

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7  
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响 ..... 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)

华北地区大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 ..... 杨伟, 姜晓丽 (2995)

郑州市民运会期间大气PM<sub>2.5</sub>改善效果评估 ..... 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子污染特征 ..... 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)

川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 ..... 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)

四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 ..... 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)

成都市工业挥发性有机物排源成分谱 ..... 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)

郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 ..... 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 ..... 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)

典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 ..... 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)

华北地区典型重工业城市夏季近地面O<sub>3</sub>污染特征及敏感性 ..... 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)

稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 ..... 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运震 (3095)

苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 ..... 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 ..... 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日起, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)

非超低与超低排放煤电机组启动过程NO<sub>x</sub>排放特征对比分析 ..... 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)

邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 ..... 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 ..... 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 ..... 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)

木沥河流域氮素污染及其污染源解析 ..... 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 ..... 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 ..... 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾璐杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)

象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 ..... 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)

乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 ..... 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)

连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 ..... 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)

茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 ..... 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)

金盆水库沉积物铁锰释放规律 ..... 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)

城市湖泊沉积物微塑料污染特征 ..... 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 ..... 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 ..... 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 ..... 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 ..... 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)

分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控 ..... 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 ..... 毕薇薇, 叶胜, 于健全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)

供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 ..... 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)

碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 ..... 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)

弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe<sup>0</sup>/WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 ..... 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)

一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 ..... 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)

生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 ..... 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)

低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 ..... 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)

羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 ..... 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)

低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 ..... 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 ..... 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)

城镇河流CO<sub>2</sub>及CH<sub>4</sub>排放与市政排水管网污水输入的关联影响 ..... 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)

控释尿素对黄河故道沙性潮土N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)

我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 ..... 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)

不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 ..... 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)

锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 ..... 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 ..... 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 ..... 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)

《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)

## 稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性

顾梦娜<sup>1,2</sup>, 潘月鹏<sup>1,2\*</sup>, 何月欣<sup>1</sup>, 田世丽<sup>1\*</sup>, 王彦君<sup>1</sup>, 吕雪梅<sup>1</sup>, 倪雪<sup>1</sup>, 孙杰<sup>1</sup>, 吴电明<sup>3</sup>, 方运霆<sup>4</sup>

(1. 中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 华东师范大学地理科学学院, 教育部地理信息科学重点实验室, 上海 200241; 4. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016)

**摘要:** 氨(NH<sub>3</sub>)是大气霾污染和过量氮沉降的关键前体物,准确厘清其来源是制定NH<sub>3</sub>减排策略的科学基础. 稳定同位素模型(SIAR)在NH<sub>3</sub>溯源研究中展现出巨大潜力,其解析结果的可靠性与NH<sub>3</sub>排放源的氮同位素指纹谱( $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ )密切相关. 本研究基于2013年1月北京霾污染期间的同位素观测资料,使用SIAR评估了3个重要源谱参数(源的数量、源的 $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ 特征值及其标准差)对NH<sub>3</sub>源解析的影响. 结果表明,农业源的贡献率对源谱 $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ 特征值的变化最敏感,其次为化石燃烧源,氨逃逸源的敏感性最低. 农业源 $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ 标准差的改变仅造成农业源贡献率变化约4%,但其特征值的改变却造成农业源贡献率20%的变化. 相比之下,将农业源拆分为化肥挥发和畜牧养殖源后,解析结果并未显著增加农业源的总贡献,即“非农业源”仍然是2013年初北京霾污染期间NH<sub>3</sub>的重要来源. 考虑到农业源的贡献率对SIAR模型参数改变的响应最为敏感,且不同类型的农业源 $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ 差异较大,未来需要针对农业源 $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ 的时空变化规律及影响因素开展深入研究,以此来降低同位素源解析模型的不确定性.

**关键词:** 氨气; 同位素; 源谱; 稳定同位素模型(SIAR); 源解析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3095-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201911132

## Source Apportionment of Atmospheric Ammonia: Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language

GU Meng-na<sup>1,2</sup>, PAN Yue-peng<sup>1,2\*</sup>, HE Yue-xin<sup>1</sup>, TIAN Shi-li<sup>1\*</sup>, WANG Yan-jun<sup>1</sup>, LÜ Xue-mei<sup>1</sup>, NI Xue<sup>1</sup>, SUN Jie<sup>1</sup>, WU Dian-ming<sup>3</sup>, FANG Yun-ting<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Geographic Information Sciences, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 4. Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Ammonia (NH<sub>3</sub>) is an important precursor of fine particles and nitrogen deposition. It is critical to identify and quantify the sources of NH<sub>3</sub> before the implementation of a mitigation strategy. Stable isotope analysis in R (SIAR) has potential with regard to the source apportionment of NH<sub>3</sub>, but its reliability is closely related to the signatures ( $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ ) of emission sources. Based on SIAR, we found that the agricultural contribution varied significantly with mean  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  values of endmember input. In contrast, both the contributions of fossil fuel and NH<sub>3</sub> slip showed low sensitivity against the change of endmember input. Moreover, the agricultural contribution changed by about 20% due to the variations in agricultural endmember mean values. Such a change is five times that due to the variations in endmember standard deviation values. Notably, regardless of the number of input sources tested, “non-agricultural source” was the dominant source of NH<sub>3</sub> during hazy days in January 2013 in Beijing. Since various agricultural sources showed large variations in  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ , future studies should focus on the endmember signatures of agricultural sources to further reduce the uncertainty in SIAR-based NH<sub>3</sub> source apportionment.

