

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴呈, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橛橛 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益

边泽君, 闻超玉, 郎建垒*, 范晓菡, 夏祥晨, 周颖

(北京工业大学环境与生命学部, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 氨减排会对周边大气PM_{2.5}污染改善带来潜在的溢出效益, 但尚缺乏对其规律的探究. 利用WRF-CAMx-PSAT模型模拟量化了典型城市(邢台)NH₃减排对周边地区大气PM_{2.5}浓度降低的溢出效益, 探究了其在不同季节与不同NH₃减排比例下、对PM_{2.5}及其二次无机化学组分随距离变化的响应规律. 结果表明: ①NH₃减排在不同减排比例下对周边城市的PM_{2.5}及其二次组分均存在溢出效益, 其效益随周边受体城市与减排城市相对距离的增加呈显著的指数下降的趋势; ②在1月的溢出效益远高于7月, 1月在不同减排比例下京津冀PM_{2.5}浓度下降值约为7月的7.4倍; ③各组分溢出范围随着减排比例的增加不断扩大, NH₄⁺和SO₄²⁻的溢出最远距离呈指数趋势上升, NO₃⁻的溢出最远距离呈线性趋势上升; ④NO₃⁻、NH₄⁺和SO₄²⁻的溢出范围及浓度变化随着减排比例的增加不断上升, 其中NO₃⁻溢出范围最远约为NH₄⁺和SO₄²⁻的3.6倍和3.4倍, 浓度变化最大约为NH₄⁺和SO₄²⁻的2.6倍和7.3倍.

关键词: NH₃减排; 溢出效益; WRF-CAMx-PSAT模型; 大气污染; 京津冀

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1994-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202305265

Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM_{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei*, FAN Xiao-han, XIA Xiang-chen, ZHOU Ying

(Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Ammonia emission reduction would bring potential spillover benefits to the improvement of surrounding atmospheric PM_{2.5} pollution, but the investigation of its patterns is lacking. The WRF-CAMx-PSAT model was used to quantify the spillover benefits of NH₃ emission reduction in a typical city (Xingtai) on the reduction in PM_{2.5} concentrations in the surrounding area and to investigate the response patterns of PM_{2.5} and its secondary inorganic chemical components with distance in different seasons and at different NH₃ emission reduction ratios. The results showed that: ① the spillover benefits of NH₃ emission reduction on PM_{2.5} and its secondary components in neighboring cities at different reduction ratios and the benefits showed a significant exponential decrease with the increase in the relative distance between the neighboring receptor cities and the reduction cities. ② The spillover benefits in January were much higher than those in July, and the reduction in PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei at different reduction ratios in January was approximately 7.4 times that in July. ③ The spillover range was expanding with the increase in emission reduction ratio, the farthest distance of NH₄⁺ and SO₄²⁻ spillover was increasing exponentially, and the farthest distance of NO₃⁻ spillover was increasing linearly. ④ The spillover range and concentration change in NO₃⁻, NH₄⁺, and SO₄²⁻ increased with the increase in the abatement ratio, in which the spillover range of NO₃⁻ was the farthest, approximately 3.6 times and 3.4 times that of NH₄⁺ and SO₄²⁻, and the concentration change was the largest, approximately 2.6 times and 7.3 times that of NH₄⁺ and SO₄²⁻.

Key words: NH₃ emission reduction; spillover benefits; WRF-CAMx-PSAT model; air pollution; Beijing-Tianjin-Hebei Region

我国作为被世界公认的全球NH₃排放热点国家^[1,2], 在2018年排放达 9.90×10^6 t^[3], 因此, 我国NH₃减排的影响具有极大潜力. 而NH₃作为大气中最重要碱性污染物气体, 对SIA的形成有重要的贡献, 一方面, NH₃能够通过化学反应转化为铵盐(NH₄⁺)^[4]; 另一方面, NH₃通过中和作用, 能够促进大气中SO₂和NO_x等酸性气体发生二次转化生成硫酸盐(SO₄²⁻)和硝酸盐(NO₃⁻)等二次无机气溶胶, 在影响前体物浓度的同时间接加重PM_{2.5}污染^[5]. 近几年针对NH₃减排已有大量的研究, 其中包含对不同NH₃源减排效果探究^[6-9]、不同地区及行业NH₃减排潜力的研究^[10-12]、NH₃在不同减排比例下PM_{2.5}及其二次组分变化趋势研究^[13-16]和NH₃与SO₂和NO_x协同减排研究^[17-20], 但这种探究仅局限于对减排地区本地的分析, 缺少对区域影响的探究. 在之前的研究中指出, NH₃在离其源头4~5 km的范围内将快速沉积, 不能

够进行长距离的传输^[21], 近期则有研究依据同位素标记的方法证实NH₃可以进行较远距离的迁移并影响较远地区的污染物浓度^[22], 与此同时部分学者已初步关注到亚洲地区NH₃减排造成的区域影响^[23], 但并未对其具体影响范围进行分析, 因此量化NH₃减排所造成的区域影响是极其必要的. 京津冀地区作为我国NH₃排放的重点区域^[24], 长期处于富氨状态下, 以其中单个城市进行NH₃减排时, 会对周边城市的PM_{2.5}及其组分的浓度造成影响, 为了明晰该影响及不同季节减排下的规律, 在本研究中定义其为NH₃减排所引起的溢出效益进行探究. 因此, 在区

收稿日期: 2023-05-30; 修订日期: 2023-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878012); 北京市科技新星计划项目(Z201100006820098)

作者简介: 边泽君(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治治理, E-mail: bianzj0701@emails.bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jllang@bjut.edu.cn

域联防联控大背景下,亟需明晰NH₃减排对周边地区PM_{2.5}及其二次组分改善的溢出效益规律。

综上,本研究结合数值模拟(WRF-CAMx-PSAT模型),以邢台作为减排案例城市,2019年的1月和7月为研究时段,设置梯度(10%、30%、50%、70%和100%)减排比例,量化了典型城市(邢台)NH₃减排对周边地区大气PM_{2.5}浓度降低的溢出效益,探究了其在不同季节与不同NH₃减排比例下、对PM_{2.5}及其二次无机化学组分随距离变化的响应规律。本文通过加深NH₃减排对大气PM_{2.5}及其二次组分的影响认知,以期为NH₃减排策略的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

验证模型模拟数据如下:①京津冀近地面SO₂、NO₂以及PM_{2.5}的浓度模拟数据来源于中国环境监测总站实时发布的常规污染物浓度数据(<http://www.cnemc.cn>);②SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺浓度的监测数据来源于北京工业大学环能楼顶部(距地面约20 m)^[25]、唐山市环境监测中心站楼顶(距地面高度约为15~20 m)和石家庄市桥东区体育南大街槐岭路32号的观测数据。

