

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 吴静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

四川省2005~2014年农业源氨排放清单及分布特征

冯小琼^{1,2}, 陈军辉^{2*}, 姜涛², 钱骏², 叶宏²

(1. 四川省环保科技工程有限责任公司, 成都 610041; 2. 四川省环境保护科学研究院, 成都 610041)

摘要: 根据收集到的四川省2005~2014年农业源氨活动水平数据, 采用合理的估算方法和排放因子, 建立了该地区2005~2014年农业源氨排放清单, 利用GIS建立了3 km×3 km的网格化清单, 并分析了农业源氨排放与PM₁₀之间的关系。结果表明2005~2014年间, 四川省农业源氨排放总体上呈现出下降趋势, 2006年排放量最高; 21个市(州)农业源氨变化趋势各不相同, 年际变化较大的城市包括成都市、眉山市、自贡市、泸州市、宜宾市、攀枝花市、阿坝州和甘孜州; 畜禽养殖和氮肥施用均为农业源氨主要排放来源, 研究期间的贡献率分别为72%~79%和20%~27%; 畜禽养殖中, 绝大部分城市氨排放量较大的为生猪、家禽和牛, 而自贡市由于特殊的饮食习惯, 兔为氨排放量最高的牲畜, 贡献率为39%; 成都及周边地区、川东北地区 and 川南地区是四川省农业源氨排放的主要贡献地区; 空间分布上, 农业源氨主要分布在四川省东部, 且主要来源于城市周边区县; 农业源氨排放量与PM₁₀质量浓度的变化趋势呈现出较好的一致性, 表明农业源氨排放对颗粒物生成有较大影响。

关键词: 四川省; 农业源氨; 排放清单; 年际变化; 空间分布

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2728-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201612217

Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014

FENG Xiao-qiong^{1,2}, CHEN Jun-hui^{2*}, JIANG Tao², QIAN Jun², YE Hong²

(1. Sichuan Province Environmental Protection Technology Engineering Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Research Institute of Environmental Protection, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the urban activity data and emission factors, agricultural ammonia emission inventory was developed for Sichuan province from year 2005 to 2014. Meanwhile, its historical trends, spatial distribution and the relationship between agricultural ammonia emission and PM₁₀ concentration were analyzed. The results showed that the highest emission was estimated to be 111.9×10^4 t in 2006, which was reduced to 95.5×10^4 t in 2014. The interannual variation characteristics were different for 21 cities in Sichuan, the annual emission of Chengdu, Meishan, Zigong, Luzhou, Yibin, Panzhihua, Aba and Ganzi changed largely in the study period. Livestock source and nitrogen fertilizers were the major contributors, accounting for 72%-79% and 20%-27% of the total agricultural NH₃ emission respectively. Hog, poultry and cow were the major contributors under the category of livestock sources for the most cities. It's worth mentioning that rabbit was the largest contributor in Zigong, accounting for 39% of the total livestock NH₃ emission. The urban and sub-urban areas of Chengdu, the northeastern and southern part of Sichuan were the hot-spots for agricultural NH₃ emission. In term of spatial distribution, there were higher emissions in the east of Sichuan and other suburban and rural areas. There was a good agreement between agricultural NH₃ emission and PM₁₀ concentration, indicating agricultural NH₃ emission played an important role in the particle formation.

Key words: Sichuan Province; ammonia from agricultural sources; emission inventory; annual change; spatial distribution

氨是大气中重要的微量气体,同时也是硝酸铵、硫酸铵等二次颗粒物的重要前体物,对霾污染的形成有重要作用^[1,2]。近年来,随着对大气霾污染研究的逐步深入,氨排放及其对气溶胶形成的影响已成为大气环境领域的研究热点。

国外对氨排放研究较早,对不同排放源和排放特征都有大量深入的研究。美国环保署编制了包括NH₃等多种污染物在内的国家排放源清单,并进行定期更新,建立了国家排放源清单数据库^[3]。英国学者建立了包括农业源、非农业源和天然源在内的1996年英国国家氨排放清单,并估算了氨排放量不确定性范围^[4]。而南韩地区的研究结果发现在1988

~1998年间,其氨排放量增加了21%^[5]。随着国内学者对大气霾污染研究的深入,氨排放越发受到关注,在全国、区域、省、城市尺度上都建立了氨排放清单^[8-15]。国内外的研究结果均表明,农业源氨排放是人为源氨的最主要排放来源,贡献率为77%~94%^[6-11]。因此部分学者专门针对农业源氨排放特征进行了研究,如华北平原^[12]、江苏省^[13]、浙江省^[14]、上海市^[15]等地区。

收稿日期: 2016-12-26; 修订日期: 2017-02-07

作者简介: 冯小琼(1986~),女,硕士,工程师,主要研究方向为大气污染防治, E-mail: f_xiaoqiong@126.com

* 通信作者, E-mail: 9503062@qq.com

随着区域性大气复合污染特征的日益突显,以及对大气污染源排放清单工作的重视,四川省已建立了包括固定污染源^[16]、水泥行业^[17]、秸秆焚烧^[18]、天然源和人为源 VOCs^[19, 20]、人为源氨^[21]等在内的大气污染源排放清单。四川省为我国农业大省,氨排放尤其是农业源氨排放对环境空气质量的影响不容忽视^[9, 21],然而目前尚未有针对四川省农业源氨的详细报道。本研究综合国内外相关研究成果,收集了四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨活动水平数据,采用合适的估算方法,建立了 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单,分析氨排放年际变化趋势及其对空气质量的影响,旨在为灰霾污染防治提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域为四川省,位于我国大陆西南腹地,下辖成都、绵阳、德阳等 21 个地级市(州),经济发展区域化明显,目前已形成五大区域——成都及周边地区(成都市、德阳市、绵阳市、眉山市、资阳市、乐山市、遂宁市)、川南地区(自贡市、泸州市、内江市、宜宾市)、川东北地区(广元市、南充市、达州市、广安市、巴中市)、攀西地区(攀枝花市、凉山州)、川西北地区(雅安市、阿坝州、甘孜州)。

