重点煤电基地大气污染物扩散对京津冀的影响

伯 鑫[1,2],田 飞[3],唐 伟[4],李 洋[4],杜晓惠[4],雷勋杰[5],李时蓓[2],赵晓宏[2],孙洪涛[3],周北海[1*] (1.北京科技大学能源与环境工程学院,北京 100083；2.环境保护部环境工程评估中心,北京 100012；3.山东省环境保护科学研究设计院,山东 济南 250013；4.中国环境科学研究院,北京 100012；5.广西博环环境咨询服务有限公司,广西 南宁 530007)

摘要：基于排放源清单,采用空气质量模式 CAMx 模拟现状情景下,鄂尔多斯、宁东与锡林格勒排放污染物扩散对京津冀地区的影响.结合 3 地区已批复环境影响报告、规划环评与战略环评等污染物排放数据,估算未来情景下 3 地区能源基地污染物排放对京津冀的影响.结果表明:现状情景下,3 地区排放的 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对京津冀的贡献浓度范围分别为 0.079~1.134,0.012~0.633,0.008~0.852μg/m^3,冬季对京津冀地区的影响要高于夏季,对京津冀地区冬季的平均贡献浓度值为 0.710,0.339 与 0.413μg/m^3,影响较大的京津冀城市为衡水市、石家庄市、邢台市、邯郸市与保定市;未来情景下 3 地区能源基地排放的 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对京津冀城市浓度贡献范围分别为 0.049~0.773,0.003~0.176,0.008~0.731μg/m^3,冬季平均贡献浓度值为 0.475,0.096 与 0.357μg/m^3.

关键词：京津冀；鄂尔多斯\宁东\锡林郭勒；能源基地；CAMx；$PM_{2.5}$

中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2019)02-0514-09

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0062

Influence of air pollutants transport from key coal and electricity production bases on Beijing-Tianjin-Hebei region. BO Xin[1,2], TIAN Fei[3], TANG Wei[4], LI Yang[4], DU Xiao-hui[4], LEI Xun-jie[5], LI Shi-bei[2], ZHAO Xiao-hong[2], SUN Hong-tao[3], ZHOU Bei-Hai[1*] (1.School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China；2.The Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China；3.Shandong Academy of Enviromental Science, Jinan 250013, China；4.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China；5.Guangxi Bohuan Environmental Consulting Services Co., Ltd, Nanning 530007, China). *China Environmental Science*, 2019,39(2)：514~522

Abstract：The regional air quality model CAMx was used to simulate the source contributions from Erdos, Ningdong and Xilingol (ENX) to the Beijing-Tianjin-Hebei region (BTH). The air quality impacts on the BTH region were evaluated using projected future emission inventory with the emission data from the approved environmental impact assessment, air quality planning and strategic planning, and the current emission inventory in ENX as two different scenarios. The results showed that the modeled contributions of $PM_{2.5}$, SO_2 and NO_x from energy bases in ENX to BTH were in the ranges of 0.079~1.134μg/m^3, 0.012~0.633μg/m^3 and 0.008~0.852μg/m^3, respectively with current emissions. The impacts from ENX on BTH were higher in winter with the averaged values of 0.710, 0.339 and 0.413μg/m^3, respectively than that in summer. It has greater influence on air quality in Hengshui, Shijiazhuang, Xingtai, Handan and Baoding than the other cities in BTH. The modeled contributions of $PM_{2.5}$, SO_2 and NO_x from energy bases in ENX using future emissions to BTH were in the ranges of 0.049~0.773μg/m^3, 0.003~0.176μg/m^3 and 0.008~0.731μg/m^3, respectively, with the averaged values of 0.475,0.096, and 0.357μg/m^3 in winter.

Key words：Beijing-Tianjin-Hebei region；Erdos\Ningdong\Xilingol；energy base；CAMx；$PM_{2.5}$

随着我国东部经济的快速发展,区域能源需求量逐年增加,但近几年京津冀及周边地区大气环境质量的恶化,凸显出东部地区环境空气质量与能源需求之间的矛盾[1-2].为解决东部重点地区大气污染现状,国家确定了锡盟(锡林郭勒)、鄂尔多斯、宁东等 9 个以电力外送为主的千万千瓦级清洁高效大型煤电基地建设.其中,鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒借助煤炭资源与政策优势,发展成为我国重要能源基地.

针对鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒能源基地的建设,地方开展了战略规划环评、项目环评以及环境容量研究等,分析基地建成后当地环境质量的变化情况,提出了相对合理的发展规划[3-5].根据环保部评估中心数据平台对批复环境影响报告书的统计,近两年鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒批复了较多的能源及化工项目,超过周边同类煤电能源基地.由于京津冀

收稿日期：2018-07-06

基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0208101);国家自然科学基金资助项目(71673107);大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209-07、DQGG0304-07)

* 责任作者, 教授, zhoubeihai@sina.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地区政治地位的特殊性,近年来的雾霾天气受到各方关注,目前针对该区域的大气环境污染分析研究较多.研究发现京津冀本地污染是产生雾霾的主因,本地污染贡献率可达 56%~72%[6-7].已有部分学者采用 CMAQ 对京津冀本地源排放 $PM_{2.5}$ 进行了模拟,发现工业源贡献最大,其次是民用源与交通源,工业源贡献最大的为钢铁冶金行业[8-11],这与部分城市 $PM_{2.5}$ 等污染源解析研究的结果一致[12-15];通过统计、源解析与模型模拟等方法,研究发现民用源与交通源也是京津冀污染物的主要来源[16-21].除对本地污染源大气环境贡献研究以外,黄蕊珠等[22]通过 NAQPMS 模型进行污染源传输追踪,发现高空层 $PM_{2.5}$ 以山东、河南等地区外来源为主.周磊等[23]通过统计污染物监测数据,验证了 $PM_{2.5}$ 污染呈河南省(山东省)—河北省—北京市(天津市)的带状分布特征.王晓琦等[24]、王燕丽等[25]采用 WRF-CAMx 耦合模型得到京津冀区域 $PM_{2.5}$ 外来源年均贡献占 13.32%~45.02%.