WRF主要输入数据如下:①气象初始场和边界数据采用的是美国国家环境预报中心(NCEP)提供的

时间分辨率为6 h、空间分辨率为1°×1°的FNL全球分析数据集;②地形条件与土地利用数据采用美国国家地质勘探局的全球地形与土地利用数据(<http://nationalmap.gov/elevation.html>)。

模型所需清单数据如下。模型为双层嵌套:①外层的排放清单来自清华大学建立的中国多分辨率排放清单(MEIC, <http://meicmodel.org>)^[26,27];②内层的排放清单基于实验室建立的2019年中国县级NH₃排放清单^[28],其中典型的排放源包括农田施肥、农田土壤、畜禽养殖、生物质燃烧、人体排泄、废弃物处理、工业生产、机动车和燃料燃烧。

1.2 模型设置与验证

1.2.1 模型模拟

研究采用WRF-CAMx耦合模型对研究区域开展空气质量数值模拟工作,选择1月和7月分别代表冬季和夏季,即NH₃排放量较小和较大的两个季节。空气质量模型采用双层嵌套,空气质量模型CAMx的外层模拟区域(D1)覆盖中国东部大部分区域,网格分辨率为27 km×27 km,内层区域(D2)覆盖京津冀及河南、山东、山西及内蒙古部分区域,网格分辨率为9 km×9 km。外层网格的模拟结果为内层模拟提供边界场和初始场,具体的网格设置如图1所示。WRF(v3.5.1)和CAMx(v6.30)的模型具体参数设置见表1。

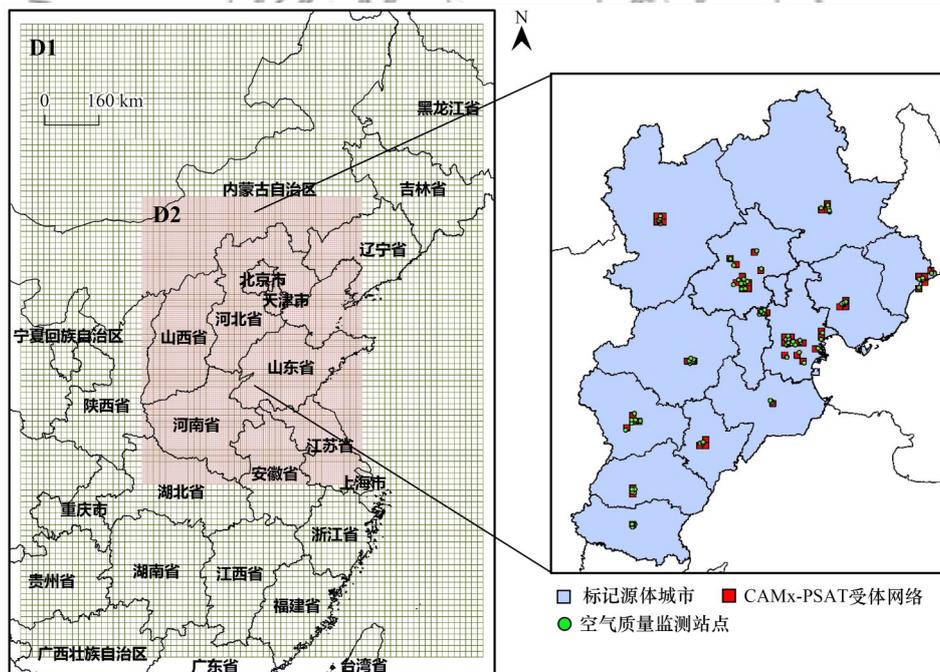


图1 模型模拟区域设置示意

Fig. 1 Schematic of study area settings

同时研究使用CAMx来源识别模块(PSAT)对京津冀地区进行示踪标记,具体模拟情景如表2所示。京津冀作为长期处于富氨状态下的地区,在此选择

随减排变化趋势明显^[28]且位于京津冀由南向北传输通道上的邢台作为典型城市进行模拟分析,选取2019年1月和7月为模拟时段,并分别在1月和7月

表1 WRF和CAMx模型参数设置

Table 1 WRF and CAMx model parameter settings

WRF-3.5.1 模型	模型参数	CAMx-6.30 模型	模型参数
投影方式	Lambert投影	水平平流方案	PPM
微物理方案	Morrison Double	气相化学机制	CB05
长波辐射方案	RRTMG	气溶胶化学机制	CF
短波辐射方案	RRTMG	光化学速率	TOMS臭氧浓度资料
土地利用方案	Noah	网格烟羽模块	关
PBL方案	YSU		
积云方案	Grell-Devenyi		

设置 NH₃ 梯度 (0%、10%、30%、50%、70% 和 100%) 减排情景。

1.2.2 模型验证

为定量评估 WRF-CAMx 模式模拟效果, 采用相关系数 (correlation coefficient, *R*)、标准化平均偏差 (normalized mean bias, NMB) 和标准化平均误差 (normalized mean error, NME) 来评估模拟值的准确性。

$$R = \frac{\text{Cov}(c_m, c_o)}{\sqrt{D(c_m)}\sqrt{D(c_o)}} \quad (1)$$

$$\text{NMB} = \frac{\sum_1^n (c_m - c_o)}{\sum_1^n c_o} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{NME} = \frac{\sum_1^n |c_m - c_o|}{\sum_1^n c_o} \times 100\% \quad (3)$$

式中, *m* 和 *o* 分别表示模拟情景和观测情景, *c_m* 表示通过模型模拟出的污染物浓度 (μg·m⁻³), *c_o* 表示监测站点观测的污染物浓度 (μg·m⁻³)。

对比验证结果如表 2 所示, 结果显示模拟的 SO₂、NO₂、PM_{2.5}、SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的 *R* 值均在 0.5 以上, NMB 和 NME 均在 60% 以内, 误差在合理范围之内^[29], 可用于后续的结果分析。

1.3 NH₃ 减排影响指数

基于 WRF-CAMx-PSAT 模拟, 可以计算邢台在

梯度 NH₃ 减排下对周边受体城市大气污染物浓度贡献的变化量, 称为 NH₃ 减排浓度贡献变化量 (Δ*c_{A_B, PM_{2.5}, α_i}*)。为量化同一溢出范围内城市减排对着周边城市的浓度影响, 计算了 NH₃ 减排带来的周边城市的浓度变化 (Δ*c_{B, p, α_i}*)。

(1) NH₃ 减排浓度贡献变化量 (Δ*c_{A_B, PM_{2.5}, α_i}*)

$$\Delta c_{A_B, PM_{2.5}, \alpha_i} = c_{A_B, PM_{2.5}, \alpha_0} - c_{A_B, PM_{2.5}, \alpha_i} \quad (4)$$