1.2 研究对象及数据来源

本研究估算的农业源包括畜禽养殖、氮肥施用、土壤本底、固氮植物和秸秆燃烧。各污染源 2005 ~ 2014 年的活动水平数据均来自四川省统计年鉴和四川农村年鉴。主要包括 21 个市(州)各类畜禽年末出(存)栏量,氮肥施用量,耕地面积,固氮植物种植面积和农作物产量。

1.3 估算方法

本研究主要采用排放因子法对四川省农业源氨排放进行估算,计算公式为:

$$E_{ij} = \sum_j A_{ij} \times EF_j$$

式中, E_{ij} 为氨排放量, i 为地区, j 为源类别, A_{ij} 为活动水平, EF 为排放因子。在具体估算过程中,不同排放源详细的估算公式、活动水平数据处理、排放因子选取等均有所差异,下面分别说明。

1.3.1 畜禽养殖

畜禽养殖 NH_3 排放主要来自圈舍饲养、户外放牧、粪便存储处理和后续施肥 4 个阶段,主要来源于饲料中蛋白质的消化代谢产物粪尿之中^[11, 22]。根据我国四川省现有统计资料,本研究将畜禽养殖源细分为生猪、黄牛、奶牛、水牛、山羊、绵羊、马、家禽和兔等 9 类。排放因子主要选取北京大学杨志鹏对我国畜牧业氨排放因子的修正结果^[22],具体如表 1 所示。

1.3.2 氮肥施用

有研究表明,氮肥施用后氨挥发是肥料氮损失的一个重要途径,同时也是大气氨的主要来源之一^[12, 24]。环境温度、土壤性质、氮肥种类和施肥方式是氨挥发的重要影响因素^[25]。本研究根据实地调研获取不同区域的各种类型氮肥施用比例,结合排放因子,得到各区域氮肥施用的平均排放因子(见表 2)。成都及周边地区调研的城市包括成都市和乐山市;川南地区调研的城市包括宜宾市、泸州市、自贡市、内江市;其他 3 个区域由于没有获取调研数据,各类型氮肥施用比例取成都及周边地区和川南地区的平均值。尿素和碳酸氢铵的排放因子取国内学者研究结果的平均值^[10],其他氮肥的排放因子则参考国外学者的研究成果^[1, 26]。

表 1 畜禽养殖氨排放因子

Table 1 Emission factors for livestock

畜禽种类	生猪	黄牛	奶牛	水牛	山羊	绵羊	马	家禽	兔
排放因子/kg·头 ⁻¹	2.82 ^[22]	25.52 ^[22]	37.61 ^[22]	10.56 ^[22]	4.1 ^[22]	4.2 ^[22]	18.6 ^[22]	0.24 ^[23]	0.2 ^[22]

1.3.3 土壤本底

土壤本底也会挥发一部分氨到大气中,本研究依据文献[25]进行计算,排放因子(以 NH_3 计,下同)为 0.12 kg·亩⁻¹。

1.3.4 固氮植物

固氮植物根据文献[25]和四川省统计年鉴,选取大豆和花生进行估算,排放因子分别为 0.07 kg·亩⁻¹和 0.08 kg·亩⁻¹。

1.3.5 秸秆燃烧

由于尚未收集到四川省秸秆焚烧量,参考文献[27]和文献[28],按以下公式进行计算。

$$M = \sum_j P_j \times N_j \times R_j \times D \times F$$

式中, M 为秸秆焚烧量,t; P 为第 j 种农作物产量; N 为 j 种农作物谷草比; R 为 j 农作物谷草干燥比; D 为废弃秸秆焚烧比例; F 为焚烧效率。相关参数取值如表 3 所示。

表 2 不同氮肥施用比例及排放因子/%

Table 2 Application of various N fertilizers and their emission factors/%

区域	项目	碳酸氢铵	尿素	硝酸铵	硫酸铵	平均
成都及周边地区	施用比例	35.98	62.26	1.31	0.38	/
	排放因子 NH ₃	21.3	17.4	2	8	18.55
川南地区	施用比例	28.28	67.18	0.03	4.73	/
	排放因子 NH ₃	21.3	17.4	2	8	18.09
其他地区	施用比例	29.5	66.4	0.06	4.1	/
	排放因子 NH ₃	21.3	17.4	2	8	18.16

表 3 秸秆燃烧相关参数

Table 3 Parameters used in the calculation of crop residue burning

农作物	谷草比	谷草干燥比 ^[30]	废弃秸秆焚烧比例 ^[31]	焚烧效率 ^[31]
棉花	3 ^[31]	0.83	0.14	0.804
花生	0.8 ^[29]	0.94	0.14	0.82
油菜籽	2 ^[31]	0.83	0.14	0.804
麻类	1.9 ^[29]	0.83	0.14	0.804
甘蔗	0.3 ^[31]	1	0.14	0.68
烟叶	1.6 ^[29]	0.83	0.14	0.804
稻谷	0.9 ^[29]	0.89	0.14	0.93
小麦	1.37 ^[31]	0.89	0.14	0.92
玉米	2 ^[31]	0.87	0.14	0.92
豆类	1.6 ^[29]	0.91	0.14	0.68
薯类	0.5 ^[29]	0.45	0.14	0.68