**Key words:** ammonia; isotope; endmember signatures; stable isotope analysis in R (SIAR); source apportionment

氨(NH<sub>3</sub>)作为大气中最主要的碱性气体,在气溶胶成核过程中具有重要作用. NH<sub>3</sub>也可与酸性气体(HNO<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)反应生成铵盐气溶胶,是霾污染期间二次粒子的主要成分<sup>[1]</sup>. 铵盐气溶胶在大气中除了影响能见度<sup>[2]</sup>,也危害人体健康<sup>[3]</sup>,并在气候变化中扮演重要角色<sup>[4]</sup>. 此外, NH<sub>3</sub>与铵盐还可以通过干湿沉降的方式从大气进入地表生态系统,是氮沉降的重要前体物<sup>[5]</sup>. 比如,我国亚热带稻田

区域还原性氮的年沉降总量达23.1 kg·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup><sup>[6]</sup>,占总氮沉降的48.7%<sup>[7]</sup>;而该结

收稿日期: 2019-11-14; 修订日期: 2020-02-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201802, 2017YFC0210100, 2017YFC0212703); 国家自然科学基金项目(41807311)

作者简介: 顾梦娜(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气氨同位素源解析, E-mail: gumengna17@mails.ucas.ac.cn  
\* 通信作者, E-mail: panyuepeng@mail.iap.ac.cn; tianshili@mail.iap.ac.cn

果在华北农田区域高达  $61.3 \sim 66.1 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 占总氮沉降的 87% 左右<sup>[8]</sup>. 尽管欧盟已针对畜禽养殖和化肥施用实施  $\text{NH}_3$  减排, 但全球其它大部分地区仍未对  $\text{NH}_3$  排放进行有效的管控, 导致卫星观测到全球  $\text{NH}_3$  柱浓度在近十几年呈现增长趋势<sup>[9]</sup>. 特别是在我国华北地区,  $\text{NH}_3$  排放量及其浓度显著高于其它区域<sup>[10,11]</sup>, 是全球  $\text{NH}_3$  浓度较高的热点区之一<sup>[12]</sup>. 近年来的观测发现, 城市  $\text{NH}_3$  浓度约为森林、草地和高山等背景区的 3 ~ 5 倍<sup>[11]</sup>, 但目前对于城市大气  $\text{NH}_3$  来源问题尚未形成统一认知. 确定  $\text{NH}_3$  的主要来源, 从而有针对性地减少  $\text{NH}_3$  排放, 对缓解我国大气霾污染和过量氮沉降都具有重要的科学意义和迫切的现实需求.

识别大气污染物来源的方法可分为扩散模型法和受体模型法 2 大类<sup>[13]</sup>. 扩散模型法通过数值模拟追踪污染物在大气中的传输转化过程, 可区分本地源和外来源, 适用于区域尺度源解析. 受体模型法是通过测定采样点大气样品的理化参数, 结合源谱信息反推各类排放源的相对贡献, 在点位尺度解析污染物来源时具有较高的精度. 这 2 类方法以往主要用于大气颗粒物和挥发性有机物来源解析<sup>[14]</sup>, 用于  $\text{NH}_3$  源解析的成功案例还非常少.

同位素示踪技术属于受体模型法, 近几年在  $\text{NH}_3$  源解析方面展现出巨大潜力<sup>[14,15]</sup>. 基于同位素质量平衡的源解析模型, 包括 Iso Source、Mix SIR 和 SIAR<sup>[16-20]</sup> 等, 都需要输入受体样品和  $\text{NH}_3$  排放源的氮同位素源谱 ( $\delta^{15}\text{N-NH}_3$ ) 作为基础数据. 理想情况下, 各排放源的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  差异显著, 使得这些模型能够成功区分不同的  $\text{NH}_3$  来源并量化其各自的贡献率. 然而, 由于  $\text{NH}_3$  排放源类型的多样性和排放条件的复杂性以及测量技术的差异性, 导致同一类排放源的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  往往具有较大的变化范围, 并可能与其它源的同位素谱带存在一定的重叠<sup>[21-25]</sup>, 进而造成  $\text{NH}_3$  源解析的不确定性. 迄今为止, 基于  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  的 SIAR 模型中源谱参数的变化如何影响  $\text{NH}_3$  的源解析结果尚无系统报道.

本文以稳定同位素模型 (SIAR) 为例, 考察源谱主要表征参量 (源的数量、源的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值及其标准差) 的敏感性, 即: 在这些参量的变化范围内随机选取数值组合成新的源谱, 输入 SIAR 模型解析大气  $\text{NH}_3$  来源; 通过对比和分析不同情景下的溯源结果, 评估源谱变化对  $\text{NH}_3$  源解析结果的影响. 本研究旨在评估同位素模型追溯  $\text{NH}_3$  来源的适用

性, 以期制定  $\text{NH}_3$  减排策略提供方法依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 同位素源解析模型