式中, A、B、PM_{2.5}、α₀ 和 α_{*i*} 表示减排城市 (邢台)、受体城市 (京津冀各城市)、PM_{2.5}、基准情景和减排情景 (10%、30%、50%、70% 和 100%); Δ*c_{A_B, p, α_i}* 表示城市 A 在基准情景 α₀ 对受体城市 PM_{2.5} 的浓度贡献与在减排情景 α_{*i*} 下对受体城市 PM_{2.5} 的浓度贡献的差值, 即 NH₃ 减排浓度贡献变化量 (μg·m⁻³); *c_{A_B, PM_{2.5}, α₀}* 表示城市 A 在基准情景 α₀ 对受体城市 PM_{2.5} 的浓度贡献量 (μg·m⁻³); *c_{A_B, PM_{2.5}, α_i}* 表示城市 A 在减排情景 α_{*i*} 下对受体城市 PM_{2.5} 的浓度贡献量 (μg·m⁻³)。

(2) NH₃ 减排溢出浓度变化量 (Δ*c_{B, p, α_i}*)

$$\Delta c_{B, p, \alpha_i} = \frac{1}{n} \sum_n (c_{B, p, \alpha_0} - c_{B, p, \alpha_i}) \quad (5)$$

式中, B 和 p 分别表示京津冀地区各城市、PM_{2.5} 及二次组分 (NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻); *n* 表示城市 B 所占网格个数; Δ*c_{B, p, α_i}* 表示邢台地区的 NH₃ 排放在进行 α_{*i*} 梯度削减后, 引起城市 B 各二次组分 p 的浓度变化量 (μg·m⁻³); *c_{B, p, α₀}* 表示城市 B 在基准情景下, 各二次组分浓度 (μg·m⁻³); *c_{B, p, α_i}* 表示城市 B 在 α_{*i*} 减排情景下, 各二次组分的浓度 (μg·m⁻³)。

表2 京津冀地区 SO₂、NO₂、PM_{2.5}、SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 模拟结果与监测浓度对比验证

Table 2 Performance statistics for concentrations of SO₂, NO₂, PM_{2.5}, SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ in Beijing-Tianjin-Hebei Region

评估指标	1月			7月		
	<i>R</i>	NMB/%	NME/%	<i>R</i>	NMB/%	NME/%
PM _{2.5}	0.84	-17.3	31.5	0.71	-42.6	31.4
NO ₂	0.70	20.1	25.4	0.62	30.2	32.9
SO ₂	0.59	-11.5	24.2	0.56	33.2	32.0
SO ₄ ²⁻	0.63	-14.3	26.2	0.54	-27.5	34.6
NO ₃ ⁻	0.62	-19.5	18.4	0.51	-32.3	32.1
NH ₄ ⁺	0.56	-25.8	24.2	0.52	-32.1	35.6

2 结果与讨论

2.1 NH₃减排溢出效益

NH₃作为大气中唯一的碱性气体, 是生成PM_{2.5}的重要前体物^[30,31]. 在本研究中通过对邢台设置梯度比例(10%、30%、50%、70%和100%)减排, 发现局地NH₃减排会引起污染物浓度发生区域性变化. 图2为邢台本地在不同NH₃减排比例下与基准情景作差

下, 区域内各网格PM_{2.5}浓度的变化量($\Delta c_{PM_{2.5}, \alpha_i}$), 可以发现随着比例的增加, 该变化量随之增大, 各网格色阶随之不断加深, 呈“溢出”的形态. 该变化不仅包含减排城市本地(邢台)的PM_{2.5}浓度的降低, 同时还会引起周边城市PM_{2.5}浓度一定量的减少, 呈现出由中心向四周逐步递减的现象, 该现象证实NH₃减排造成的影响具有一定的区域性, 在本研究中定义该现象为NH₃减排引起的溢出效益.

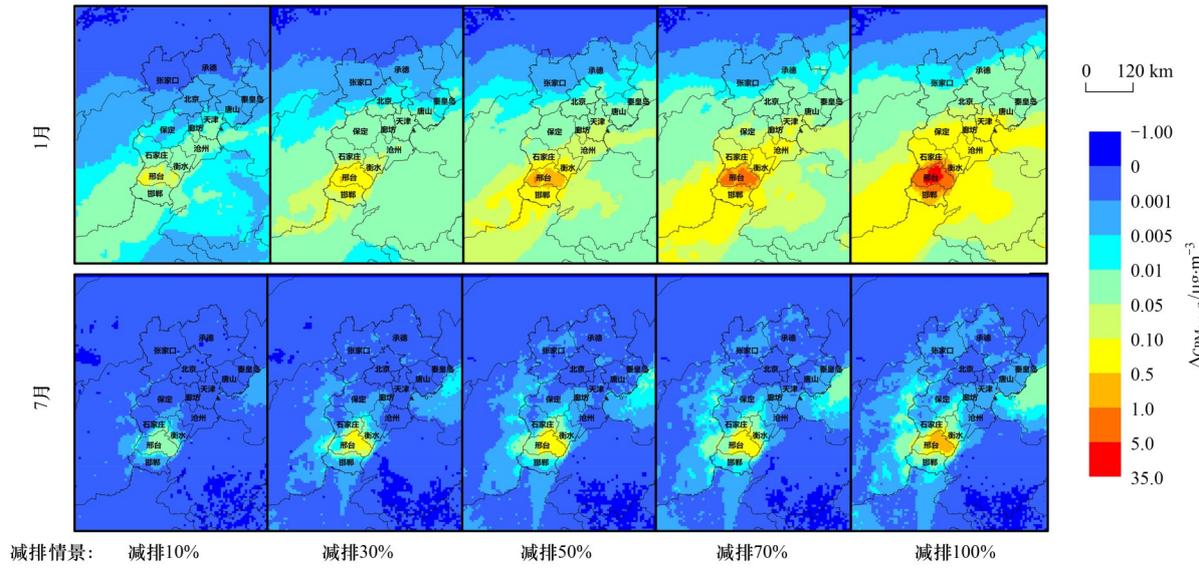


图2 邢台本地NH₃在不同减排比例下对京津冀地区大气PM_{2.5}浓度的溢出效益

Fig. 2 Spillover benefits of local NH₃ in Xingtai on atmospheric PM_{2.5} concentrations in Beijing-Tianjin-Hebei Region under different emission reduction ratios

2.1.1 相对距离对溢出效益的影响

为进一步探究NH₃减排造成的溢出效益的扩散程度, 本研究对邢台在梯度减排后对周边城市PM_{2.5}影响的范围进行量化. 图3为邢台在不同氨减排情景下对其他城市的PM_{2.5}浓度贡献与距离的关系, 分析不同减排比例下邢台对周边受体城市的浓度贡献与距离之间的规律. 通过SPSS进行函数拟合发现, 城市NH₃减排对周边城市PM_{2.5}浓度贡献与城市间的相对距离之间呈现较好的指数函数关系, 相关性较高, R值均在0.7~0.9之间. 显著性检验结果表明, P值均<0.01, 显著相关. 为了更直观地探究减排城市对周边城市浓度贡献随距离的变化, 通过对数化, 将上述指数函数关系转化为线性关系. 公式转换如下所示.