各作物秸秆燃烧氨排放因子选取文献[25]中的推荐值,小麦为 0.37 g·kg⁻¹,玉米为 0.68 g·kg⁻¹,其他作物为 0.52 g·kg⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 四川省氨排放量变化趋势

根据上述研究方法和活动水平数据,得到四川省 2005~2014 年农业源氨排放量,具体如图 1 所示.可以看出,2005~2014 年间,四川省农业源氨排放量总体为下降趋势,峰值出现在 2006 年,为 111.9 万 t,随后逐渐降低,在 2012 年出现最低值,为 91.9 万 t,2006 年至 2012 年之间的年均下降率为 3%;随后的 2013 年和 2014 年缓慢上升.排放强度与氨排放量变化一致,2006 年最高,为 2.3 t·km⁻²,2012 年最低,为 1.9 t·km⁻².农业源氨排放量变化主要由畜禽养殖氨排放量引起,因为农业源氨主要来自畜禽养殖排放,2005~2014 年间的贡献率为 73%~79%,其次为氮肥施用,贡献率为 20%~26%.

对氨排放量较高的畜禽养殖和氮肥施用进一步分析,图 2 和图 3 展示了畜禽养殖和氮肥施用排放变化情况.研究期间四川省畜禽养殖氨排放 2006 年最高,为 88.1 万 t,之后至 2009 年逐年降低,年均下降率为 8.5%,2009~2014 年间基本保持稳定,氨



图 1 四川省 2005~2014 年农业源氨排放量及排放强度
Fig. 1 Agricultural NH₃ emission and emissions intensity in Sichuan from 2005 to 2014

排放量为 67.3 万~71.8 万 t.从排放来源看,2005~2008 年均以家禽的氨排放为主,占畜禽养殖氨年总排放量的 29%~35%,其次为牛和生猪;2009~2014 年间,牛和生猪的氨排放量较高,占比分别为 27%~30%和 29%~30%,其次为家禽和羊.畜禽养殖氨排放量与饲养量和排放因子有关.牛、生猪、羊的饲养量和排放因子均较高,因此其氨排放量较高.家禽虽然排放因子较低,但其饲养量远大于其他畜禽,分别是牛、马、生猪、羊、兔的 54~142 倍、555~1471 倍、8~23 倍、31~82 倍、3~8 倍.马的排放因子仅次于牛,但其饲养量为所有类型畜禽中最低,因此氨排放量较低.

研究期间四川省氮肥施用氨排放呈先升后降趋势, 2005 ~ 2009 年逐年上升, 由 22.3 万 t 上升到 23.9 万 t, 年均增长率为 1.8%, 2009 ~ 2014 年缓慢降低, 2014 年排放量为 23.0 万 t, 年均下降率为 0.8%。氮肥施用氨排放量主要与氮肥施用量有关, 表明四川省近年来因大力推进测土配方施肥, 化肥利用率有所提高, 使得氮肥施用量逐渐降低。

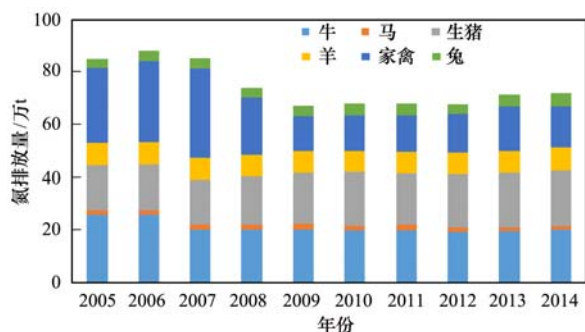


图2 四川省 2005 ~ 2014 年畜禽养殖氨排放来源

Fig. 2 Source of ammonium emission from livestock in Sichuan from 2005 to 2014

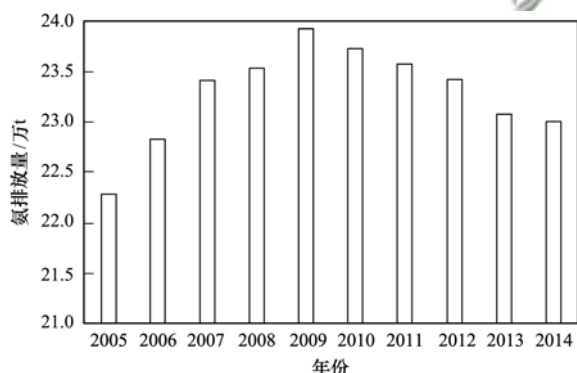


图3 四川省 2005 ~ 2014 年氮肥施用氨排放量

Fig. 3 NH_3 emission from nitrogen fertilizers in Sichuan from 2005 to 2014

2.2 地区分布特征

2.2.1 区域分布特征

图4显示了四川省5个区域2005 ~ 2014年氨排放量占比情况。从中可以看出, 成都及周边地区是四川省农业源氨排放量最高的区域, 研究期间占四川省排放总量的34% ~ 45%, 其次为川东北地区, 占比分别为26% ~ 28%和15% ~ 20%。这主要是由区域之间社会发展不平衡导致, 成都及周边地区、川东北地区、川南地区为四川省经济较为发达地区, 人口较多, 使得畜禽需求量大, 三大区域畜牧业产值分别占四川省畜牧业总产值的50%、29%和19%, 而攀西和川西北地区山区较多, 人口较少, 其畜牧业产值仅占四川省总产值的7%