上述研究主要是分析京津冀本地污染源对 $PM_{2.5}$ 贡献,以及周边省份污染源传输机理及占比研究,但均未分析内蒙古与宁夏等能源丰富省份的现状污染源,以及煤电基地确定后新建工业源对京津冀地区大气环境的影响.因此开展该地区污染排放对京津冀城市的大气贡献影响研究十分必要.

为了解决上述问题,本研究基于现有的鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒排放清单数据,利用 CAMx 模式定量评估现状情景下 3 地区排放 $PM_{2.5}$、SO_2、NO_x 对京津冀城市环境空气浓度贡献,详细说明 3 地区污染物扩散对京津冀城市的影响,并通过搜集 3 地区已批复的环境影响评价报告,估算未来情景下能源基地工业源排放污染物对京津冀城市环境空气浓度贡献,从而为下一步提出城市大气污染防治综合解决方案和区域协调发展提供科学技术支撑.

1　研究方法

1.1　源排放

本研究根据清华大学 2012 年全国污染源排放清单(MEIC2012)、各地环境统计数据与实际观测结果,更新生成鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒 2016 年的污染源排放清单,污染物排放情况见表 1.

为充分考虑未来情景下鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒能源基地的污染物排放,在考虑现有工业源的前提下,研究搜集了 3 地区内 2015 年 5 月~2018 年 5 月审批的能源及相关项目环境影响报告、内蒙古锡林郭勒盟煤电基地开发规划环境影响报告与鄂尔多斯市绿色转型发展战略环境评价技术报告.鄂尔多斯境内审批能源及相关项目环境影响报告约 90 本,宁东境内审批报告书 15 本,锡林郭勒审批报告 77 本,结合当地规划环评与战略环评,确定未来情景下 3 地区能源基地污染物排放情况,见表 1.

由表 1 可知,随着政策的推进,鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒污染物将主要来自能源基地工业源.在假定其他清单源排放不变的前提下,未来能源基地污染物排放至少占比 20%以上,尤其是锡林郭勒未来能源基地排放的 NO_x 与 $PM_{2.5}$,将大于现有整个区域清单源的污染物量,所以未来能源基地将成为区域环境影响的主要来源.

表 1　三地区现状污染排放清单量与未来能源基地污染物排放量

Table 1　Current and projected future air pollutant emissions in ENX

项目	SO_2(万 t/a)			NO_x(万 t/a)			$PM_{2.5}$(万 t/a)		
	现状清单量	未来能源基地	占比(%)	现状清单量	未来能源基地	占比(%)	现状清单量	未来能源基地	占比(%)
鄂尔多斯	76.48	20.53	26.84	35.64	24.13	67.70	16.62	7.46	44.89
宁东	9.47	2.21	23.34	3.35	2.20	65.67	1.74	0.46	26.44
锡林郭勒	11.13	3.27	29.38	5.50	6.63	120.55	2.92	3.36	115.07

1.2　模拟模型

本研究采用空气质量模型 CAMx 对锡林郭勒、鄂尔多斯和宁东的大气污染源进行模拟[26],并分析 3 个区域对京津冀地区大气污染物的贡献.CAMx 模拟的区域为 57~161°E,1~59°N,涵盖了全中国所有省份.模式模拟网格水平分辨率为 36km×36km,网格数为 200×160,垂直层次 20 层,模式顶高约为 15km.模拟中使用的气象参数是由中尺度气象模式 WRF 模

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

拟提供;气相化学机理选用 SAPRC99,气溶胶化学机理采用统计粗细粒子模型(表 2).化学机理中包含化学物种 114 个(76 个气态物种、22 个气溶胶物种、13 个基团),以及 217 个反应.模式中所使用的光解速率是通过 OMI 卫星观测的臭氧柱浓度资料,结合地面反照率变化范围和大气浑浊度的变化范围,由 TUV 模式计算得到.本研究利用 CAMx 模型嵌入的颗粒物来源示踪技术(PSAT)[27],追踪鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒能源基地的污染物排放对京津冀 13 个市 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献.本次模拟时段选定为 2016 年 1 月和 7 月,分别作为冬季和夏季的典型时段.

表 2 CAMx 模拟选项

Table 2 Schemes adopted in CAMx simulation

机理/方案	参数
气相化学机理	SPRAC99
液相化学机理	RADM-AQ
气溶胶模块	CF Scheme
气溶胶热力学平衡模式	ISORROPIA
干沉降参数化方案	WESELY89
水平平流方案	PPM
垂直扩散方案	标准 K 理论

本研究 CAMx 模拟系统已在东亚区域空气污染物长距离传输模拟[28-29],以及京津冀重污染成因分析[30]等多个研究中应用,其间进行了详细的模拟验证和效果评估,表明该系统能够较好地再现区域污染的状态特征.模式参数见表 2.

CAMx 模型自带的 PSAT 以示踪的方式获取有关颗粒物生成(或排放)和消耗的信息,并统计不同地区、不同种类的污染源排放以及初始条件和边界条件对颗粒物生成的贡献量.除能对一次颗粒物进行示踪外,PSAT 还可以通过追踪二次颗粒物的化学变化过程,对二次颗粒物进行源贡献分析.