$$y = be^{kx} \tag{6}$$

$$\ln y = kx + \ln b \tag{7}$$

$$y_1 = \ln y \tag{8}$$

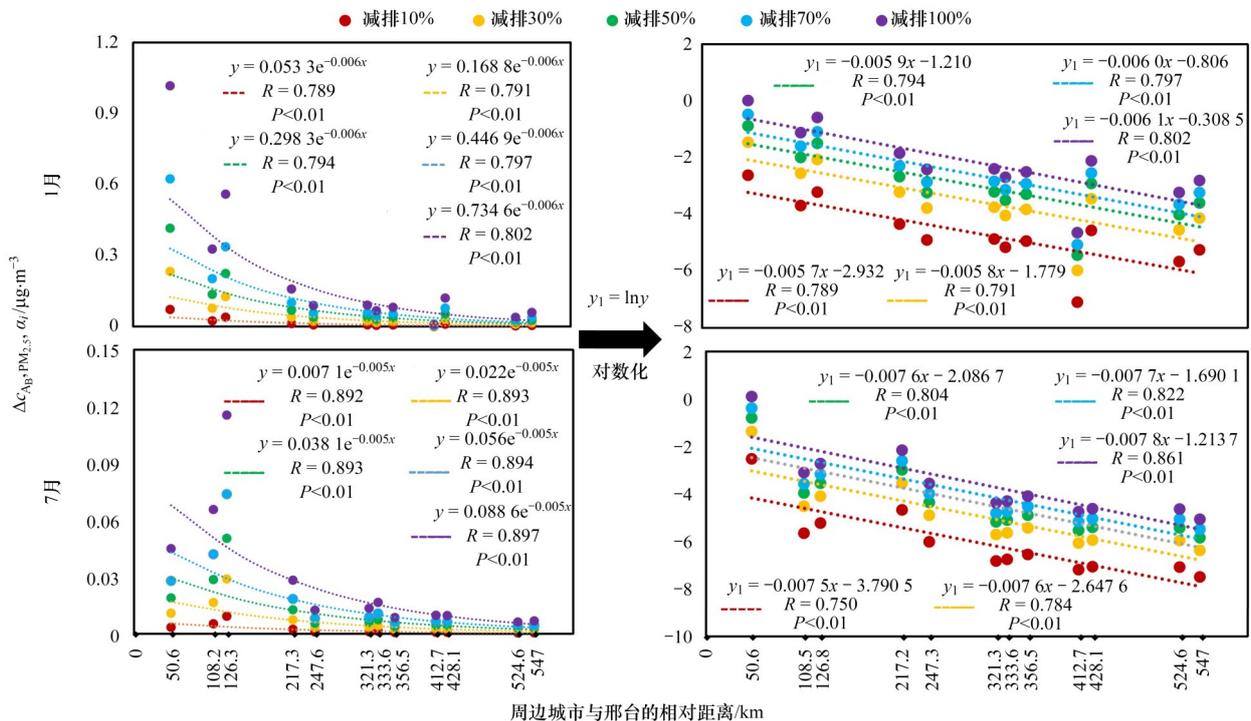
式中, y表示减排城市对京津冀其它城市的PM_{2.5}浓度贡献变化量(μg·m⁻³); x表示其它城市对减排城市的相对距离(km); k表示减排城市对京津冀其它城市的

PM_{2.5}浓度贡献随距离的变化率, 其中k的绝对值定义为变化指数, 变化指数越大, 减排城市对京津冀其它城市的浓度贡献越容易随距离变化; ln b表示在一定程度上减排城市对本地PM_{2.5}浓度贡献(μg·m⁻³).

在不同减排比例下, 1月邢台对邯郸、石家庄、衡水、保定、沧州、天津、廊坊、北京、张家口、唐山、承德和秦皇岛的PM_{2.5}浓度贡献变化量分别可达0.07~1.02、0.03~0.33、0.04~0.56、0.01~0.016、0.01~0.09、0.01~0.09、0.01~0.07、0.01~0.08、0.00~0.01、0.01~0.12、0.00~0.04和0.01~0.06 μg·m⁻³; 7月PM_{2.5}浓度贡献变化量远低于1月, 分别可达0.00~0.05、0.01~0.07、0.01~0.12、0.00~0.03、0.00~0.01、0.00~0.01、0.00~0.02、0.00~0.01、0.00~0.01、0.00~0.01和0.00~0.01 μg·m⁻³. 根据图3可以发现同一减排比例下, 减排城市对周边城市PM_{2.5}浓度贡献量随相对距离的增加而逐步下降, 减排城市影响周边城市PM_{2.5}浓度主要有两条途径: ①减排城市本地NH₃减少, 原本应传输到周边城市的NH₃未传输到周边城市, 影响周边城市本地的转化; ②减排城市本地NH₃减

少,本地转化的PM_{2.5}相应减少,传输到周边城市的PM_{2.5}随之减少.由于NH₃和PM_{2.5}传输距离和大气停留时间的差异,会导致其受距离的影响较大,从而呈现减排城市对周边城市PM_{2.5}浓度贡献随着相对距离的增加而逐步下降的趋势,并在相对距离超过200 km时,不同减排比例带来的浓度变化大大降低.在不同的减排比例下,可以发现随着减排比例的增加,*k*的绝对值越高,在1月由0.005 7逐步增加至0.006 1,在7月由0.007 5逐步增加至0.007 8,整体呈现以下规律:100% > 70% > 50% > 30% > 10%,即减排城市对周边城市PM_{2.5}浓度贡献

的变化速率越快. ln*b*在不同减排情景下也呈现同一规律:100% > 70% > 50% > 30% > 10%,这表明随着减排比例的增加,减排城市在不同减排比例下,其减排量对减排城市本地PM_{2.5}浓度贡献越大.这是由于随着减排比例的增加,减排城市本地由富氨程度向贫氨程度转变^[32].本地NH₃浓度不足以和大气中SO₂和NO_x反应生成SO₄²⁻和NO₃⁻,因此当减排100%时,由本地NH₃参与的PM_{2.5}生成过程中断,对本地的影响极大,但由于NH₃不易发生长距离传输^[33,34],对周边城市PM_{2.5}浓度造成的影响较小.



