放仅占3.63%,泉州市则处于厦门与漳州之间.漳州和泉州畜禽养殖业氨排放相对占比显著高于厦门;而且,3个地区畜禽养殖动物的组成结构也存在不同,其中厦门市肉牛和生猪的氨排放占畜禽养殖业氨排放总量的比例最大,分别为63.98%和23.32%,漳州市以肉鸡和肉鸭的占比最大(24.95%和27.09%),而泉州市以肉牛和蛋鸡的占比最大(28.24%和17.57%).

厦漳泉不同地区非农业源氨的排放占比差异也很显著,其中厦门市人体排放和废物处理氨排放占比之和超过50%,而漳州市和泉州市相应的占比只有13.23%和19.38%,主要与厦门市农业源活动水平低、用水量大和生活垃圾产生量大等因素有关.泉州市由于工业发达,化石燃料消耗量大,燃料燃烧

表3 2017年厦漳泉地区大气氨排放清单

Table 3 NH_3 emission inventory in XZQ region in 2017

排放源	厦门		漳州		泉州		厦漳泉	
	排放量/kt	分担率/%	排放量/kt	分担率/%	排放量/kt	分担率/%	排放量/kt	分担率/%
畜禽养殖	0.87	26.28	5.87	48.00	4.90	41.33	11.64	42.48
农田生态系统	0.12	3.63	3.75	30.66	2.17	18.26	6.04	22.04
人体排放	0.63	19.03	1.37	11.19	2.03	17.11	4.03	14.71
饲养宠物	0.15	4.53	0.16	1.28	0.27	2.25	0.58	2.12
城市绿地	0.11	3.32	0.04	0.30	0.10	0.85	0.25	0.91
生物质燃烧	0.02	0.60	0.46	3.78	0.32	2.67	0.8	2.92
道路交通源	0.24	7.25	0.09	0.70	0.25	2.11	0.58	2.12
燃料燃烧	0.13	3.93	0.25	2.04	1.56	13.15	1.94	7.08
废物处理	1.04	31.42	0.25	2.04	0.27	2.27	1.56	5.69
化工生产	0	0	0.002	0.02	0	0	0.002	0.01
合计	3.31		12.24		11.86		27.40	

氨排放占比为 13.15%, 远高于厦门(3.93%)和漳州(2.04%), 但厦门市道路交通源氨排放占比最大, 为 7.25%, 明显高于漳州(0.70%)和泉州(2.11%)。2017 年厦漳泉 3 地机动车保有量分别为 146.4、99.4 和 236.5 万辆, 且漳州和泉州两地的集装箱和石材进出口都要经由厦门港, 大量货车在厦门境内通行, 同时厦门市旅游业发达, 也增加了道路机动车通行量; 此外, 2017 年泉州市摩托车保有量为 108.4 万辆, 远高于厦门的 21.5 万辆, 摩托车的年均行驶里程偏低(表 2), 综合作用导致厦门地区道路交通源氨排放量接近泉州。在城市化进程不断推进和机动车保有量不断增加的背景下, 非农业源氨的贡献需要更加重视。

2017 年厦漳泉地区大气氨排放密度的均值为 $1.07 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$, 其中厦门市大气氨排放密度 ($1.94 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$) 明显高于漳州市 ($0.95 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$) 和泉州市 ($1.07 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$), 可能与厦门市人口密度大、交通路网密集、污染排放源集中等因素有关。与其他地区的研究数据相比, 厦漳泉地区大气氨排放密度明显低于西安市 ($4.57 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$)^[11]、郑州市 ($2.34 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$)^[12]、长株潭地区 ($2.59 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$)^[13]、山东省 ($4.80 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$)^[10] 和江苏省 ($5.3 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$)^[9], 与浙江省的氨排放密度接近 ($0.91 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$)^[35]。不同地区大气氨排放密度的差异, 除了与实际大气氨排放源的活动水平有关外, 还受排放源的细分、排放因子的选取和计算方法的影响。此外, 经济发展水平与经济结构也可能影响大气氨的排放。计尧等^[12]发现郑州市不同区县人均 GDP 与氨排放密切相关, 呈现类似环境库兹涅茨曲线的关系(“倒 U 型”)。2017 年厦漳泉人均 GDP 顺序为厦门(10.97 万元) > 泉州(8.76 万元) > 漳州(6.95 万元), 大气氨排放顺序为漳州 > 泉州 > 厦门, 而万元 GDP 大气氨排放强度顺序为漳州 [$0.347 \text{ kg}\cdot(\text{万元 GDP})^{-1}$] > 泉州 [$0.149 \text{ kg}\cdot(\text{万元 GDP})^{-1}$] > 厦门 [$0.076 \text{ kg}\cdot(\text{万元 GDP})^{-1}$], 体现经济发展水平和经济结构对大气氨排放的影响。以第二、三产业为主的地区, 人均 GDP 增加常常伴随着环境治理水平的提高, 但区域内居民增加的对水果和肉蛋奶的需求, 可能导致以第一产业为主的邻近地区增加种植面积、加大农业生产强度和施肥量, 进而使得大气氨排放增大。