2 结果与讨论

2.1 现状情景下 3 地区污染物扩散影响分析

表 3、图 1 为现状情景下鄂尔多斯排放主要污染物对各城市环境空气的浓度贡献情况,鄂尔多斯影响范围集中在鄂尔多斯本地、山西、陕西、宁夏和京津冀北部,影响较大的京津冀城市为石家庄、邢台市、邯郸市与保定市,主要影响区域为河北省的西南部.鄂尔多斯排放 $PM_{2.5}$ 的影响范围和对京津冀地区的贡献浓度均要大于 NO_x 和 SO_2,冬季对京津冀地区的影响要高于夏季.鄂尔多斯排放的 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对京津冀城市最大贡献浓度分别为 0.964,0.579 与 0.659μg/m^3,全部出现在冬季石家庄市.鄂尔多斯排放的 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对北京的影响位于京津冀城市的第 7 位,最大贡献浓度分别为 0.420,0.192 与 0.254μg/m^3,全部出现在冬季.

表 3 现状情景下鄂尔多斯排放大气污染物对京津冀各城市的浓度贡献(μg/m^3)

Table 3 Contributions from Erdos to the air pollutants concentrations of cities in the BTH region under current situation(μg/m^3)

城市	$PM_{2.5}$ 冬季平均贡献	$PM_{2.5}$ 夏季平均贡献	SO_2 冬季平均贡献	SO_2 夏季平均贡献	NO_x 冬季平均贡献	NO_x 夏季平均贡献
北京	0.420	0.340	0.192	0.065	0.254	0.013
天津	0.209	0.125	0.077	0.013	0.103	0.004
石家庄	0.964	0.359	0.579	0.065	0.659	0.026
唐山	0.107	0.092	0.035	0.010	0.041	0.002
秦皇岛	0.040	0.054	0.013	0.005	0.010	0.001
邯郸	0.781	0.236	0.376	0.036	0.390	0.017
邢台	0.799	0.269	0.428	0.042	0.443	0.018
保定	0.729	0.341	0.320	0.054	0.398	0.016
张家口	0.096	0.242	0.031	0.047	0.034	0.004
承德	0.315	0.147	0.103	0.013	0.118	0.005
沧州	0.304	0.217	0.127	0.029	0.162	0.007
廊坊	0.578	0.193	0.243	0.022	0.258	0.010
衡水	0.737	0.531	0.370	0.233	0.556	0.055

表 4、图 2 为现状情景下宁东排放主要污染物对各城市环境空气的浓度贡献情况,受排放强度、地理位置和气象条件的影响,宁东污染物排放的影响范围主要集中在宁东本地、陕西、甘肃、内蒙西部,而对京津冀的影响不显著.宁东排放 $PM_{2.5}$ 的影响范围和对京津冀地区的贡献浓度均要大于 SO_2 和 NO_x.宁东排放的 $PM_{2.5}$ 对京津冀地区夏季的影响高于冬季,对京津冀城市最大贡献浓度出现在夏季的石家庄市,为 0.078μg/m^3;宁东排放的 SO_2 和 NO_x 对京津冀地区冬季的影响高于夏季,对京津冀城市最大贡献浓度出现在冬季邯郸市,贡献浓度分别为 0.023 与 0.017μg/m^3.宁东对北京 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 最大贡献浓度分别为 0.044 与 0.004μg/m^3,出现在夏季,NO_x 最大贡献浓度为 0.001μg/m^3,出现在冬季.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