各城市与邢台相对距离分别为:邯郸为50.6 km、石家庄为108.6 km、衡水为126.8 km、保定为217.2 km、沧州为247.3 km、天津为321.3 km、廊坊为333.6 km、张家口为412.7 km、唐山为428.1 km、承德为524.6 km、秦皇岛为547 km

图3 邢台在梯度减排情景下对周边城市PM_{2.5}浓度贡献变化量与相对距离的关系

Fig. 3 Relationship between the amount of change in PM_{2.5} concentration contribution of Xingtai to neighboring cities under gradient reduction scenario and relative distance

2.1.2 季节变化对溢出效益的影响

NH₃对于PM_{2.5}具有直接或间接影响作用,当大气中NH₃含量不同时,对大气PM_{2.5}的生成作用存在非线性影响^[35].图4为邢台在1月和7月在梯度减排情景与基准情景对比下京津冀地区PM_{2.5}浓度变化量(Δ*c*_{BTH,PM_{2.5},α_i}).其中邢台减排对京津冀地区PM_{2.5}的影响随减排比例的增加呈指数上升变化趋势.其中1月京津冀地区PM_{2.5}浓度变化量在梯度减排(10%、30%、50%、70%和100%)比例下变化分别为0.01、0.04、0.09、0.15和0.45 μg·m⁻³,在7月分别为0.00、0.01、0.01、0.02和0.04 μg·m⁻³.通过对比梯度减排变化量的平均值可发现1月减排效果远优于7月,

邢台减排时1月京津冀地区PM_{2.5}变化量为7月的7.4倍.

这是由于京津冀长期处于富氨状态下^[36],在富氨状态下减排氨时,大气处于氨过量的状态,因此氨减排对二次组分转化的影响较小,而在贫氨状态下减排氨时,二次组分对氨减排的响应较为敏感,这时氨减排带来的溢出效益更为显著.同时冬季存在供暖等需求,导致SO₂、NO_x排放增加^[37],且冬季污染物扩散条件不佳,更易发生污染,污染时期的二次反应加剧,从而使得NH₃被消耗,大气中的NH₃含量降低,同时夏季的高温也会使得农业NH₃排放更易挥发,因此,夏季富氨情况高于冬季^[38].

由于NH₃处于过量水平, 而与NH₃反应的酸性气体(如SO₂和NO_x)含量相对较少, 导致即使在NH₃排放量有小幅降低的情况下, 大气仍能满足SO₂和NO_x的二次转化, 从而使得SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺受NH₃减排影响相对较小^[39], 即在夏季和冬季同时进行减排时, 7月减排影响相较于1月更小, 所引起的溢出效益也弱于1月.

2.2 各组分溢出效益

PM_{2.5}作为复合污染物, 其二次无机组分主要组成成分包含NH₄⁺、SO₄²⁻和NO₃⁻^[40], 因此, 进行NH₃减排时, 对NH₄⁺、SO₄²⁻和NO₃⁻造成的影响也存在不同规律^[41,42]. 本研究在2.1节已发现NH₃减排对PM_{2.5}的浓度贡献存在溢出效应, 如图5所示, 不同二次组分的溢出效益存在差异, 因此, 需进一步量化其溢

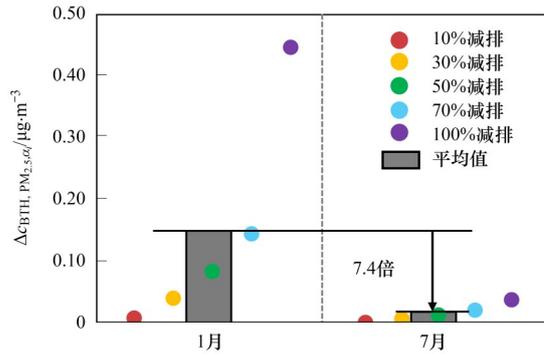


图4 邢台梯度减排下在1月和7月下对京津冀地区PM_{2.5}浓度贡献变化量

Fig. 4 Amount of change in contribution to PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei Region in January and July under gradient emission reduction in Xingtai area

出范围及浓度变化.

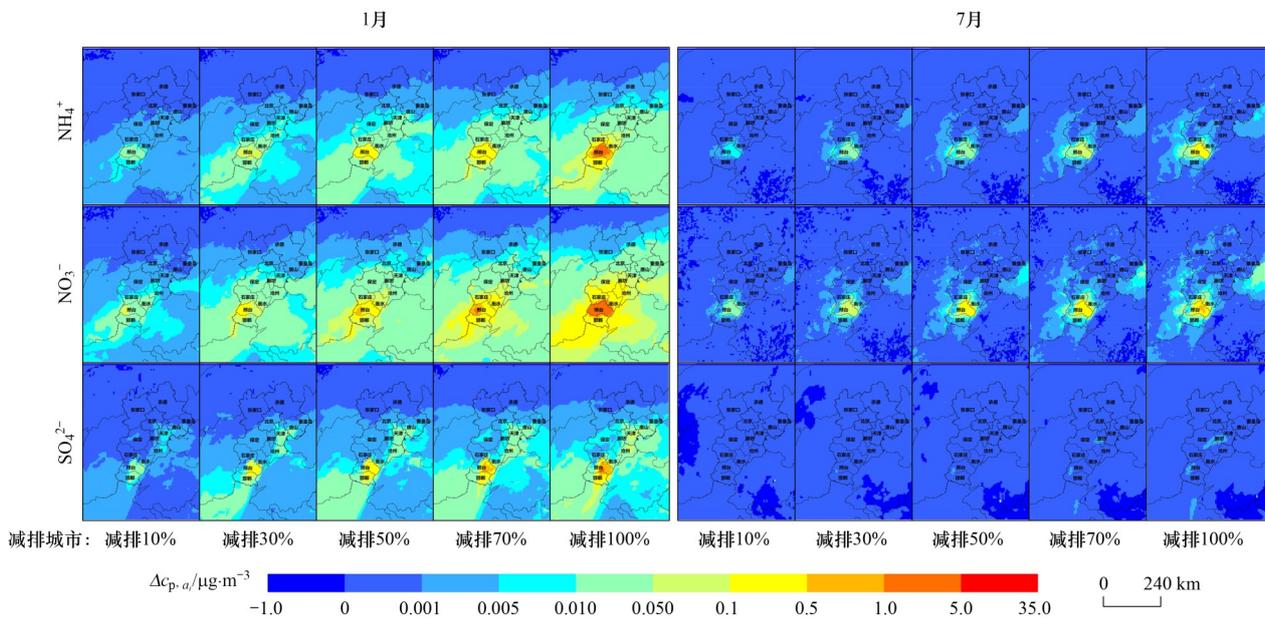


图5 邢台本地NH₃在不同减排比例下对NH₄⁺、NO₃⁻和SO₄²⁻浓度的溢出效益

Fig. 5 Spillover benefits of local NH₃ on NH₄⁺, NO₃⁻, and SO₄²⁻ concentrations in Xingtai at different reduction ratios

2.2.1 不同组分溢出范围分析

为量化各二次组分的溢出范围, 选取0.05 μg·m⁻³为溢出边界. 图6中以邢台为中心, 以不同减排比例下溢出最远距离为范围边界, 判别不同减排比例下各二次组分溢出范围. 整体来看, 邢台在不同减排情景下各二次组分均存在溢出效益, 且1月减排溢出效益大于7月, 并随着减排比例的增加, 在1月NH₄⁺和SO₄²⁻其溢出范围呈指数上升趋势, NO₃⁻呈线性上升趋势, 这可能是由于NH₃在随着减排比例的增加, 本应传输至周边城市的NH₃浓度大幅降低从而导致周边城市原本应生成的SO₄²⁻、NH₄⁺并未生成, 因而呈现指数上升的趋势, 而NO₃⁻作为更易发生区域传输的二次组分, 周边地区受邢台本地生成NO₃⁻的影响较为明显, 因而溢出范围呈现线

性上升趋势. 在7月各二次组分溢出范围变化趋势较为平缓. 在同一减排比例下, 各组分溢出范围呈如下规律: NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NH₄⁺, 其中NO₃⁻溢出范围最远可达NH₄⁺和SO₄²⁻的3.6倍和3.4倍.