2.2 氨排放清单的时空分配

2017 年厦漳泉地区 28 个区县氨排放量和排放密度汇总于图 2。从中可以看出, 漳州市南靖县氨排放量最大, 与当地有发达的生猪和禽类养殖业, 且耕地和水果种植面积大、氮肥施用量高有关。南靖县畜禽养殖和农田生态系统氨排放合计占该县总排放

量的比例高达 95.3%。南安市和安溪县大气氨排放居第 2 和 3 位, 主要排放来源自畜禽养殖和农田化肥施用, 农业源氨的排放占比为 67.2% 和 69.6%。尽管上述 3 个区县的大气氨排放量大, 但其排放密度都远低于厦门市的思明区和湖里区。思明区和湖里区位于厦门岛, 面积小但常住人口合计超过 200 万, 非农业源氨排放集中, 使得其排放因子远高于其他区县。泉州市德化县地貌以中低山地为主, 森林覆盖率约为 77%, 耕地面积少, 人口数量只有 32 万, 使得大气氨排放量和排放密度均处于较低水平。

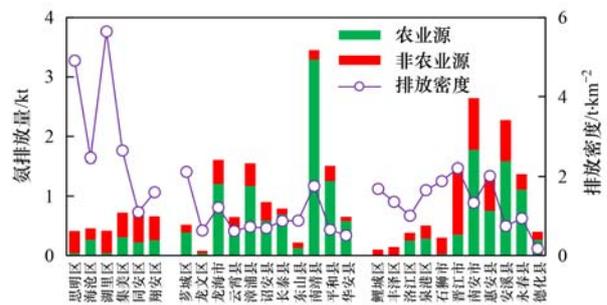


图 2 2017 年厦漳泉不同区县氨排放量与排放密度比较

Fig. 2 Comparison of NH_3 emission and emission density in different districts and counties in XZQ region in 2017

利用 ArcGIS 提取厦漳泉地理边界信息, 并结合土地利用与其他空间表征数据, 建立了 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的厦漳泉地区网格化大气氨排放清单(图 3), 可以用于后期空气质量模型的输入, 评估大气氨不同排放源对大气颗粒物污染的影响。从图 3 可知, 在沿海人口集中的中心城区和种植业与养殖业发达的内陆乡镇地区均有氨排放密度的高值区分布, 同时也发现最北部德化县、中南部龙海市山区和诏安县山区都处于排放低值区。出于运输成本的考虑, 部分集约化畜禽养殖业集中于城市周边地区, 排放的氨经扩散传输至城市地区, 影响城市空气质量和地表环境。

图 4 展示了 2017 年厦漳泉不同排放源大气氨排放量的月变化。从中可以看出, 大气氨排放量具有类似温度的月变化规律, 在温度最高的 6~9 月氨排放量也最高, 但排放量受降雨量的影响不明显; 此外, 不同排放源的月变化规律也不尽相同。畜禽养殖、燃料燃烧和道路交通源的氨排放月变化幅度小, 生物质燃烧在春耕(3 月)和夏收(8 月)时节有明显的增加, 农田生态系统、人体排放、饲养宠物和城市绿地的排放规律主要受温度影响显著, 在夏季高温季节出现排放高值。厦门湾前期大气氨浓度监测结果也显示, 大气氨浓度与温度之间具有显著的正相关关系^[36], 表明温度对城市非农业源氨的排放影响同样重要。大气氨在夏季高温季节出现高浓度, 除与该季节气态氨挥发速率升高有关外, 高温还