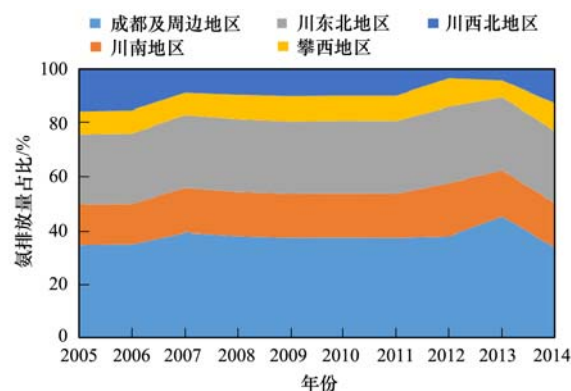


图4 2005 ~ 2014 年四川省各地区氨排放量占比

Fig. 4 Emission contributions from different districts of Sichuan Province (2005-2014)

和5%。

2.2.2 城市分布特征

(1) 城市排放量和排放强度

凉山州2014年农业源氨排放量最高, 为9.1万t, 占2014年四川省农业源氨总排放量的9.5%, 其次为达州市和南充市, 排放量均约为7.2万t (见图5)。攀枝花市和雅安市的排放量较低, 分别为0.9万t和1.5万t。21个市(州)农业源氨排放来源基本一致, 畜禽养殖为主要排放来源, 占比为61% ~ 99%, 除阿坝州和甘孜州外, 其他城市氮肥施用对农业源氨排放贡献也较高, 贡献率为12% ~ 39%。

从排放强度来看, 德阳市和自贡市较高, 分别为 $8.9 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $8.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 阿坝州、甘孜州和雅安市排放强度较低, 均小于 $1 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。各城市排放强度由农业源氨排放量和辖区面积决定, 与其他城市相比, 德阳市和自贡市农业源氨排放量处于中等水平, 分别占四川省农业源氨总排放量的5.5%和3.8%, 但其辖区面积较小, 分别占四川省辖区面积的1.2%和0.9%, 因此其排放强度较高。阿坝州和甘孜州排放强度较低主要原因在于其辖区面积较大, 分别占四川省辖区面积的17.1%和30.8%, 而雅安市排放强度较低主要由农业源氨排放量低造成。

(2) 城市排放量年际变化

2005 ~ 2014年四川省各城市农业源氨排放量如表4所示。成都市、眉山市、自贡市、南充市的农业源氨排放变化趋势基本相同, 2005 ~ 2007年间逐渐上升, 随后缓慢降低, 在2013年急剧上升, 尤其是眉山市, 2013年在2012的基础上上升了80%。眉

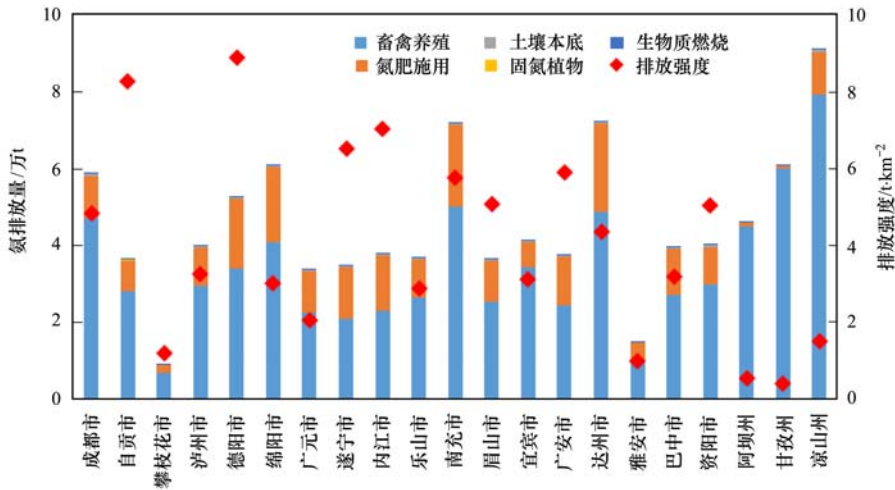


图5 2014年各城市农业源氨排放量和排放强度

Fig. 5 Agricultural ammonia emission and emissions intensity of each city in 2014