对于NH₄⁺, 从1月来看随着减排比例的增加, NH₄⁺的溢出范围呈指数上升. 在10%减排情景时, 1月的影响范围仅局限于本地. 在30%减排情景时, 邢台的溢出范围已于150 km以外范围延伸. 在50%减排情景时, 其中, 由于NH₃在顺风下更易发生长距离传输而造成影响^[43], 邢台溢出范围向主导风向(西北及东南)的下方向延伸. 在70%和100%减排情景下, 减排城市溢出范围已可覆盖山东、山西、河南等地, 远超300 km, 这是由于大量减排NH₃情景下, 减排城市本地氨浓度发生较大变化, 减排城

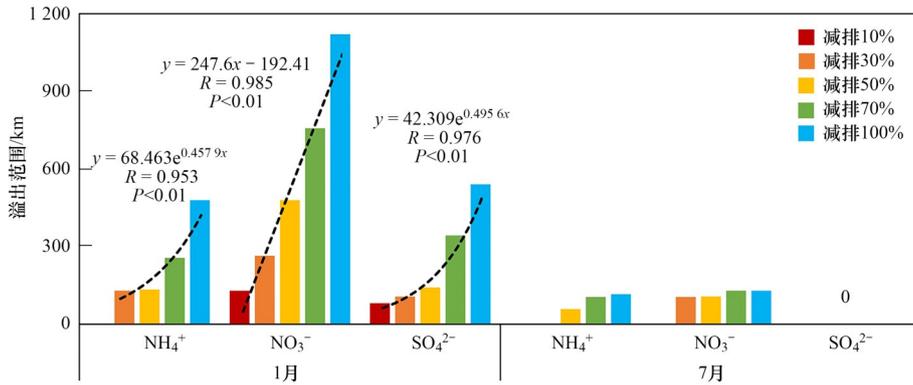


图6 邢台在不同减排比例下对各二次组分影响溢出的最远距离

Fig. 6 Longest spillover distance of Xingtai on each secondary component under different emission reduction ratios

市 NH₃ 排放对周边城市 PM_{2.5} 浓度的影响大幅降低。从7月来看，随着减排比例的增加，NH₄⁺ 的影响范围同步扩大，但由于7月浓度变化量较小，在不同减排比例下其溢出范围集中于本地 100 km 范围内。对于 NO₃⁻，1月随减排比例的增加，NO₃⁻ 溢出范围不断扩大的趋势更加明显，呈线性增加的趋势，在不同减排比例下其溢出范围均大于 NH₄⁺ 以及 SO₄²⁻，这归因于 NO₃⁻ 更易于发生远距离传输^[44]。在 10% 减排情景时，减排城市的溢出范围已开始向 150 km 以外延伸，其溢出范围与 1月 30% 减排情景下 NH₄⁺ 溢出范围相当。在 30% 减排情景下，其溢出范围开始大幅扩大，达到 300 km，溢出范围可覆盖山东、山西以及河南部分地区。在 100% 减排情景下，其溢出范围远超 600 km，完全覆盖山东、山西和河

南等地，这说明 NO₃⁻ 不仅更易于发生区域传输，其传输范围还更远于 NH₄⁺ 和 SO₄²⁻。从7月来看，随着减排比例的增加，NO₃⁻ 的影响范围逐步递增，其浓度变化量递减，在不同减排比例下其溢出范围仅在本地 100 ~ 200 km。对于 SO₄²⁻，其溢出范围略小于 NO₃⁻ 和 NH₄⁺，随减排情景呈指数上升趋势。从1月来看，在 10% 减排情景下，溢出范围仍在本地 100 km 以内。在 70% 减排情景下，溢出范围已超 300 km，可覆盖山东及山西、河南等部分地区，由于高山及秦岭的阻隔，导致其溢出范围呈截断状。在 100% 减排情景下，邢台溢出范围覆盖山西及河南大部分区域。在7月由于邢台减排对周边地区影响小于 0.05 μg·m⁻³，影响极小，可认为几乎不存在溢出效益。