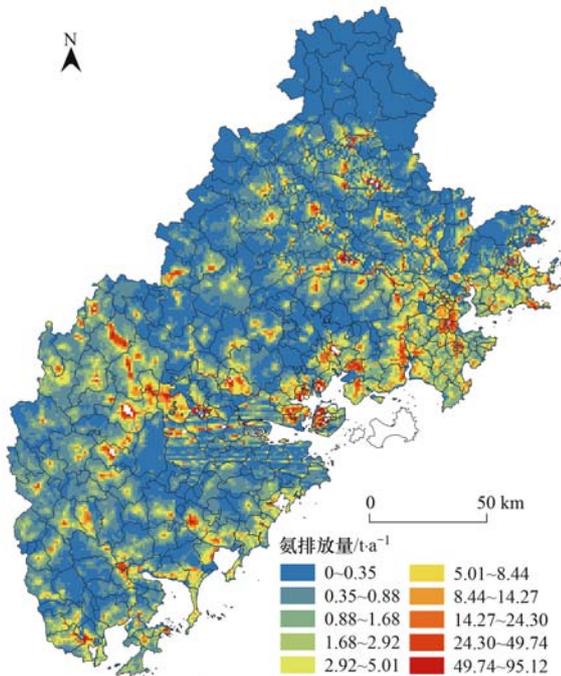


图3 2017年厦漳泉地区大气氨排放空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of atmospheric NH_3 emission in XZQ region in 2017

使得气溶胶中的硝酸铵不稳定而分解为气态硝酸和气态氨^[37],也可能增加大气环境中的气态氨浓度. 珠三角地区的研究显示,降雨中 NH_4^+ 浓度在夏季出现高值^[34],也表明夏季大气氨具有较高浓度. 大气环境中的气态氨最终通过干湿沉降进入土壤和水体环境,改变氮磷营养盐组成而可能引发水体富营养化. 厦门湾大气氮沉降的研究显示,约 60% 的大气氮沉降来自还原型氮的贡献(气态 NH_3 、颗粒态 NH_4^+ 和降水 NH_4^+),而还原型氮的大气氮沉降有近一半来自气态 NH_3 的贡献. 气态氨干沉降、颗粒态铵干沉降和湿沉降对大气氮沉降的贡献分别为 27.8%、17.4% 和 14.5%^[38].

2.3 厦漳泉大气氨排放量变化趋势

按照同样的活动水平数据收集和氨排放计算方法,同时采用 2017 年二污普调查数据中畜禽养殖、废物处理和工业企业等排放源位置信息,得到了 2015~2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单(图 5). 可以看出,3 个地区的年际变化趋势有所不同,不同排放源的变化趋势也存在一定差异. 2018 年厦门市氨排放量有一定的下降,主要来自畜禽养殖业贡献减少所致,而后在废物处理源贡献增加的驱动下,氨排放量又开始缓慢上升,至 2020 年的排放量(3.40 kt)甚至超过了 2017 年(3.31 kt). 漳州市大气氨排放量的年际变化趋势与厦门类似,也在 2018 年出现略微下降,但主要排放源的变化趋势不同,表现为畜禽养殖业氨排放呈逐年上升趋势,而农田生态系统

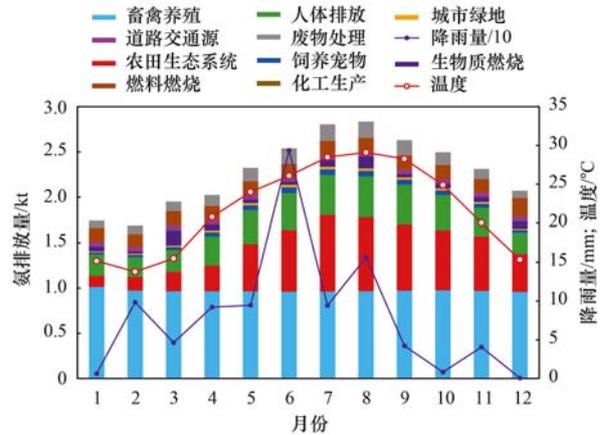


图4 2017年厦漳泉地区大气氨排放量、降雨量和温度的月变化

Fig. 4 Monthly variation in atmospheric NH_3 emission, rainfall, and temperature in XZQ region in 2017