表4 各城市2005~2014年农业源氨排放量/万t

Table 4 Agricultural ammonia emission of each city from 2005 to 2014/10⁴ t

地区	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
成都市	8.3	8.5	9.5	8.0	7.0	6.9	7.0	6.5	9.3	5.9
自贡市	3.2	3.4	4.4	3.7	3.5	3.6	3.6	3.5	5.6	3.6
攀枝花市	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	2.7	0.8	0.9
泸州市	4.3	4.6	4.4	3.8	3.5	3.6	3.6	5.2	3.8	4.0
德阳市	5.7	6.1	6.5	5.3	4.9	5.0	5.0	5.0	4.3	5.3
绵阳市	6.7	7.2	7.5	6.6	6.0	6.1	6.0	6.3	6.1	6.1
广元市	3.7	3.8	3.6	3.3	3.1	3.2	3.1	3.0	2.9	3.4
遂宁市	3.3	3.6	4.0	3.7	3.6	3.5	3.5	3.9	4.6	3.5
内江市	3.5	3.7	4.0	3.7	3.5	3.5	3.6	4.6	3.6	3.8
乐山市	4.2	4.0	4.4	3.8	3.5	3.6	3.6	3.3	3.0	3.7
南充市	7.5	8.0	8.5	7.5	7.0	7.1	7.1	7.1	8.1	7.2
眉山市	4.8	5.0	6.9	6.1	5.7	5.7	5.8	6.5	11.9	3.6
宜宾市	5.2	4.9	5.2	4.6	4.2	4.1	4.1	4.6	3.1	4.1
广安市	3.9	4.0	3.9	3.5	3.3	3.4	3.4	3.4	3.1	3.8
达州市	8.4	8.7	9.3	8.1	7.3	7.4	7.4	8.8	7.2	7.2
雅安市	2.3	2.2	2.1	1.8	1.7	1.7	1.7	1.3	1.9	1.5
巴中市	4.6	4.8	4.4	4.2	4.0	4.0	4.0	3.8	4.7	3.9
资阳市	4.6	4.7	4.3	3.9	3.7	3.8	3.7	3.2	4.2	4.0
阿坝州	6.2	6.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	1.5	1.1	4.6
甘孜州	8.7	8.7	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	0.3	1.1	6.1
凉山州	8.4	8.7	8.3	8.1	7.9	7.9	8.0	7.2	5.2	9.1

山市 2013 年排放量增加的主要原因在于氨排放因子最高的牛的饲养量为研究期间最高,为 400 万头,是 2012 年的 3.8 倍。攀枝花市 2012 年农业源氨排放量最高,为 2.7 万 t,其他年份排放量变化不大,为 0.8 万~1.04 万 t。阿坝州和甘孜州氨排放量变化趋势类似,2005 年和 2006 年排放量基本相同,2007 年突然降低,此后至 2011 年保持稳定,2012 年和 2013 年排放量均处于较低水平,2014 年又骤然上升。2012 年和 2013 年排放量均较低是因为统计的牛、生猪、羊等大型牲畜饲养量均为研究期间最

低,以甘孜州为例,其 2012 年牛、生猪、羊饲养总量为 17.5 万头,而 2005 年和 2006 年分别为 458 万头和 455 万头。其他城市研究期间变化趋势不明显。

各城市 2005~2014 年畜禽养殖氨排放来源基本一致,以 2014 年为例进行说明(见图 6)。攀枝花市和凉山州畜禽养殖氨排放来源较为一致,牛为最主要排放来源,贡献率分别为 31% 和 36%,其次为羊和生猪。阿坝州和甘孜州均是牛的排放量最高,占比均高达 81%。自贡市兔排放量最高,氨排放量为 1.1 万 t,占自贡市畜禽养殖氨排放总量的 39%,

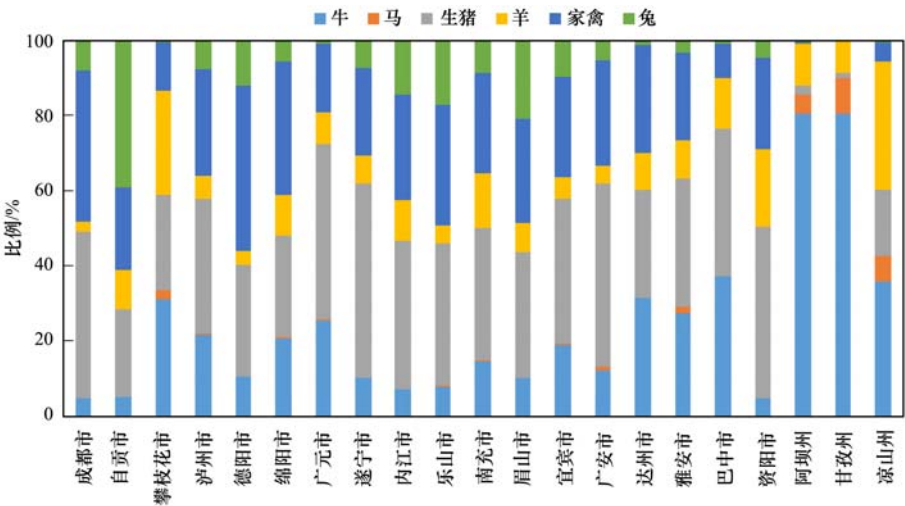


图 6 2014 年各城市畜禽养殖氨排放来源

Fig. 6 Source of ammonia emission from livestock for each city in the year of 2014

其次为生猪和家禽。其他城市畜禽养殖氨排放均来自生猪和家禽,此外,牛对泸州市、绵阳市、广元市、宜宾市、达州市、雅安市和巴中市畜禽养殖氨排放的贡献率也较高,均大于 20%。各城市之间畜禽养殖氨排放来源的差异主要是由各类型畜禽饲养量的不同引起的。

2.3 空间分布特征

2.3.1 分配方法

本研究基于 ArcGIS 空间分析技术和数据调研,根据污染源空间分布规律和土地利用类型等数据,采用适宜的权重因子,建立了四川省 3 km×3 km 人为源氨排放网格化(图 7)清单。农业源氨排放根据