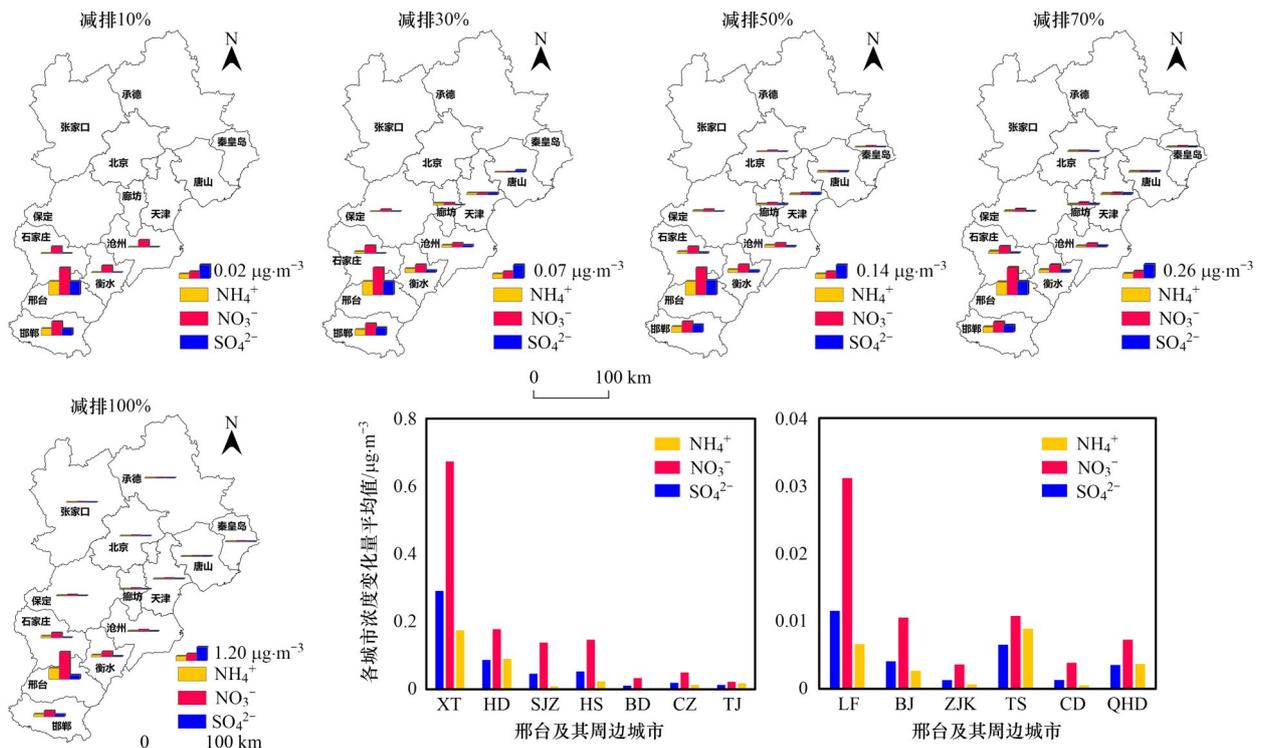


图7 不同减排比例下京津冀各城市 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 浓度变化量

Fig. 7 Variation in NH₄⁺, NO₃⁻, and SO₄²⁻ concentrations in Beijing, Tianjin, and Hebei cities under different reduction ratios

2.2.2 不同组分浓度变化差异分析

根据 2.2.1 节可知不同组分其溢出范围呈如下规律: $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-}$, 但在同一溢出范围下, 不同组分在不同减排比例呈现的浓度变化量存在极大差异. 由于 7 月溢出范围极小, 选用 1 月为研究时段, 依据其它城市距邢台的相对距离排序, 判别邢台梯度减排在相同距离下对各组分的浓度影响差异. 图 7 为邢台梯度减排下不同城市各二次组分的浓度变化量及梯度减排下各城市浓度变化量的平均值, 从中可知在同一城市, 邢台梯度减排时 NO_3^- 浓度变化量最大, 其中 NO_3^- 浓度变化最大可达 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的 2.6 倍和 7.3 倍.

对于 NH_4^+ 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} , 邢台减排引起的各二次组分浓度变化随城市间相对距离的增加逐步变小, 但其浓度变化随着减排比例的增加呈现不断增强的趋势. 各二次组分浓度变化整体呈如下规律: $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-}$, 随着减排比例的增加, 组分之间浓度变化差异不断扩大. 其中, 在 10%、30%、50%、70% 和 100% 减排比例下 NO_3^- 的浓度变化分别为 NH_4^+ 的 2.3、2.3、2.3、2.4 和 2.6 倍, 为 SO_4^{2-} 浓度变化的 3.3、3.5、3.8、4.2 和 7.3 倍. 这是由于 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 作为大气 PM_{2.5} 重要的二次无机水溶性离子, SO_4^{2-} 在大气中可通过气相、液相和非均相等各种途径生成^[45], NO_3^- 则主要由非均相反应生成, NH_4^+ 由 NH_3 直接反应生成, 二者受 NH_3 影响较大, 因此, 当 NH_3 减排时, SO_4^{2-} 的浓度变化量略小于 NO_3^- 和 NH_4^+ .

3 结论

(1) NH_3 减排在不同减排比例下对周边城市的 PM_{2.5} 及其二次组分均存在溢出效益, 其溢出效益随周边城市与减排城市相对距离的增加呈显著的指数下降的趋势, 当相对距离超过 200 km 时, 不同减排比例带来的浓度变化大大降低.

(2) 1 月的溢出效益远高于 7 月, 1 月邢台在不同减排比例下京津冀 PM_{2.5} 浓度下降平均值可达 $0.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 约为 7 月的 7.4 倍.

(3) PM_{2.5} 各二次组分溢出范围随着减排比例的增加呈现季节性差异, 1 月 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 其溢出范围呈指数上升趋势, 而 NO_3^- 呈线性上升趋势, 7 月各二次组分溢出范围变化趋势较为平缓.

(4) PM_{2.5} 不同组分溢出效益存在显著差异. 在各二次组分浓度变化量高于 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 各组分溢出范围呈如下规律: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+$, 其中, NO_3^- 溢出范围最大可达 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的 3.6 倍和 3.4 倍; 在同一溢出范围下, 各组分浓度变化呈: $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ >$

SO_4^{2-} 的规律, 其中, NO_3^- 浓度变化最大可达 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的 2.6 倍和 7.3 倍.

参考文献:

- [1] Warner J X, Wei Z G, Strow L L, *et al.* The global tropospheric ammonia distribution as seen in the 13-year AIRS measurement record [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16** (8): 5467-5479.
- [2] Zhan X Y, Adalibieke W, Cui X Q, *et al.* Improved estimates of ammonia emissions from global croplands [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(2): 1329-1338.
- [3] 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.
- [4] Wang L T, Wei Z, Wei W, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in top polluted cities in Hebei, China using the CMAQ model [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 723-736.
- [5] Meng Z Y, Xu X B, Lin W L, *et al.* Role of ambient ammonia in particulate ammonium formation at a rural site in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18** (1): 167-184.
- [6] Xu W, Zhao Y H, Wen Z, *et al.* Increasing importance of ammonia abatement in PM_{2.5} pollution control [J]. *Science Bulletin*, 2022, **67** (17): 1745-1749.
- [7] 刘伯顺, 黄立华, 黄金鑫, 等. 我国农田氨挥发研究进展与减排对策[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, **30** (6): 875-888.
Liu B S, Huang L H, Huang J X, *et al.* Research progress toward and emission reduction measures of ammonia volatilization from farmlands in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30** (6): 875-888.
- [8] Wu C, Lv S J, Wang F L, *et al.* Ammonia in urban atmosphere can be substantially reduced by vehicle emission control: A case study in Shanghai, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, **126**: 754-760.
- [9] Zhang L, Chen Y F, Zhao Y H, *et al.* Agricultural ammonia emissions in China: reconciling bottom-up and top-down estimates [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(1): 339-355.
- [10] 杨显玉, 吕雅琼, 邵平, 等. 四川盆地大气氨与氮氧化物排放对细颗粒物污染的影响及减排潜力[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(8): 3502-3511.
Yang X Y, Lv Y Q, Shao P, *et al.* Impacts of ammonia and nitrogen oxides emissions on fine particle matter pollution and mitigation potential over the Sichuan Basin [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(8): 3502-3511.
- [11] 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 等. 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 1108-1128.
Xu C, Miao W L, Ni Y Z, *et al.* Emission characteristics, transformation Mechanism, and reduction potential of ammonia emissions from a crop rotation system in Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 1108-1128.
- [12] 邓明君, 罗文兵. 中国农业氨排放的时空演变趋势与减排潜力分析[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(9): 1257-1268.
Deng M J, Luo W B. Space-time evolution of China's agricultural ammonia emission and emission reduction potential [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(9): 1257-1268.
- [13] 许艳玲, 薛文博, 雷宇, 等. 中国氨减排对控制 PM_{2.5} 污染的敏感性研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(7): 2482-2491.
Xu Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Sensitivity analysis of PM_{2.5} pollution to ammonia emission control in China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2482-2491.
- [14] Ti C, Han X, Chang S X, *et al.* Mitigation of agricultural NH₃ emissions reduces PM_{2.5} pollution in China: A finer scale analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **350**, doi: 10.1016/j.