氨排放趋势与之相反; 2018 年生猪和肉牛的氨排放量下降明显,使得畜禽养殖业氨排放总量略有下降,但肉鸡和肉鸭氨排放量基数大(占畜禽养殖排放的比例约 56%)且在 2017~2020 年之间持续增大,使得畜禽养殖业氨排放量呈增加趋势. 泉州市大气氨排在 2015~2020 年整体呈下降趋势,主要体现在畜禽养殖、农田生态系统和人体排放的排放量下降明显. 2015~2020 年间,尽管厦漳泉 3 个地区人口数量都在逐年增加,但厦门市的人体排放源为增加趋势,而漳州和泉州的人体排放源为下降趋势,主要是漳州和泉州的农业人口减少所致. 氨排放核算方法中,城市人体排泄氨排放因子远低于农村,使得漳州和泉州人体排放总量出现下降,类似变化趋势在 2013~2017 年江苏省大气氨排放清单^[9]、2008~2018 年山东省大气氨排放清单^[10]和 2007~2017 年郑州市大气氨排放清单^[12]中也有报道. 其他与城市经济发展水平和人口数量相关的非农业源(饲养宠物、城市绿地、道路移动源、燃料燃烧和废物处理),氨排放量都呈逐年增加趋势. 因此,在城市化持续推进过程中,人口由农村向城市转移,相应地城市能源消耗、废物处理量和交通流量趋于集中且逐渐增加,非农业源氨排放对大气环境和生态环境健康的重要性会更加突出.

图 6 为大气氨排放强度与人均 GDP 之间的散点图. 从中可知,两者之间呈显著负相关关系(r 为 $-0.939 \sim -0.992$, $P < 0.001$, 单侧检验),表明随着城市经济的增长,大气氨排放强度会随之下降. 主要原因是在城市区域尺度上,大气氨主要来自畜禽养殖和农田氮肥施用,而城市发展方向是向非农产业为主的现代城市转变,从而驱动大气氨排放的时空变化. 同时也应注意到,在城市人口密集区域,居