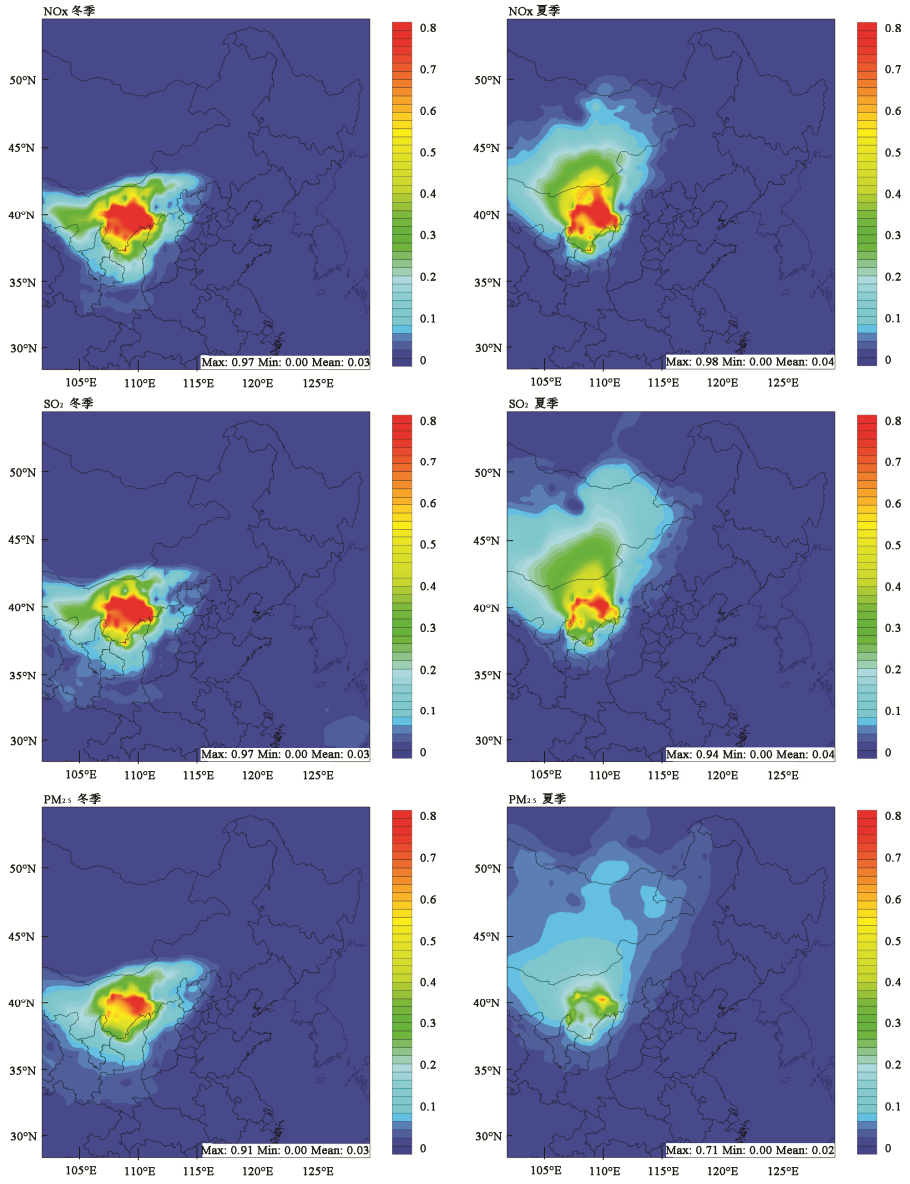


图 1　鄂尔多斯冬季和夏季 NO_x、SO_2、$PM_{2.5}$ 模拟贡献百分比分布

Fig.1　Simulated NO_x, SO_2, $PM_{2.5}$ contributions in Winter and Summer from Ordos

表 4　现状情景下宁东排放大气污染物对京津冀各城市的浓度贡献(μg/m^3)

Table 4　Contributions from Ningdong to the air pollutants concentrations of cities in the BTH region under current situation(μg/m^3)

城市	$PM_{2.5}$ 冬季平均贡献	$PM_{2.5}$ 夏季平均贡献	SO_2 冬季平均贡献	SO_2 夏季平均贡献	NO_x 冬季平均贡献	NO_x 夏季平均贡献
北京	0.007	0.044	0.002	0.004	0.001	0.000
天津	0.003	0.018	0.001	0.001	0.000	0.000
石家庄	0.032	0.078	0.015	0.009	0.011	0.001
唐山	0.002	0.011	0.001	0.001	0.000	0.000
秦皇岛	0.001	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
邯郸	0.052	0.058	0.023	0.005	0.017	0.001
邢台	0.046	0.064	0.022	0.006	0.015	0.001
保定	0.012	0.061	0.004	0.006	0.002	0.000

续表 4

城市	$PM_{2.5}$ 冬季平均贡献	$PM_{2.5}$ 夏季平均贡献	SO_2 冬季平均贡献	SO_2 夏季平均贡献	NO_x 冬季平均贡献	NO_x 夏季平均贡献
张家口	0.002	0.023	0.001	0.002	0.000	0.000
承德	0.006	0.026	0.001	0.002	0.001	0.000
沧州	0.004	0.033	0.001	0.003	0.000	0.000
廊坊	0.012	0.039	0.004	0.003	0.002	0.000
衡水	0.017	0.051	0.006	0.009	0.004	0.001

表 5、图 3 为现状情景下锡林郭勒排放主要污染物对各城市环境空气的浓度贡献情况,锡林郭勒影响范围集中在锡林郭勒本地、京津冀北部、辽宁西部和山东地区,影响较大的京津冀城市为张家口市、衡水市、北京市与唐山市,影响范围分布较为分

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

散.锡林郭勒排放 $PM_{2.5}$ 的影响范围和对京津冀地区的贡献浓度均要大于 NO_x 和 SO_2,冬季对京津冀地区的影响要高于夏季.锡林郭勒排放的 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对京津冀城市最大贡献浓度分别为 0.423,0.354 与 0.388μg/m^3,全部出现在冬季张家口市.锡林郭勒排放的 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对北京影响较显著,最大贡献浓度分别为 0.273,0.144 与 0.163μg/m^3,全部出现在冬季.