- jclepro.2022.131507.
- [15] Liu M X, Shang F, Lu X J, *et al.* Unexpected response of nitrogen deposition to nitrogen oxide controls and implications for land carbon sink[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1), doi: 10.1038/s41467-022-30854-y.
- [16] Zheng M M, Wang Y H, Bao J G, *et al.* Initial cost barrier of ammonia control in central China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(23): 14175-14184.
- [17] Yan Y L, Duan X L, Xie K, *et al.* Effectiveness of synergistic abatement for emissions of NO_x and NH₃ to mitigate nitrate-dominated aerosols in a typical city, northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2022, **289**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119325.
- [18] Meng F L, Zhang Y B, Kang J H, *et al.* Trends in secondary inorganic aerosol pollution in China and its responses to emission controls of precursors in wintertime[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(9): 6291-6308.
- [19] Ye Z L, Li J, Pan Y P, *et al.* Synergistic effect of reductions in multiple gaseous precursors on secondary inorganic aerosols in winter under a meteorology-based redistributed daily NH₃ emission inventory within the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **821**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153383.
- [20] Fu X, Wang S X, Xing J, *et al.* Increasing ammonia concentrations reduce the effectiveness of particle pollution control achieved via SO₂ and NO_x emissions reduction in East China[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2017, **4**(6): 221-227.
- [21] Hacker J M, Chen D L, Bai M, *et al.* Using airborne technology to quantify and apportion emissions of CH₄ and NH₃ from feedlots[J]. *Animal Production Science*, 2016, **56**(3): 190-203.
- [22] Gu M N, Pan Y P, Sun Q, *et al.* Is fertilization the dominant source of ammonia in the urban atmosphere? [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, **838**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155890.
- [23] Ge Y, Vieno M, Stevenson D S, *et al.* Global sensitivities of reactive N and S gas and particle concentrations and deposition to precursor emissions reductions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, **23**(11): 6083-6112.
- [24] Wang R N, Bei N F, Pan Y P, *et al.* Urgency of controlling agricultural nitrogen sources to alleviate summertime air pollution in the North China Plain [J]. *Chemosphere*, 2023, **311**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.137124.
- [25] 张晗宇, 程水源, 姚森, 等. 2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 1999-2009.
- Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, *et al.* Pollution characteristics and regional transport of atmospheric particulate matter in Beijing from October to November, 2016[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 1999-2009.
- [26] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [27] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [28] 郎建奎, 范晓茜, 李昂, 等. 京津冀农业与机动车氨排放及对大气PM_{2.5}的差异化影响[J]. *北京工业大学学报*, 2023, **49**(11): 1213-1222.
- Lang J L, Fan X H, Li A, *et al.* Differential impact of agricultural and vehicular ammonia emissions on atmospheric PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2023, **49**(11): 1213-1222.
- [29] 邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 等. 京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM_{2.5}污染影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4095-4103.
- Shao X Y, Wang X Q, Zhong Y S, *et al.* Impacts of anthropogenic emission reduction and meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in typical cities of Beijing-Tianjin-Hebei in winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4095-4103.
- [30] Griffith S M, Huang X H H, Louie P K K, *et al.* Characterizing the thermodynamic and chemical composition factors controlling PM_{2.5} nitrate: Insights gained from two years of online measurements in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 864-875.
- [31] 薛文博, 许艳玲, 唐晓龙, 等. 中国氨排放对PM_{2.5}污染的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(12): 3531-3539.
- Xue W B, Xu Y L, Tang X L, *et al.* Impacts of ammonia emission on PM_{2.5} pollution in China [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(12): 3531-3539.
- [32] Xing J, Ding D, Wang S X, *et al.* Development and application of observable response indicators for design of an effective ozone and fine-particle pollution control strategy in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(21): 13627-13646.
- [33] Möller D, Schiefederdecker H. A relationship between agricultural NH₃ emissions and the atmospheric SO₂ content over industrial areas [J]. *Atmospheric Environment*, 1985, **19**(5): 695-700.
- [34] Skinner R, Ineson P, Hicks W K, *et al.* Correlating the spatial distribution of atmospheric ammonia with δ¹⁵N values at an ammonia release site [J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2004, **4**(6): 219-228.
- [35] Liu Z H, Zhou M, Chen Y F, *et al.* The nonlinear response of fine particulate matter pollution to ammonia emission reductions in North China [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, **16**(3), doi: 10.1088/1748-9326/abd86.
- [36] Zhao M J, Wang S X, Tan J H, *et al.* Variation of urban atmospheric ammonia pollution and its relation with PM_{2.5} chemical property in winter of Beijing, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(6): 1378-1389.
- [37] Liu P F, Chen H, Song Y F, *et al.* Atmospheric ammonia in the rural North China Plain during wintertime: Variations, sources, and implications for HONO heterogeneous formation [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **861**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160768.
- [38] Li Q K, Yang Z, Li X D, *et al.* Seasonal characteristics of sulfate and nitrate in size-segregated particles in ammonia-poor and -rich atmospheres in Chengdu, southwest China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, **19**(12): 2697-2706.
- [39] Han X, Zhu L Y, Liu M X, *et al.* Numerical analysis of agricultural emissions impacts on PM_{2.5} in China using a high-resolution ammonia emission inventory [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(16): 9979-9996.
- [40] 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 等. 2016—2020年邯郸市冬季PM_{2.5}污染特征与来源解析 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(12): 6463-6473.
- Niu H Y, Gao N N, Bao X L, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5} pollution in winter of Handan city from 2016 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(12): 6463-6473.
- [41] Derwent R, Witham C, Redington A, *et al.* Particulate matter at a rural location in southern England during 2006: Model sensitivities to precursor emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(3): 689-696.
- [42] Tsimpidi A P, Karydis V A, Pandis S N. Response of inorganic fine particulate matter to emission changes of sulfur dioxide and ammonia: the eastern United States as a case study [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(12): 1489-1498.
- [43] Makar P A, Moran M D, Zheng Q, *et al.* Modelling the impacts of ammonia emissions reductions on North American air quality [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(18): 7183-7212.
- [44] Lang J L, Liang X Y, Li S Y, *et al.* Understanding the impact of vehicular emissions on air pollution from the perspective of regional transport: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **785**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147304.
- [45] Chen T Z, Chu B W, Ge Y L, *et al.* Enhancement of aqueous sulfate formation by the coexistence of NO₂/NH₃ under high ionic strengths in aerosol water [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 236-244.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)