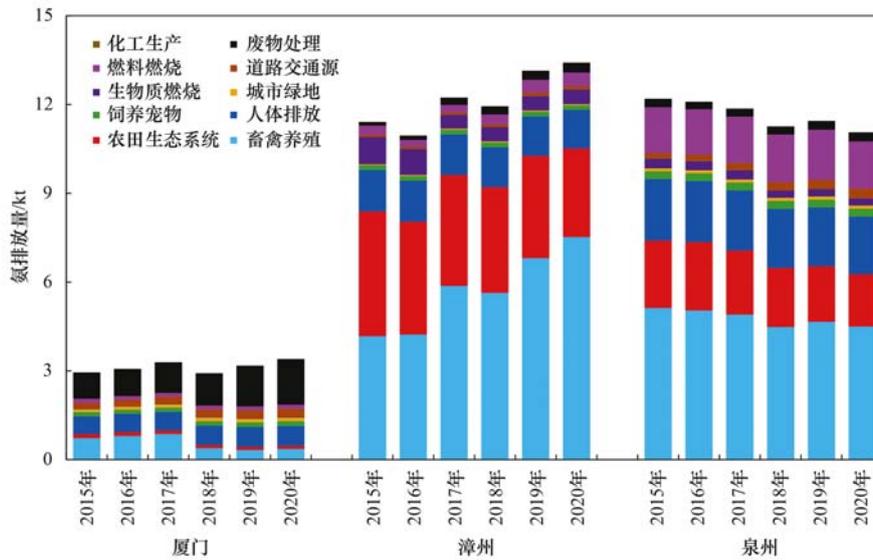


图 5 2015 ~ 2020 年厦漳泉大气氨排放趋势变化

Fig. 5 Change in atmospheric NH₃ emission trend in XZQ region from 2015 to 2020

民生活相关配套设施正常运行排放的大气氨会越来越多,在相关大气氨排放标准和减排技术缺乏的背景下^[39],城市地区的大气氨浓度会持续保持在较高水平,大气氨沉降可能导致负生态效应.为推进化肥减量提效和建设环境友好的现代农业,文献^[40]提出增大主要农作物测土配方施肥技术的覆盖率、提高畜禽粪便养分还田率和农作物秸秆直接还田率等措施来减少化肥使用率,这些措施对减少农业源氨的排放具有重要作用.厦漳泉地区统计数据显示,2020 年化肥施用量相比于 2015 年下降幅度介于 19.8%~26.0% 之间,相应的氮肥施用氨排放下降幅度为 25.0%~30.8%.城市优先发展公共交通和推广应用新能源汽车,一定程度上可降低道路交通源氨的排放.另外,针对城市人口居住密集区的氨排放源如小区化粪池、垃圾中转站和污水处理厂等,采取一定措施对挥发性氨进行吸附处理,既能降低

其对大气环境的影响,又能达到进一步资源化利用的目的.

2.4 排放清单不确定性分析

排放清单的不确定性主要由本地化排放因子的缺失、活动水平的来源多样性和计算方法的不确定性等因素导致.本研究利用 Crystal Ball 软件对厦漳泉氨排放清单进行了不确定性分析,污染源的活动水平和排放因子一般认为服从正态分布或对数正态分布^[41~44].通过蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟将活动水平和排放因子的不确定度传递至排放清单中,获得厦漳泉地区氨排放量,并对结果进行 10 000 次随机抽样,然后对抽样结果进行拟合,得到厦漳泉氨排放量的概率分布.参考沈丽^[45]的研究,利用期望值和 95% 置信区间范围计算清单的不确定性范围.不确定度较大的源有生物质燃烧源、道路交通源和饲养宠物源(表 4).生物质燃烧源在计算时所需的秸秆焚烧量是根据农作物草谷比得到的数据,活动水平有较大误差,增加了排放量的不确定性;道路交通源氨排放量的不确定性主要是由于难以获取活动

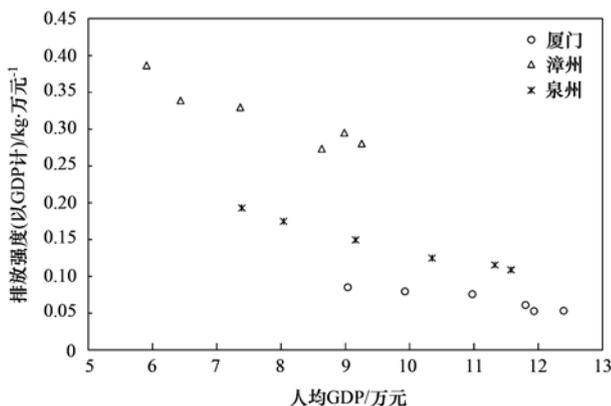


图 6 2015 ~ 2020 年厦漳泉氨排放强度与人均 GDP 散点图

Fig. 6 NH₃ emission intensity and per capita GDP in XZQ region from 2015 to 2020

表 4 排放清单不确定性

排放源	95% 置信区间/kt	不确定性范围/%
畜禽养殖	[10.27, 13.17]	-11.82 ~ 12.81
农田生态系统	[3.91, 8.88]	-37.65 ~ 41.68
人体排放	[4.39, 9.25]	-29.62 ~ 48.31
饲养宠物	[0.16, 0.92]	-70.91 ~ 69.77
城市绿地	[1.51, 2.06]	-13.61 ~ 18.28
生物质燃烧	[3.07, 10.86]	-51.13 ~ 73.17
道路交通源	[0.002, 1.42]	-99.73 ~ 144.64
燃料燃烧	[0.55, 0.83]	-16.80 ~ 24.97
废物处理	[0.99, 2.60]	-37.30 ~ 65.19
总排放清单	[24.56, 31.47]	-10.33 ~ 14.89

水平数据(如车辆类型、保有量和平均行驶里程)造成的;饲养宠物源活动水平数据来自调查数据,活动水平有较大误差.但生物质燃烧源、道路交通源和饲养宠物源氨排放量占总排放量的比例较低,分别为2.92%、2.12%和2.12%,故对总氨排放总量不确定性的影响不大.由于合成氨和化肥生产排放的氨很少,未对其进行不确定性分析.