为提高  $\text{NH}_3$  同位素溯源方法的推广前景, 本文选取了可在开源软件 R 中运行的 SIAR 模型<sup>[26,27]</sup>, 它最初用于估算猎物 (多来源) 对捕食者 (单一汇) 的贡献, 对应着不同  $\text{NH}_3$  排放源对受体样品  $\text{NH}_3$  的贡献. 该模型基于贝叶斯方程, 能够解析出各个污染源的后验分布特征, 最后得出的各污染源贡献率为一个概率分布, 公式如下<sup>[27]</sup>:

$$X_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K p_k q_{jk} (s_{jk} + c_{jk})}{\sum_{k=1}^K p_k q_{jk}} + \varepsilon_{jk} \quad (1)$$

$$s_{jk} \sim N(u_{jk}, \omega_{jk}^2) \quad (2)$$

$$c_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{jk} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (4)$$

式中,  $X_{ij}$  表示第  $i$  个样品中的同位素值  $j$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, N$ ,  $j=1, 2, 3, \dots, J$ ;  $s_{jk}$  表示第  $k$  种源中第  $j$  种同位素的特征值,  $k=1, 2, 3, \dots, K$  (包括平均值  $u_{jk}$  和标准差  $\omega_{jk}^2$ );  $c_{jk}$  表示第  $k$  种源中第  $j$  种同位素的分馏系数 (包括平均值  $\lambda_{jk}$  和标准差  $\tau_{jk}^2$ );  $p_k$  表示  $k$  个源的贡献率 (由模型计算得到);  $q_{jk}$  表示第  $k$  种源中第  $j$  种同位素的浓度;  $\varepsilon_{jk}$  表示残差 (表示模型未能描述的观测偏差,  $\sigma_j^2$  由模型计算得到).

### 1.2 模型输入数据选取

SIAR 运行需要输入 2 类同位素数据, 即样品和源谱的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  信息. 样品的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  信息是一个固定的数值, 源谱信息包括某类源的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值 (平均值) 及标准差. 本研究以北京 2013 年初重霾污染期间同位素数据集为基础<sup>[28]</sup>, 选择 1 月 29 ~ 30 日样品  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  值作为 SIAR 源解析计算的目标值  $X_{ij}$ , 即本文的样品  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  值为  $-13.4\text{‰}$ . 该值为形成气溶胶铵盐的初始  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  值, 数据计算过程详见文献 [28]. 同时, 以文献 [28] 所使用的 3 类源谱作为初始  $s_{jk}$ , 其中农业源 (氮肥施用与养殖排放)、氨逃逸源 (电厂和柴油车) 与化石燃料源 (燃煤和汽油车) 的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  分别为  $(-35.1 \pm 11)\text{‰}$ 、 $(-13.0 \pm 2.3)\text{‰}$  和  $(-4.2 \pm 3.7)\text{‰}$ <sup>[25,29,30]</sup>. 这 3 类排放源同位素信号出现差异的原因是: 相比于  $^{15}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}$  更轻更易挥发, 这一特性导致农业源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  偏负; 而燃烧过程氮的分馏效应相对较小, 导致化石燃料源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  偏高, 进而显著区别于农业源的特征值<sup>[25]</sup>.

1.3 敏感性实验设计

为定量源谱不确定性对源解析结果的影响,在固定样品  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  的前提下,构建了 3 种不同的源谱参数情景,并使用 SIAR 进行源解析.

第一组实验考察源谱  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  标准差变化对解析结果的影响. 比如,在考察农业源标准差变化的影响时,固定其它两类源的平均值和标准差,同时固定农业源的平均值,只改变农业源的标准差. 以农业源特征值范围 ( $-56\text{‰} \sim -22\text{‰}$ ) 之差 ( $34\text{‰}$ ) 作为农业源标准差的最大取值范围,在此范围内以  $0.1\text{‰}$  为步长对其进行随机取值,得到新的源谱  $\text{Sd}_{a_1}, \text{Sd}_{a_2}, \text{Sd}_{a_3}, \dots, \text{Sd}_{a_n}$ , 依次代入 SIAR 进行源解析. 与农业源标准差变化实验类似,可以分别得到氨逃逸源与化石燃料源标准差变化的新源谱  $\text{Sd}_{s_1}, \text{Sd}_{s_2}, \text{Sd}_{s_3}, \dots, \text{Sd}_{s_n}$  和  $\text{Sd}_{f_1}, \text{Sd}_{f_2}, \text{Sd}_{f_3}, \dots, \text{Sd}_{f_n}$ , 代入 SIAR 进行源解析. 源谱详细信息见表 1.

第二组实验考察源谱  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值变化(改变平均值)对解析结果的影响. 首先考察了只改变某 1 个源的特征值对解析结果的影响,情景实验与

第一组实验相似. 以农业源为例,保持标准差不变,在农业源特征值范围 ( $-56\text{‰} \sim -22\text{‰}$ ) 内,以  $0.1\text{‰}$  为步长随机取值,得到农业源的特征值. 然后与化石燃料源 [ $(-4.2 \pm 3.7)\text{‰}$ ] 和氨逃逸源 [ $(-13.0 \pm 2.3)\text{‰}$ ] 集成成新的源谱  $\text{V}_{a_1}, \text{V}_{a_2}, \text{V}_{a_3}, \dots, \text{V}_{a_n}$ , 依次代入 SIAR 进行源解析. 类似地,可得到氨逃逸源与化石燃料源特征值改变对解析结果的影响. 源谱详细信息见表 1.