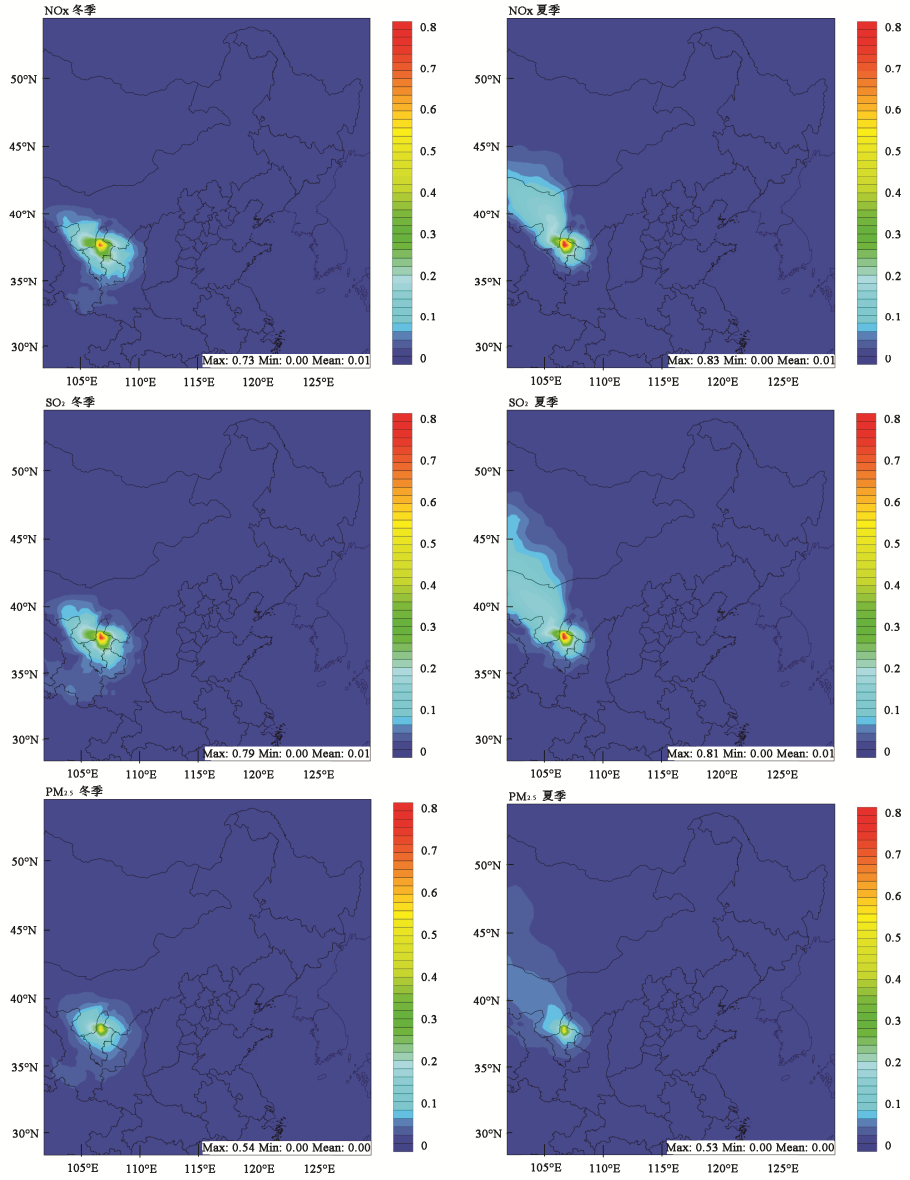


图 2 宁东冬季和夏季 NO_x、SO_2、$PM_{2.5}$ 模拟贡献百分比分布

Fig.2 Simulated NO_x, SO_2, $PM_{2.5}$ contributions in Winter and Summer from Ningdong

根据 3 地区污染物扩散范围分析,锡林郭勒域内污染源对京津冀城市有所影响,鄂尔多斯次之,宁东对京津冀的影响不显著,这跟 3 个地区与京津冀位置关系和气象条件密切相关;对比冬季与夏季 3 地区对京津冀的影响分析,冬季的 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 贡献浓度普遍高于夏季,这与北方冬季以西北风为主的气象条件有关.从对京津冀城市的贡献浓度分析,鄂尔多斯因污染物排放量较大,对京津冀城市的最大贡献浓度值高于锡林郭勒,其中贡献最大的石家庄市较张家口市冬季 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 分别高 0.541,0.225 与 0.271μg/m^3;对北京的浓度贡献值鄂尔多斯亦高于锡林格勒,冬季 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 分别高 0.146,0.047 与 0.091μg/m^3,所以现状情景下,鄂尔多斯污染物排放对京津冀城市的影响最大.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　现状情景下锡林郭勒排放大气污染物对京津冀各城市的浓度贡献(μg/m^3)

Table 5　Contributions from Xilingol to the air pollutants concentrations of cities in the BTH region under current situation(μg/m^3)

城市	$PM_{2.5}$冬季平均贡献	$PM_{2.5}$夏季平均贡献	SO_2冬季平均贡献	SO_2夏季平均贡献	NO_x冬季平均贡献	NO_x夏季平均贡献
北京	0.273	0.039	0.144	0.016	0.163	0.011
天津	0.226	0.021	0.106	0.006	0.145	0.006
石家庄	0.121	0.021	0.038	0.005	0.044	0.003
唐山	0.273	0.024	0.145	0.007	0.205	0.008
秦皇岛	0.237	0.020	0.127	0.006	0.211	0.008
邯郸	0.119	0.016	0.032	0.004	0.037	0.002
邢台	0.114	0.017	0.033	0.004	0.036	0.002
保定	0.197	0.027	0.071	0.008	0.083	0.005
张家口	0.423	0.045	0.354	0.024	0.388	0.018
承德	0.180	0.018	0.072	0.004	0.089	0.004
沧州	0.255	0.028	0.128	0.009	0.151	0.008
廊坊	0.155	0.018	0.051	0.004	0.055	0.003
衡水	0.380	0.069	0.257	0.046	0.292	0.028

表 6 为现状情景下 3 地区排放主要污染物对京津冀城市环境空气浓度贡献情况,$PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对京津冀的贡献浓度范围分别为 0.079~1.134,0.012~0.633,0.008~0.852μg/m^3,冬季对京津冀地区的平均贡献浓度为 0.710,0.349,0.413μg/m^3,影响较大的京津冀城市为衡水市、石家庄市、邢台市、邯郸市与保定市,与高愈霄等[31]和安树伟等[32]对 2013、2014 年出现重污染天气统计结果一致.3 地区冬季排放的 $PM_{2.5}$ 对衡水市与石家庄市浓度贡献都超过了 1μg/m^3,其中对衡水市的贡献影响最大,$PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 浓度贡献分别为 1.134,0.633,0.852μg/m^3,这与王燕丽等[25]研究的区外污染源贡献最大为衡水市的结果一致.3 地区冬季污染物排放对北京市的贡献浓度分别为 0.700,0.338 与 0.417μg/m^3.