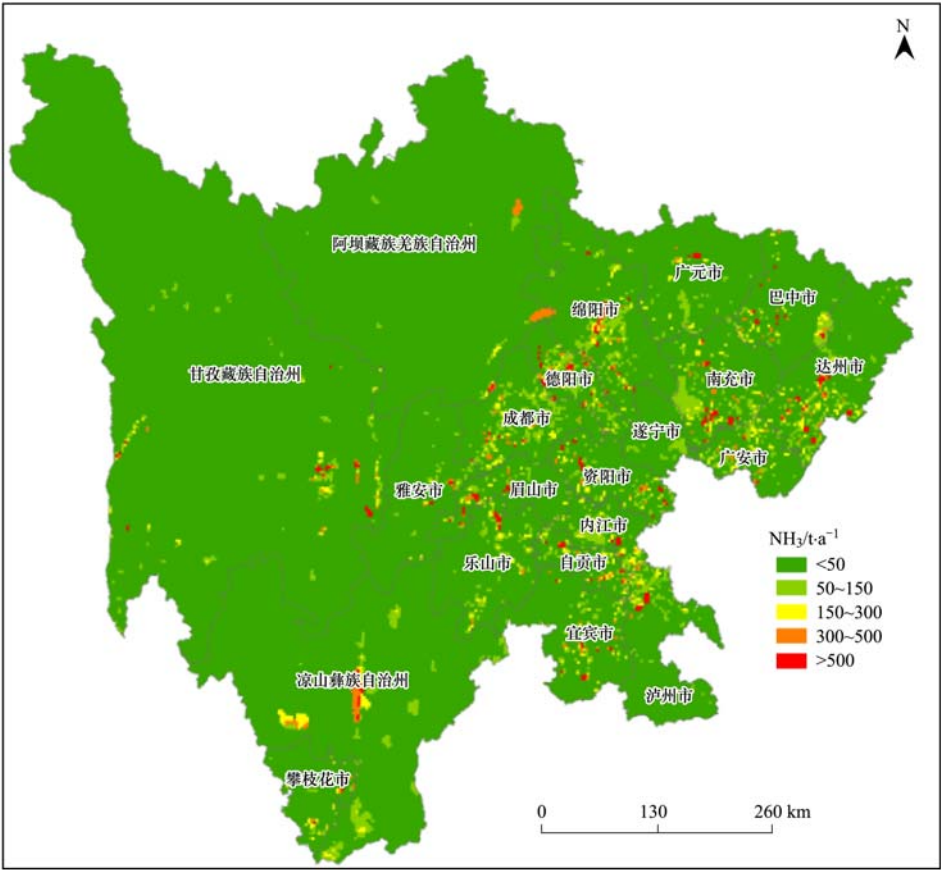


图 7 四川省 2014 年农业源氨排放空间分布(3 km×3 km)

Fig. 7 Spatial distribution of agricultural ammonia emission in Sichuan province in 2014

排放源活动范围的地域地点,按照四川省土地利用信息进行空间分配,土地利用分类参考土地利用遥感解译中使用的土地分类体系. 其中,畜禽养殖按照农村居民点和耕地面积权重因子进行分配;氮肥施用和土壤本底根据耕地面积权重因子进行分配;固氮植物根据旱地面积权重因子进行分配;秸秆燃烧中水稻根据水田面积权重因子进行分配,其他作物根据旱地面积权重因子进行分配.

2.3.2 空间分布特征

基于上述空间分配方法,得到了四川省2014年农业源氨排放空间分布,如图7所示. 从中可以看出,农业源氨主要分布在四川省东部,西部的阿坝州、甘孜州、凉山州和攀枝花市大部分区域排放量均较小,仅少数地区零星分布有排放量较大的网格. 德阳市、绵阳市、眉山市、南充市和达州市排放量高(大于500 t)的网格相对较多. 总体而言,氨排放量空间分布较为分散,各城市均有排放量较大的网格,且主要分布在城市周边区县,主城区排放相对较少.

2.4 农业源氨排放与空气质量的关系

本研究将四川省和5个区域代表城市农业源氨

排放量对环境空气 PM_{10} 质量浓度影响进行分析,如图8所示. 四川省总体上 PM_{10} 质量浓度与农业源氨排放量变化趋势一致,均呈现出下降——上升——下降的趋势. 成都市、宜宾市、南充市、雅安市除个别年份 PM_{10} 质量浓度与农业源氨排放量变化趋势不一致外,大部分年份两者变化趋势均相同. 而凉山州 PM_{10} 质量浓度与农业源氨排放量一致性相对较差. 总体而言,大部分城市 PM_{10} 质量浓度与农业源氨排放量变化趋势呈现出较好的一致性. 硫酸盐、硝酸盐、铵盐是四川盆地颗粒物中的重要组分^[32, 33], NH_3 为其前体物之一,而农业源氨是四川省人为源氨的主要排放来源^[21],贡献率达85%,这在一定程度上表明农业源氨排放对颗粒物形成的影响不容忽视. 而针对凉山州等城市出现的 PM_{10} 质量浓度与农业源氨排放量一致性相对较差的现象,未来需要对其非农业源氨进行估算,以更好地评估氨排放与颗粒物之间的关系.