此外,第二组实验还考察了 3 种源特征值同时改变对源解析结果的影响. 由于农业源和化石燃料源特征值的范围较大,分别以  $5\text{‰}$  为步长对二者进行取值,得到农业源典型特征值为  $-56\text{‰}, -51\text{‰}, -46\text{‰}, -41\text{‰}, -36\text{‰}, -31\text{‰}$  和  $-26\text{‰}$ , 化石燃料源典型特征值  $-9\text{‰}, -4\text{‰}$  和  $1\text{‰}$ ; 氨逃逸源特征值范围最小,因此以  $2\text{‰}$  为步长,得到氨逃逸源典型特征值  $-15\text{‰}, -13\text{‰}$  和  $-11\text{‰}$ . 如图 1 所示,保持标准差不变,将 3 种源典型特征值随机自由组合共得到 63 种源谱组合 ( $\text{V}_{3-1}, \text{V}_{3-2}, \text{V}_{3-3}, \dots, \text{V}_{3-n}$ ), 依次代入 SIAR 进行源解析. 源谱详细信息见表 1.

表 1 第一、二组实验源谱数据<sup>1)</sup> / ‰  
Table 1 The  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  values of NO. 1 and NO. 2 experiment / ‰

源谱	农业源特征值	氨逃逸源特征值	化石燃料源特征值	农业源标准差	氨逃逸源标准差	化石燃料源标准差
$\text{Sd}_{a_n}$	-35.1	-13.0	-4.2	1 ~ 34, 0.1*	2.3	3.7
$\text{Sd}_{s_n}$	-35.1	-13.0	-4.2	11	1 ~ 4, 0.1*	3.7
$\text{Sd}_{f_n}$	-35.1	-13.0	-4.2	11	2.3	1 ~ 12, 0.5*
$\text{V}_{a_n}$	-56 ~ -22, 0.1*	-13.0	-4.2	11	2.3	3.7
$\text{V}_{s_n}$	-35.1	-15 ~ -11, 0.1*	-4.2	11	2.3	3.7
$\text{V}_{f_n}$	-35.1	-13.0	-9 ~ 3, 0.1*	11	2.3	3.7
$\text{V}_{3-n}$	-56 ~ -22, 5*	-15 ~ -11, 2*	-9 ~ 3, 5*	11	2.3	3.7

1) \* 表示在 1 ~ 34 之间,以  $0.1\text{‰}$  为步长进行随机取值,以此类推

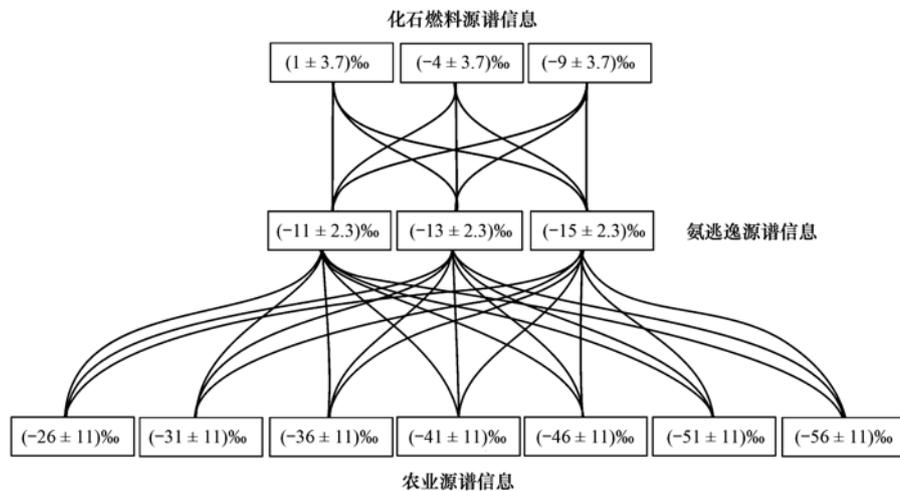


图 1 第二组实验源谱组合

Fig. 1 Combination of  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  values of NO. 2 experiment

第三组实验考察源的数量变化对解析结果的影响. 在 1.2 节的研究基础上,将源的数量由 3 个合并成 2 个,

或者拆分为 4 个和 5 个,得到的新源谱  $\text{N}_2, \text{N}_3, \text{N}_4$  和  $\text{N}_5$  依次代入 SIAR 进行源解析. 源谱详细信息见表 2.

表 2 第三组实验源谱数据(平均值 ± 标准差)<sup>1)</sup>/‰Table 2 The  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  values of NO. 3 experiment (mean ± SD)/‰

源谱	农业源	氮肥施用源	畜牧养殖源	非农业源	氨逃逸源	化石燃料源	燃煤源	交通源
N <sub>2</sub>	-35.1 ± 11.3	—	—	-6.0 ± 5.0	—	—	—	—
N <sub>3</sub>	-35.1 ± 11.3	—	—	—	-13.0 ± 2.3	-4.3 ± 3.7	—	—
N <sub>4</sub>	—	-42.2 ± 8.3	-33.1 ± 11.7	—	-13.0 ± 2.3	-4.3 ± 3.7	—	—
N <sub>5</sub>	—	-42.2 ± 8.3	-33.1 ± 11.7	—	-13.0 ± 2.3	—	-4.6 ± 4.3	-3.4 ± 1.7