3 结论

(1)2017年厦漳泉大气氨排放总量为27.40 kt,畜禽养殖、农田生态系统和人体排放分别贡献了42.48%、22.04%和14.71%;厦门地区人体排放和废物处理氨排放的相对占比超过一半,而漳州和泉州的占比仅为13.23%和19.38%.

(2)2017年厦漳泉地区大气氨排放密度为 $1.07 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,普遍低于国内其他地区;氨排放密度的空间分布不均匀,在人口与路网集中的市辖区,以及养殖业发达的乡镇,都具有较高的排放密度;大气氨排放量的月变化主要受温度影响.

(3)厦漳泉不同城市大气氨排放的年际变化受地区经济发展水平和经济结构的影响而表现不同,排放强度整体呈现随经济发展水平提高而下降的趋势,但城区非农业源氨的排放会进一步增大.

(4)进一步研究需要采取措施降低氨排放总量中分担率较高的排放源的不确定性,以提高氨排放清单的准确性.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 邵蕊,吕建华,徐琬莹,等. 青岛市人为源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(11): 4449-4458.
Shao R, Lv J H, Xu W Y, et al. Establishment and distribution characteristics of anthropogenic ammonia emission inventory in Qingdao [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(11): 4449-4458.
- [3] Sanhueza E. The role of the atmosphere in nitrogen cycling [J]. Plant and Soil, 1982, **67**(1): 61-71.
- [4] 贾玉欢,王春迎,孙凯,等. 洛阳市2017年大气氨排放清单的建立及其空间分布特征[J]. 中国环境监测, 2021, **37**(5): 116-124.
Jia Y H, Wang C Y, Sun K, et al. The establishment of the anthropogenic ammonia emission inventory and its spatial distribution characteristics in Luoyang City in 2017 [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, **37**(5): 116-124.
- [5] Chang Y H, Zou Z, Zhang Y L, et al. Assessing contributions of agricultural and nonagricultural emissions to atmospheric ammonia in a Chinese megacity [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(4): 1822-1833.
- [6] 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>, 2021-04-21.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 计尧,王琛,卢轩,等. 郑州市大气氨排放清单及驱动力分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5220-5227.
Ji Y, Wang C, Lu X, et al. Atmospheric NH₃ emission inventory and analysis of the driving force in Zhengzhou City [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5220-5227.
- [13] 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.
- [14] 杨柳林,曾武涛,张永波,等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3521-3534.
Yang L L, Zeng W T, Zhang Y B, et al. Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta region [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3521-3534.
- [15] Wang Y, Zhang Q Q, He K, et al. Sulfate-nitrate-ammonium aerosols over China: response to 2000-2015 emission changes of sulfur dioxide, nitrogen oxides, and ammonia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(5): 2635-2652.
- [16] Wu S P, Schwab J, Yang B Y, et al. Two-years PM_{2.5} observations at four urban sites along the coast of southeastern China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, **15**(5): 1799-1812.
- [17] 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.
- [18] 侯新红. 长江三角洲高分辨率网格化氨排放清单的建立[D]. 南京:南京信息工程大学, 2021.