2.5 同类研究结果比较

将本研究结果与其他地区进行比较,如表5所示. 从中可见,本研究结果与董文煊等^[9]的估算结果接近,但均高于其他地区. 四川省为农业大省,牲

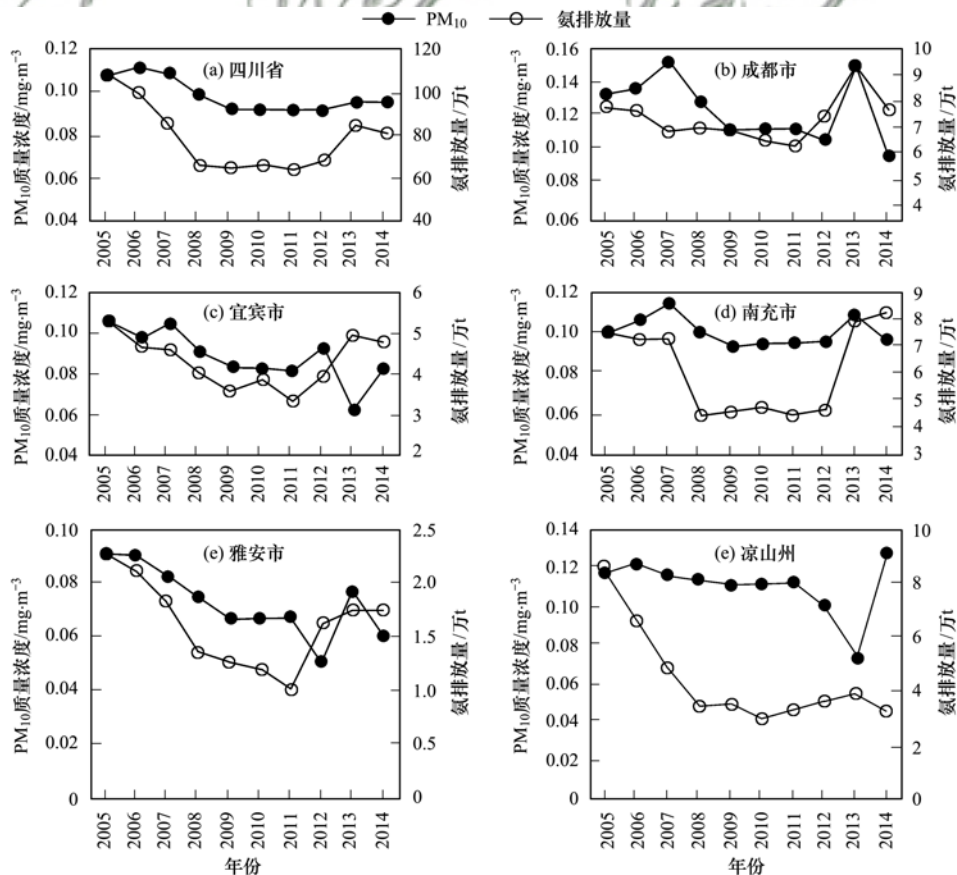


图8 农业源氨排放与 PM_{10} 质量浓度变化趋势

Fig. 8 Relationship between agricultural NH_3 emission and PM_{10} concentration

畜养殖量和氮肥施用量均较大,董文煊等^[9]的研究结果表明,2006 年四川省氨排放量居于全国第三位,仅次于河南省和山东省. 从排放强度来看,本研究结果低于江苏省、广东省和长株潭地区,高于浙江省,总体处于较低水平. 原因在于四川省面积大于广东省、浙江省、江苏省等,尤其是川西北地区,其辖区面积为四川省总面积的 51.8%,而农业源氨排放量仅占全省的 12.8% (2014 年).

表 5 与其他研究结果比较

Table 5 Comparison with other studies

基准年	地区	排放量/万 t	排放强度/t·km ⁻²
2014 年	本研究	95.5	1.97
	江苏省 ^[13]	67.9	6.61
2013 年	本研究	95.3	1.96
	浙江省 ^[14]	13.1	1.24
	长株潭地区 ^[34]	6.47	2.30
2010 年	本研究	92.3	1.91
	广东省 ^[11]	52.4	3.32
2006 年	本研究	111.8	2.31
	珠三角地区 ^[35]	17.13	/
	四川省 ^[9]	110.51	2.29

2.6 不确定性分析

清单建立的不确定性主要来自排放因子的选取,以及部分排放源活动水平数据的缺失. 本研究中,土壤本底和固氮植物活动水平数据来自四川省统计年鉴,排放因子取自文献[25]中的推荐值,不确定性最小. 畜禽养殖排放因子采取国内学者修正后的结果,但由于未收集到相关基础信息,未能按照养殖方式、饲养周期等进行计算,是本研究中农业源氨排放清单主要的不确定性来源. 氮肥施用活动水平来自四川省统计年鉴,排放因子根据实地调研结果进行修正,但仍未考虑土壤类型、施肥方式等因素,存在一定的不确定性. 秸秆燃烧排放因子取自文献[25]推荐值,但燃烧量也是基于主要作物产量及国内研究成果估算得到,这也增大了估算结果的不确定性.

3 结论

(1)四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放总体为下降趋势,2006 年排放量最高,为 111.9 万 t,2012 年排放量最低,为 91.9 万 t.

(2)2005 ~ 2014 年农业源氨均主要来自畜禽养殖和氮肥施用,畜禽养殖的年际变化与农业源氨基本一致,氮肥施用则呈现出先升后降的趋势,峰值出现在 2009 年.

(3)四川省畜禽养殖氨排放主要来自生猪、家禽、牛和羊. 兔为自贡市氨排放量最高的牲畜,对自贡市畜禽养殖氨排放总量的贡献率为 39%,其他城市畜禽养殖氨排放来源与四川省类似.