1) “—”表示此处无数值

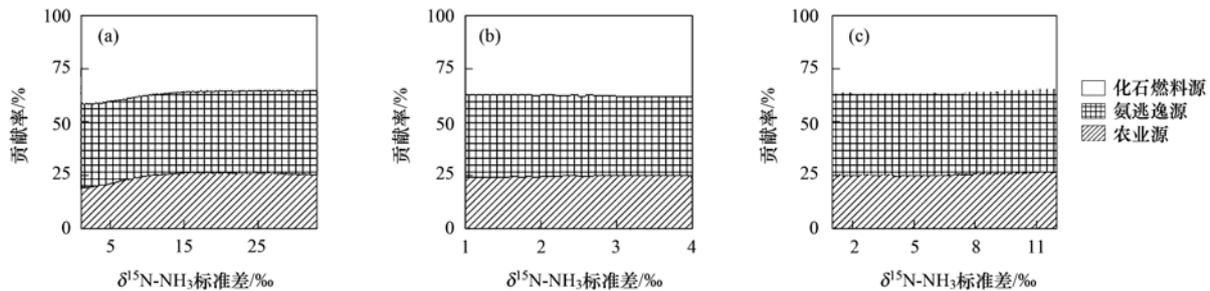
## 2 结果与讨论

### 2.1 源谱标准差改变对解析结果的影响

图 2 分别显示了农业源、氨逃逸源和化石燃料源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  标准差变化对解析结果的影响. 由图 2 (a) 可知, 在其它源标准差不变的情景下, 随着农业源标准差由 1‰ 增加至 34‰, 农业源贡献率由 18.9% 增加至 26% (增加了 7.1%), 化石燃料源贡献率由 41.6% 减小至 35.3% (减小了 6.3%), 但是

氨逃逸源贡献率无显著变化. 其中农业源标准差在 4‰~10‰ 之间取值时, 解析结果变化最大, 农业源与化石燃料源的贡献率变化了 4% 左右, 占标准差总影响的 60% 左右.

由图 2 (b) 和 2 (c) 可以看出, 改变氨逃逸源或化石燃料源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  的标准差, 农业源、化石燃料源及氨逃逸源的贡献率变幅较小, 表明氨逃逸源和化石燃料源标准差变化对 SIAR 源解析结果的影响不大.



(a) 农业源、(b) 氨逃逸源和 (c) 化石燃料源

图 2 农业源、氨逃逸源和化石燃料源标准差变化的敏感性

Fig. 2 Sensitivity analysis against SD changes in agricultural emissions,  $\text{NH}_3$  slip, and fossil fuel

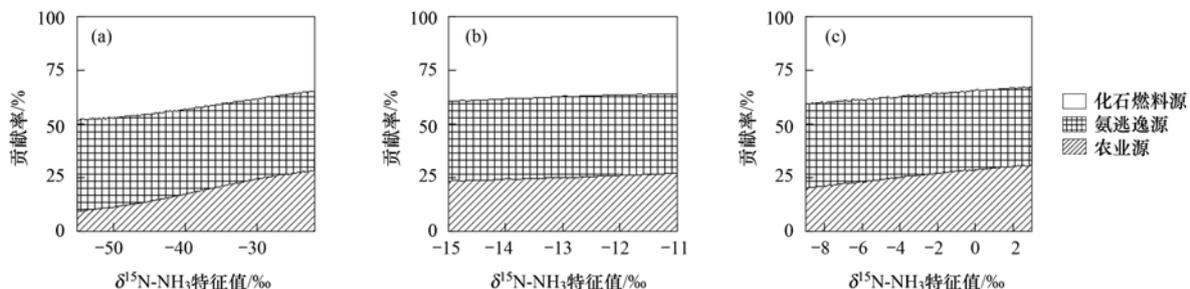
### 2.2 源特征值改变对解析结果的影响

图 3 分别显示了农业源、氨逃逸源和化石燃料源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值变化对解析结果的影响. 由图 3 (a) 可知, 在其它源特征值不变的情景下, 随着农业源特征值由 -56‰ 增加至 -22‰, 农业源贡献率由 12.3% 增加至 31.7% (增加了 19.4%), 化石燃料源贡献率由 44.9% 减小至 30.9% (减小了 14%), 氨逃逸源贡献率由 43.2% 减小至 37% (减小了 6.2%). 由此可见, 农业源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值的改变

会对解析结果产生较大影响.

由图 3 (b) 可以看出, 在其它源不变的情景下, 随着氨逃逸源特征值由 -15‰ 增加至 -11‰, 农业源与化石燃料源贡献率仅变化了 3%, 氨逃逸源贡献率没有明显变化.