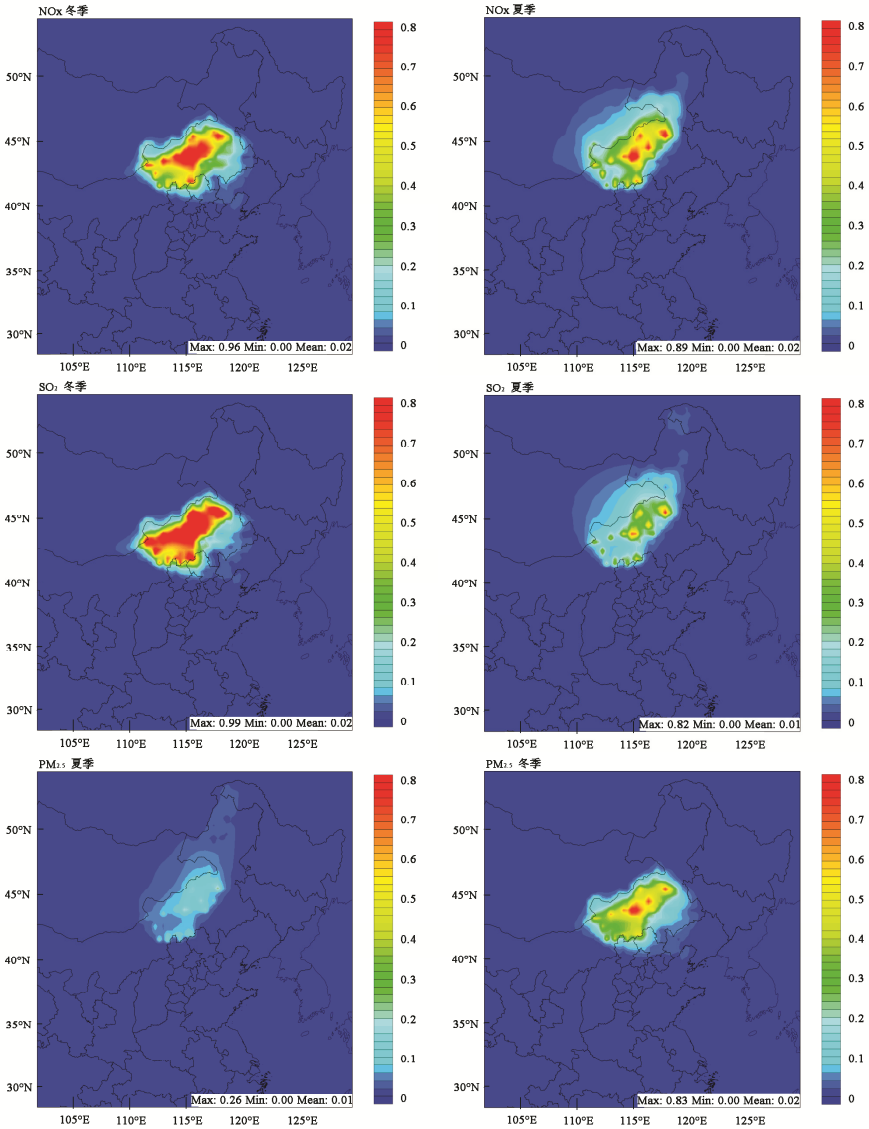


图 3　锡林郭勒冬季和夏季 NO_x、SO_2、$PM_{2.5}$ 模拟贡献百分比分布

Fig.3　Simulated NO_x, SO_2, $PM_{2.5}$ contributions in Winter and Summer from Xilingol

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 6 现状情景下 3 地区排放大气污染物对京津冀各城市的浓度贡献与占比

Table 6 Contributions from ENX to the air pollutants concentrations of cities in the BTH region under current

城市	浓度平均贡献值(μg/m³)						浓度贡献占比(%)					
	$PM_{2.5}$冬季	$PM_{2.5}$夏季	SO_2冬季	SO_2夏季	NO_x冬季	NO_x夏季	$PM_{2.5}$冬季	$PM_{2.5}$夏季	SO_2冬季	SO_2夏季	NO_x冬季	NO_x夏季
北京市	0.700	0.423	0.338	0.085	0.417	0.024	2.271	0.911	1.211	0.269	0.532	0.052
天津市	0.437	0.163	0.184	0.020	0.248	0.010	1.418	0.352	0.659	0.062	0.316	0.023
石家庄市	1.116	0.458	0.632	0.079	0.713	0.030	3.620	0.987	2.265	0.248	0.910	0.067
唐山市	0.382	0.128	0.181	0.017	0.246	0.010	1.239	0.275	0.647	0.055	0.314	0.022
秦皇岛市	0.277	0.079	0.140	0.012	0.221	0.008	0.899	0.000	0.502	0.037	0.282	0.019
邯郸市	0.952	0.310	0.431	0.045	0.443	0.020	3.086	0.668	1.544	0.141	0.565	0.044
邢台市	0.960	0.350	0.482	0.052	0.494	0.021	3.113	0.755	1.729	0.165	0.631	0.046
保定市	0.938	0.429	0.395	0.068	0.482	0.022	3.043	0.923	1.414	0.213	0.615	0.049
张家口市	0.520	0.310	0.386	0.073	0.422	0.022	1.687	0.668	1.384	0.230	0.538	0.050
承德市	0.501	0.192	0.176	0.019	0.207	0.008	1.624	0.413	0.632	0.058	0.264	0.019
沧州市	0.563	0.279	0.257	0.041	0.314	0.015	1.825	0.600	0.920	0.127	0.401	0.033
廊坊市	0.744	0.250	0.297	0.028	0.315	0.013	2.414	0.538	1.064	0.090	0.402	0.028
衡水市	1.134	0.651	0.633	0.288	0.852	0.084	3.677	1.401	2.269	0.906	1.087	0.186