(4)成都及周边地区是四川省农业源氨排放量最高的区域,研究期间占四川省氨排放总量的 34% ~ 45%,其次为川东北地区 and 川南地区. 从城市来看,2014 年凉山州、达州市和南充市的排放量较高,而排放强度则是德阳市和自贡市较高,分别为 8.9 t·km⁻²和 8.3 t·km⁻².

(5)研究期间,四川省大部分城市 PM₁₀ 质量浓度与农业源氨排放量变化趋势呈现出较好的一致性,这在一定程度上说明农业源氨排放对颗粒物形成的影响不容忽视.

参考文献:

- [1] Goebes M D, Strader R, Davidson C. An ammonia emission inventory for fertilizer application in the United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(18): 2539-2550.
- [2] Battye W, Aneja V P, Roelle P A. Evaluation and improvement of ammonia emissions inventories [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(27): 3873-3883.
- [3] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放清单建立的技术方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] Sutton M A, Dragosits U, Tang Y S, et al. Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(6): 855-869.
- [5] Lee Y H, Park S U. Estimation of ammonia emission in south Korea [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **135**(1-4): 23-37.
- [6] Ni J Q. Mechanistic models of ammonia release from liquid manure: a review [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999, **72**(1): 1-17.
- [7] Zhao D W, Wang A P. Estimation of anthropogenic ammonia emissions in Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(4): 689-694.
- [8] 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.
- [9] 董文煊, 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Zhang Y, Dore A J, Ma L, *et al.* Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(2): 490-501.
- [13] 刘春蕾, 姚利鹏. 江苏省农业源氨排放分布特征[J]. *安徽农业科学*, 2016, **44**(22): 70-74.
- Liu C L, Yao L P. Agricultural ammonia emission inventory and its distribution characteristics in Jiangsu Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, **44**(22): 70-74.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 何敏, 王幸锐, 韩丽. 四川省大气固定污染源排放清单及特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 3127-3137.
- He M, Wang X R, Han L. Air pollutant emission inventory and characteristics from stationary sources in Sichuan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(11): 3127-3137.
- [17] 何敏, 陈军辉, 韩丽, 等. 四川省 2008-2014 年水泥行业大气污染物排放清单及时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 34-43, doi: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0223.
- He M, Chen J H, Han L, *et al.* Cement industrial emission inventories development and their temporal and spatial distribution for Sichuan Province from 2008 to 2014 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 34-43, doi: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0223.
- [18] 何敏, 王幸锐, 韩丽, 等. 四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1208-1216.
- He M, Wang X R, Han L, *et al.* Emission inventory of crop residues field burning and its temporal and spatial distribution in Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1208-1216.
- [19] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- Han L, Wang X R, He M, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources in Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- [20] 毛红梅, 张凯山, 第宝锋. 四川省天然源 VOCs 排放量的估算和时空分布[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1289-1296.
- Mao H M, Zhang K S, Di B F. Studies on estimates of biogenic VOC emission and its temporal and spatial distribution in Sichuan [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1289-1296.
- [21] 冯小琼, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省 2012 年人为源氨排放清单及分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 394-401.
- Feng X Q, Wang X R, He M, *et al.* A 2012-based anthropogenic ammonia emission inventory and its spatial distribution in Sichuan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 394-401.
- [22] 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.
- [23] Bouwman A F, Lee D S, Asman W A H, *et al.* A global high-resolution emission inventory for ammonia [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, **11**(4): 561-587.
- [24] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, **9**(1): 1-6.
- Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, **9**(1): 1-6.
- [25] 环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南[EB/OL]. [http://www. Zhb. Gov. cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578. pdf](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578.pdf), 2014-08-19.
- [26] Klimont Z. Current and future emissions of ammonia in China [Z]. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 2000. 1-8.
- [27] He M, Zheng J Y, Yin S S, *et al.* Trends, temporal and spatial characteristics, and uncertainties in biomass burning emissions in the Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(24): 4051-4059.
- [28] 陆炳孔, 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.
- [29] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(12): 211-216.
- Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, *et al.* Estimation of straw resources in China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, **25**(12): 211-217.
- [30] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), Greenhouse Gas Inventory Reference Manual. Revised 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Bracknell, UK: Meteorological Office, 2007.
- [31] 王幸锐. 环境污染防治技术水平与绩效评估——大气污染防治卷(2012)[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2013.
- Wang X R. Technology and performance evaluation of environment pollution prevention and control in Sichuan-Prevention and control of atmospheric pollution (2012) [M]. Chengdu: Sichuan Science Technology Press, 2013.
- [32] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012-2013 年)[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- Chen Y, Xie S D, Luo B. Composition and pollution characteristics of fine particles in Chengdu from 2012 to 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- [33] 赵晴. 典型地区无机细粒子污染特征及成因研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- Zhao Q. Characteristics and formation of inorganic fine particulate

- pollution in typical regions of China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [34] 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.
- [35] 尹沙沙, 郑君瑜, 张礼俊, 等. 珠江三角洲人为氨源排放清单及特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1146-1151.
- Yin S S, Zheng J Y, Zhang L J, *et al.* Anthropogenic ammonia emission inventory and characteristics in the Pearl River Delta Region[J]. Environmental Science, 2010, **31**(5): 1146-1151.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8 000 字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框. 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.
图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.
会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.
学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.
报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.
专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)