由图 3 (c) 可以看出, 在其它源不变的情景下, 随着化石燃料特征值由 -9‰ 增加至 3‰, 农业源贡献率由 19.8% 增加至 30.8% (增加了 11%), 化石燃料源贡献率由 40.3% 减小至 33.0% (减小了



(a) 农业源、(b) 氨逃逸源和 (c) 化石燃料源

图 3 农业源、氨逃逸源和化石燃料源特征值变化的敏感性

Fig. 3 Sensitivity analysis against the  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  changes in agricultural emissions,  $\text{NH}_3$  slip, and fossil fuel

7.3%), 氨逃逸源贡献率由 40% 减小至 36.2% (减小了 3.8%)。

综上所述, 农业源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值的变化对源解析结果的影响最大, 其次为化石燃料源, 氨逃逸源特征值变化对解析结果影响最小。这可能是由于农业源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值范围最广, 可以改变的幅度最大。为了进一步确定相同步长特征值改变对贡献率的影响, 将图 3 中贡献率与特征值改变值相除, 计算得到特征值改变 1‰ 时贡献率的变化, 结果如表 3 所示。与图 3 结果相似, 相同步长特征值的变化对农业源贡献率影响最大, 其次为化石燃烧源, 氨逃逸源贡献率影响最小。与图 3 结果不同的是, 相同步长特征值变化时, 农业源特征值变化对贡献率整体影响最小, 农业源和化石燃料源分别改变了 0.6% 和 0.4%。而化石燃料源特征值变化对贡献率整体影响最大, 其中农业源和氨逃逸源分别改变了 0.9% 和 0.3%。

表 3 1‰ 特征值改变对贡献率的影响 / % · ‰<sup>-1</sup>

Table 3 Influence of 1‰  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  change on contribution rate / % · ‰<sup>-1</sup>

项目	农业源贡献率	氨逃逸源贡献率	化石燃料源贡献率
农业源特征值	0.6	0.2	0.4
氨逃逸源特征值	0.8	0	0.8
化石燃料源特征值	0.9	0.3	0.6

### 2.3 3 种源特征值同时改变对解析结果的影响

图 4 展示了 3 种源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值同时变化对解析结果的影响。从中可知, 与 1 种源特征值变化类似, 3 种源特征值随机变化时, 农业源特征值变化 (颜色) 对解析结果的影响最大, 其次是化石燃料源 (尺寸), 氨逃逸源特征值变化 (形状) 对解析结果影响最小。

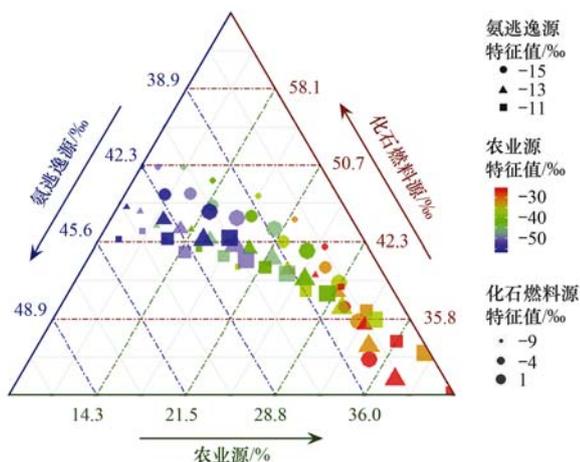


图 4 3 种源特征值同时变化的敏感性

Fig. 4 Sensitivity analysis against the  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  variations in the three sources

值得注意的是, 3 种源特征值随机变化时, 农业源贡献率最大波动幅度为 7%~36%, 化石燃料源贡献率变化幅度为 28%~51%, 氨逃逸源贡献率变化幅度为 36%~46%, 明显高于只有 1 种源特征值变化对贡献率的影响。

通过 2.1~2.3 节的分析发现, 农业源参数变化对解析结果的影响最大, 特别是农业源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值。这可能是由于农业源包括的畜牧养殖 [(-33.13 ± 11.7)‰] 和氮肥施用 [(-42.15 ± 8.3)‰] 的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  差异较大, 造成农业源标准差和特征值可变范围最广, 因此对贡献率影响最大。另外, 养鸡场 [(-46.05 ± 14)‰]、养牛场 [(-27.96 ± 6.3)‰] 和养猪场 [(-30.3 ± 1.3)‰] 的特征值同样存在较大差异<sup>[16]</sup>。因此, 在接下来的情景分析中, 将各大类源进行拆分细化, 用于分析源的数量对解析结果的影响。

### 2.4 源数量对源解析结果的影响

图 5 展示了改变源的数量对源解析结果的影响。表 4 统计了源的数量不同时农业源与非农业源的相对贡献。假定排放源为农业、氨逃逸与化石燃料 3 类源时, 本研究结果显示农业源贡献率为 24.7%, 非农业源贡献率为 75.3% (其中氨逃逸贡献为 38.0%, 化石燃料为 37.3%), 这与文献[28]使用 Iso

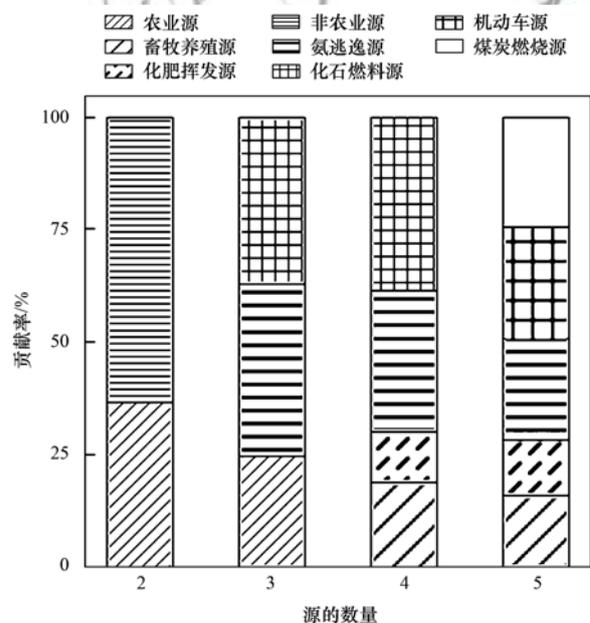


图 5 源的数量变化对源解析结果的影响

Fig. 5 Uncertainty analysis against changes in source numbers

表 4 农业源与非农业源的贡献率的变化 / %

Table 4 Variation of agricultural and non-agricultural sources' contributions / %