- [19] 厦门市统计局. 厦门经济特区年鉴[EB/OL]. <https://tj.xm.gov.cn/tjzl/tjsj/tqnj/>, 2022-03-06.
- [20] 漳州市统计局. 漳州统计年鉴[EB/OL]. <http://tj.zhangzhou.gov.cn/cms/html/zzstj/gbnj/index.html>, 2022-03-06.
- [21] 泉州市统计局. 泉州统计年鉴[EB/OL]. <http://tj.quanzhou.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsjs/>, 2022-03-06.
- [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), doi: 10.1029/2011GB004161.
- [23] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(18): 3596-3605.
Liu Q P. Distribution of fertilizer application and its environmental risk in different provinces of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(18): 3596-3605.
- [24] 徐福祥, 范协裕, 沈金泉, 等. 基于 GIS 技术的福建省耕地土壤 pH 时空变化分析[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201505-301>, 2015-05-21.
- [25] 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.
- [26] 中国国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [27] Roe S M, Spivey M D, Lindquist H C, *et al.* Estimating ammonia emissions from anthropogenic nonagricultural sources—draft final report [EB/OL]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/eiip_areasourcesnh3.pdf, 2015-08-25.
- [28] 古颖纲, 王伯光, 杨俊, 等. 城市污水厂氨气的来源及排放因子研究[J]. *环境化学*, 2012, **31**(5): 708-713.
Gu Y G, Wang B G, Yang J, *et al.* Ammonia source and emission factor in municipal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(5): 708-713.
- [29] Chang Y H. Non-agricultural ammonia emissions in urban China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 8495-8531.
- [30] Chinkin L R, Ryan P A, Coe D L, *et al.* Recommended improvements to the CMU ammonia emission inventory model for use by LADCO [EB/OL]. <https://4cleanair.org/wp-content/uploads/Oldmembers/members/committee/agriculture/LADCOfinalreportNH3.pdf>, 2003-05-21.
- [31] 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.
- [32] 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.
Shen X L. A highly resolved anthropogenic ammonia emission inventory in Guangdong province and assessment of control strategies [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [33] 郑君瑜, 车汶蔚, 王兆礼. 基于交通流量和路网的区域机动车污染物排放量空间分配方法[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(4): 815-821.
Zheng J Y, Che W W, Wang Z L. Traffic flow and road network-based spatial allocation of regional mobile source emission inventories[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(4): 815-821.
- [34] Zheng J Y, Yin S S, Kang D W, *et al.* Development and uncertainty analysis of a high-resolution NH₃ emissions inventory and its implications with precipitation over the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(15): 7041-7058.
- [35] 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.
- [36] Wu S P, Zhu H, Liu Z, *et al.* Nitrogen isotope composition of ammonium in PM_{2.5} in the Xiamen, China: impact of non-agricultural ammonia [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(25): 25596-25608.
- [37] Wu S P, Cai M J, Xu C, *et al.* Chemical nature of PM_{2.5} and PM₁₀ in the coastal urban Xiamen, China: insights into the impacts of shipping emissions and health risk [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **227**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117383.
- [38] Wu S P, Dai L H, Wei Y, *et al.* Atmospheric ammonia measurements along the coastal lines of Southeastern China: implications for inorganic nitrogen deposition to coastal waters [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **177**: 1-11.
- [39] 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.
- [40] 中华人民共和国农业农村部. 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案 [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201505/t20150525_4614695.htm, 2022-03-06.
- [41] 李楠. 广东省 2012 年大气排放源清单定量不确定及校验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
Li N. Quantitative uncertainty analysis and verification of emission inventory in Guangdong Province, 2012 [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [42] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
Wei W. Study on current and future anthropogenic emissions of volatile organic compounds in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [43] 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.
- [44] 巫玉杞. 排放因子不确定性数据集建立与清单质量评估方法研究——以广东省为例 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
Wu Y Q. Study on the establishment of emission factor uncertainty dataset and inventory quality evaluation method—A case study of Guangdong Province [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [45] 沈丽. 长江三角洲地区大气氨排放清单的建立及特征分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
Shen L. Establishment and characteristic analysis of atmospheric ammonia emission inventory in the Yangtze River Delta [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....	..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....	..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....	..... CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....	..... YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....	..... QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....	..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....	..... PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....	..... ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....	..... XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....	..... XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....	..... FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....	..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....	..... QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....	..... SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....	..... CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....	..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....	..... LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....	..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....	..... HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....	..... WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....	..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....	..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....	..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....	..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....	..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....	..... TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....	..... LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....	..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....	..... ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....	..... WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....	..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....	..... ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....	..... SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....	..... FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios .....	..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....	..... XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....	..... CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....	..... SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....	..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....	..... HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....	..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....	..... LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)