从浓度贡献占比分析,3 地区排放 $PM_{2.5}$ 对京津冀的贡献占比大于 SO_2 与 NO_x,最大浓度贡献占比都出现在冬季的衡水市,分别为 3.677%、2.269%与 1.087%,这与已有研究的硫酸盐、硝酸盐等二次组分多富集在较小粒径颗粒物中,有利于远距离的传输,且一次排放出的气态前体物 SO_2、NO_x 也会在传输过程中发生二次转化反应,加大远距离传输的贡献结果一致[24,33].除此之外,3 地区排放大气污染物对石家庄、保定市、邢台市与邯郸市的影响较显著,这与浓度贡献值的结果较一致.3 地区冬季污染物排放对北京市的浓度贡献占比分别为 2.271%、1.211%与 0.532%.京津冀地区是我国大气污染防治的主战场,1μg/m³ 的贡献变化可能影响京津冀一个城市的考核结果,所以鄂尔多斯、宁东、锡林郭勒地区污染物扩散对京津冀城市的大气环境的贡献影响不能忽视.

2.2 未来情景下 3 地区能源基地工业污染物扩散对京津冀城市影响

研究通过搜集批复的环境影响报告获得能源基地污染物排放数据,对未来地区工业源排污情况描述较准确.表 7 为未来情景下 3 地区能源基地排放主要污染物对京津冀城市的影响,其中冬季的影响要大于夏季,$PM_{2.5}$ 对京津冀城市贡献浓度均大于 NO_x 和 SO_2. 3 地区能源基地排放的 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对京津冀城市浓度贡献范围分别为 0.049~0.773,0.003~0.176,0.008~0.731μg/m³,冬季平均贡献浓度值为 0.475,0.096,0.357μg/m³.能源基地工业污染物排放影响较大的京津冀城市为衡水市、石家庄市,$PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 冬季平均贡献浓度值分别为 0.773,0.176,0.731 和 0.580,0.170,0.506μg/m³,对北京的贡献浓度为 0.505,0.094,0.368μg/m³.

表 7 未来情景下 3 地区排放大气污染物对京津冀各城市的浓度贡献(μg/m³)

Table 7 Contributions from ENX to the air pollutants concentrations of cities in the BTH region under future scenario

城市	$PM_{2.5}$冬季平均贡献	$PM_{2.5}$夏季平均贡献	SO_2冬季平均贡献	SO_2夏季平均贡献	NO_x冬季平均贡献	NO_x夏季平均贡献
北京	0.505	0.209	0.094	0.025	0.368	0.022
天津	0.354	0.084	0.052	0.006	0.244	0.010
石家庄	0.580	0.205	0.170	0.025	0.506	0.022
唐山	0.364	0.072	0.052	0.005	0.275	0.011
秦皇岛	0.291	0.049	0.041	0.003	0.261	0.010
邯郸	0.501	0.139	0.116	0.014	0.319	0.015
邢台	0.502	0.157	0.130	0.017	0.354	0.015
保定	0.557	0.199	0.108	0.021	0.370	0.018
张家口	0.530	0.167	0.113	0.021	0.490	0.025
承德	0.350	0.094	0.049	0.006	0.187	0.008
沧州	0.431	0.139	0.072	0.012	0.293	0.014
廊坊	0.441	0.118	0.081	0.009	0.242	0.010
衡水	0.773	0.330	0.176	0.082	0.731	0.071

对比现状情景下浓度贡献值可知,未来能源基地的污染物排放将成为鄂尔多斯、宁东与锡林郭勒影响京津冀城市大气质量的主要来源.以北京为例,在假定现有情景其他排放源不变的前提下,能源基地排放的 $PM_{2.5}$ 与 NO_x 占 3 地区排放对北京地区影响的 50%以上,这与能源基地重点发

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

展能源化工与煤电行业,多以高架点源排放以及燃煤行业污染物排放特点有关.从数值上看,未来情景下 3 个地区能源基地排放的 $PM_{2.5}$ 对京津冀城市影响有限,但在京津冀城市大气污染治理迈向精细化的进程中,在严格落实当地环保措施的前提下,需充分考虑污染源跨区域对本地环境的贡献影响,推出区域大气污染联防联控制度,保证打赢“蓝天保卫战”.

2.3　不确定性分析

研究引用的未来能源基地污染物排放资料为 3 地区环境影响报告、规划环评与战略环评中数据,这与地区未来的实际发展存在一定的不确定性.

未来情景下 3 地区能源基地对京津冀城市大气环境影响,是基于 2016 年冬夏两季气象条件进行估算,由于模拟使用气象条件存在不确定性,会对模拟结果产生一定误差.

3　结论

3.1　根据现状情景下 3 地区污染物扩散范围,锡林郭勒域内大气污染源对京津冀城市影响最为显著,鄂尔多斯次之,宁东对京津冀的影响不显著.锡林郭勒与鄂尔多斯污染物扩散主要影响城市分别为张家口市与石家庄市,3 地区污染物贡献叠加主要影响城市为衡水市.

3.2　现状情景 3 地区排放 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对京津冀贡献浓度范围分别为 0.079~1.134,0.012~0.633 与 0.008~0.852μg/m^3,影响较大的京津冀城市为衡水市、石家庄市、邢台市、邯郸市与保定市.

3.3　未来情景下能源基地排放 $PM_{2.5}$、SO_2 与 NO_x 对京津冀冬季平均贡献浓度值分别为 0.475,0.096 与 0.357μg/m^3.从数值上看,3 地区能源基地对京津冀城市影响有限,但京津冀各城市已对环境空气质量展开微克争夺战,所以跨区域污染源对京津冀城市的大气环境影响不能忽视.