项目	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>
农业源贡献率	36.6	24.7	30.0	28.5
非农业源贡献率	63.4	75.3	70.0	71.5

source 方法得到的研究结果(非农业源贡献率 85%)较为一致。

在这 3 类源的基础上,如果将氨逃逸与化石燃料源合并为非农业源,得到农业与非农业 2 类来源,此时解析的结果为农业源贡献 36.6%,非农业源贡献 63.4%。可以看出,非农业源的贡献率比 3 个源的时候减小了 11.9%。

在 3 类源的基础上,如果保持氨逃逸与化石燃料源不变,将农业源拆分为畜牧养殖与氮肥施用,最终输入 4 类源开展源解析,得到的结果是氨逃逸源贡献 31.5%、化石燃料源贡献 38.5%、畜牧养殖源贡献 18.8% 以及氮肥施用源贡献 11.3%。将解析结果进行加和,得到农业源和非农业源的贡献分别为 30.0% 和 70.0% (表 4)。可以看出,农业源贡献率比 3 个源的时候增加了 5.3%,特征值与之相邻的氨逃逸源贡献率减小了 6.5%。

在上面 4 类源的基础上,进一步将化石燃料源分解为交通和燃煤源,得到 5 类源的解析结果,分别是氨逃逸源占 22.3%、交通源 24.9%、燃煤源 24.4%、畜牧养殖源 16.0%、氮肥施用源 12.5%。其中农业源和非农业源分别贡献 28.5% 和 71.5% (表 4)。可以看出,化石燃料源贡献率比 4 个源的时候增加了 10.8%,与之相邻的氨逃逸源贡献率减小了 9.2%。由此可知,拆分源谱可以增加被拆分源的贡献率,而相邻源的贡献率则会减小,但变化幅度小于 10%。

由上看出,源的数量增减并不改变“北京 2013 年初重霾污染期间非农业源为主”的解析结果。但随着源的细化(数量增加),农业源与非农业源贡献率的变化幅度都有减小的趋势,即贡献率趋于稳定。因此,明确排放源数量和类型及  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  信息,可以减小由源谱参数造成的源解析不确定性。考虑到农业源对 SIAR 模型参数的改变最为敏感,且不同类型的农业源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  变化较大,未来需要深入研究农业源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  的时空变化规律及控制因素,以建立本地化的  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  源谱,进而降低同位素源解析结果的不确定性。

### 3 结论

(1) 农业源  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  标准差的改变造成农业源贡献率变化约 7.1%,氨逃逸源、化石燃料源标准差变化对 SIAR 源解析结果的影响较小;源谱  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  标准差不是 SIAR 模型源解析结果的主要影响参数。

(2) 农业源特征值改变可造成农业源贡献率变化约 20%;若农业源、氨逃逸源和化石燃料源这 3 种

源特征值同时改变,农业源的贡献率最多变化 29%;源谱  $\delta^{15}\text{N-NH}_3$  特征值是 SIAR 模型源解析结果的主要影响参数。

(3) 排放源数量的增减并不改变“非农业源是北京 2013 年 1 月霾污染期间大气  $\text{NH}_3$  主要来源”的解析结果。增加同类排放源的数量可改进  $\text{NH}_3$  源解析的精度,最终使得农业源与非农业源的各自贡献趋于稳定。

### 参考文献:

- [1] Ianniello A, Spataro F, Esposito G, et al. Chemical characteristics of inorganic ammonium salts in  $\text{PM}_{2.5}$  in the atmosphere of Beijing (China) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(21): 10803-10822.
- [2] 马佳, 于兴娜, 安俊琳, 等. 南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 41-50. Ma J, Yu X N, An J L, et al. Contributions of factors that influenced the visibility in north suburb of nanjing in winter and spring [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 41-50.
- [3] Feng Y Y, Huang X J, Sun H Z, et al. Framingham risk score modifies the effect of  $\text{PM}_{10}$  on heart rate variability [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **523**: 146-151.
- [4] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 1992, **255** (5043): 423-430.
- [5] 许稳, 金鑫, 罗少辉, 等. 西宁近郊大气氮干湿沉降研究 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1279-1288. Xu W, Jin X, Luo S H, et al. Dry and bulk nitrogen deposition in suburbs of Xining City [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (4): 1279-1288.
- [6] 王杰飞, 朱潇, 沈健林, 等. 亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2264-2272. Wang J F, Zhu X, Shen J L, et al. Atmospheric ammonia/ammonium-nitrogen concentrations and wet and dry deposition rates in a double rice region in subtropical China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2264-2272.
- [7] 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 等. 亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2557-2565. Zhu X, Wang J F, Shen J L, et al. Comparison between atmospheric wet-only and bulk nitrogen depositions at two sites in subtropical China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2557-2565.
- [8] Pan Y P, Wang Y S, Tang G Q, et al. Wet and dry deposition of atmospheric nitrogen at ten sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12** (14): 6515-6535.
- [9] Liu M X, Huang X, Song Y, et al. Rapid  $\text{SO}_2$  emission reductions significantly increase tropospheric ammonia concentrations over the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(24): 17933-17943.
- [10] 董文焯, 邢佳, 王书肖. 1994~2006 年中国人源大气气排放时空分布 [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.
- [11] Pan Y P, Tian S L, Zhao Y H, et al. Identifying ammonia hotspots in China using a national observation Network [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (7): 3926-

- 3934.
- [12] Van Damme M, Clarisse L, Whitburn S, *et al.* Industrial and agricultural ammonia point sources exposed[J]. *Nature*, 2018, **564**(7734): 99-103.
- [13] 张延君, 郑玫, 蔡靖, 等. PM<sub>2.5</sub>源解析方法的比较与评述[J]. *科学通报*, 2015, **60**(2): 109-121.  
Zhang Y J, Zheng M, Cai J, *et al.* Comparison and overview of PM<sub>2.5</sub> source apportionment methods [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(2): 109-121.
- [14] Pan Y P, Tian S L, Liu D W, *et al.* Isotopic evidence for enhanced fossil fuel sources of aerosol ammonium in the urban atmosphere[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 942-947.
- [15] Pan Y P, Tian S L, Liu D W, *et al.* Source apportionment of aerosol ammonium in an ammonia-rich atmosphere: an isotopic study of summer clean and hazy days in urban Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(10): 5681-5689.
- [16] Chang Y H, Liu X J, Deng C R, *et al.* Source apportionment of atmospheric ammonia before, during, and after the 2014 APEC summit in Beijing using stable nitrogen isotope signatures [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(18): 11635-11647.
- [17] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J]. *Oecologia*, 2003, **136**(2): 261-269.
- [18] Ti C P, Gao B, Luo Y X, *et al.* Isotopic characterization of NH<sub>x</sub>-N in deposition and major emission sources [J]. *Biogeochemistry*, 2018, **138**(1): 85-102.
- [19] Zong Z, Tan Y, Wang X P, *et al.* Assessment and quantification of NO<sub>x</sub> sources at a regional background site in North China: Comparative results from a Bayesian isotopic mixing model and a positive matrix factorization model [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 1379-1386.
- [20] 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 等. 氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2039-2047.  
Jin Z F, Zhang W L, Zheng Q, *et al.* Contribution of nitrogen sources in water sources by combining nitrogen and oxygen isotopes and SIAR [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2039-2047.
- [21] Heaton T H E. <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N ratios of nitrate and ammonium in rain at Pretoria, South Africa [J]. *Atmospheric Environment (1967)*, 1987, **21**(4): 843-852.
- [22] Hristov A N, Zaman S, Pol M V, *et al.* Nitrogen losses from dairy manure estimated through nitrogen mass balance and chemical markers [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(6): 2438-2448.
- [23] Savard M M, Cole A, Smirnov A, *et al.* δ<sup>15</sup>N values of atmospheric N species simultaneously collected using sector-based samplers distant from sources-isotopic inheritance and fractionation [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **162**: 11-22.
- [24] Smirnov A, Savard M M, Vet R, *et al.* Nitrogen and triple oxygen isotopes in near-road air samples using chemical conversion and thermal decomposition [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2012, **26**(23): 2791-2804.
- [25] Felix J D, Elliott E M, Gish T J, *et al.* Characterizing the isotopic composition of atmospheric ammonia emission sources using passive samplers and a combined oxidation-bacterial denitrifier approach [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2013, **27**(20): 2239-2246.
- [26] Parnell A C, Phillips D L, Bearhop S, *et al.* Bayesian stable isotope mixing models [J]. *Environmetrics*, 2013, **24**(6): 387-399.
- [27] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, *et al.* Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation [J]. *PLoS One*, 2010, **5**(3): e9672.
- [28] Pan Y P, Tian S L, Liu D W, *et al.* Fossil fuel combustion-related emissions dominate atmospheric ammonia sources during severe haze episodes: evidence from <sup>15</sup>N-stable isotope in size-resolved aerosol ammonium [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(15): 8049-8056.
- [29] Bokhoven C, Theuwen H J. Determination of the abundance of carbon and nitrogen isotopes in dutch coals and natural gas [J]. *Nature*, 1966, **211**(5052): 927-929.
- [30] Freyer H D, Chemistry I O, Center N, *et al.* Seasonal trends of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nitrogen isotope composition in rain collected at Jülich, Germany [J]. *Tellus*, 1978, **30**(1): 83-92.

## CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China .....	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change .....	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM <sub>2.5</sub> Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou .....	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter .....	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province .....	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan .....	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou .....	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan .....	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode .....	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer .....	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language .....	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou .....	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode .....	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO <sub>x</sub> Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process .....	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City .....	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter .....	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain .....	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin .....	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin .....	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors .....	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake .....	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed .....	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China .....	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang .....	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin .....	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir .....	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes .....	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet .....	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater .....	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River .....	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo .....	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir .....	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems .....	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water .....	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar .....	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe <sup>0</sup> /WMF) .....	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite .....	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter .....	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater .....	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge .....	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature .....	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China .....	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network .....	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N <sub>2</sub> O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil .....	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China .....	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils .....	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil .....	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai .....	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings .....	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)