参考文献：

[1] 梁增强,马民涛,杜改芳.京津冀地区区域环境污染研究进展 [J]. 四川环境, 2013,32(4):126-130.
Liang Z Q, Ma M T, Du G F. Research progress of regional environmental pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Sichuan Environment, 2013,32(4):126-130.

[2] 李　磊,张贵祥.京津冀都市圈经济增长与生态环境关系研究 [J]. 生态经济, 2014,30(9):167-171.
Li L, Zhang G X. Research on the relationship between economic growth and ecological environment of Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan [J]. Ecological Economy, 2014,30(9):167-171.

[3] 马一丁,付　晓,吴　钢.锡林郭勒盟煤电基地大气环境容量分析及预测 [J]. 生态学报, 2017,37(15):5221-5227.
Ma Y D, Fu X, Wu G. Analysis and prediction of the atmospheric environmental capacity of the Xilinguole League's coal-based electricity region [J]. Ecologica Sinica, 2017,37(15):5221-5227.

[4] 李　巍,侯锦湘,刘　雯.资源型城市工业规划的环境基线空间评价方法—以鄂尔多斯市主导产业发展规划环评为例 [J]. 环境科学与技术, 2010,33(6):384-389.
Li W, Hou J X. Liu W. Environmental baseline space assessment method for industrial planning of the resource based cities with an example of environmental impact assessment of the pillar industry planning of Ordos in China [J]. Environmental Science & Technology, 2010,33(6):384-389.

[5] 李喜仓,百美兰,马玉峰,等.鄂尔多斯市城区发展对局地大气环境影响的数值模拟 [J]. 气象与环境学报, 2011,27(3):61-66.
Li X C, Bai M L, Ma Y F, et al. Numerical simulation on the influence of urban development on the local atmospheric environment in Dong sheng district of Erdos Inner Mongolia autonomous region [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011,27(3):61-66.

[6] 张书海.考虑城际传输的区域空气污染联动治理研究 [D]. 上海:上海大学, 2017.
Zhang S H. Joint governance of regional air pollution considering pollution intercity transportation [D]. Shanghai: Shanghai University, 2017.

[7] 伯　鑫,王　刚,温　柔,等.京津冀地区火电企业的大气污染影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):364-373.
Bo X, Wang G, Wen R, et al. The impact of thermal power enterprises on the air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Chinese Environmental Science, 2015,35(2):364-373.

[8] Yu L D, Wang G F, Zhang R J, et al. Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in an urban environment in Beijing [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013,13(2):574-583.

[9] 吴文景,常　兴,邢　佳,等.京津冀地区主要排放源减排对 $PM_{2.5}$ 污染改善贡献评估 [J]. 环境科学, 2017,38(3):867-874.
Wu W J, Chang X, Xing J, et al. Assessment of $PM_{2.5}$ pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science, 2017, 38(3):867-874.

[10] Tian Y Z, Chen G, Wang H T, et al. Source regional contributions to $PM_{2.5}$ in a megacity in China using an advanced source regional apportionment method [J]. Chemosphere, 2016,147:256-263.

[11] Wang G, Cheng S Y, Li J B, et al. Source apportionment and seasonal variation of $PM_{2.5}$ carbonaceous aerosol in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(3):143.

[12] 北京市环境保护局.北京市正式发布 $PM_{2.5}$ 来源解析研究成果 [EB/OL]. http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/323265/340674/396253/index.html, 2014-04-16.

[13] 天津市环境保护局.天津发布颗粒物源解析结果 [EB/OL]. http://www.tjhb.gov.cn/root16/mechanism_1006/environmental_protection_

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

propaganda_and_education_center/201411/t20141112_6464.html. 2014-08-25.

[14] 石家庄市环境保护局.河北 11 市完成 $PM_{2.5}$ 源解析 [EB/OL]. http://www.sjzhb.gov.cn/cyportal2.3/template/site00_article@sjzhbj.jsp?article_id=8afaa1614cd9a176014d553231f26b33&parent_id=8afaa161427963860142 79efe11b0937&parentType=0&siteID=site00&f_channel_id=null&a1b2dd=7xaac. 2015-05-15.

[15] 伯 鑫,徐 峻,杜晓惠,等.京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估 [J]. 中国环境科学, 2017,37(5):1684-1692.
Bo X, Xu J, Du X H, et al. Impacts assessment of steel plants on air quality over Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Chinese Environmental Science, 2017,37(5):1684-1692.

[16] Liu J, Mauzerall D L, Chen Q, et al. Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2016,113:7756-7761.

[17] Chen Y, Tian C, Feng Y, et al. Measurements of emission factors of $PM_{2.5}$, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China [J]. Atmospheric Environment, 2015,109:190-196.

[18] Li Q, Jiang J K, Zhang Q, et al. Influences of coal size, volatile matter content, and additive on primary particulate matter emissions from household stove combustion a [J]. Fuel, 2016,182:780-787.

[19] Zavala M, Barrera H, Morante J, et al. Analysis of model-based $PM_{2.5}$ emission factors for on-road mobile sources in Mexico [J]. Atmósfera, 2013,26(1):109-124.

[20] 李云燕,殷晨曦.京津冀地区 $PM_{2.5}$ 减排实效与影响因素的门限效应 [J]. 中国环境科学, 2017,37(4):1223-1230.
Li Y Y, Yin C X. Threshold effect of socio-economic factors influencing $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. Chinese Environmental Science, 2017,37(4):1223-1230.

[21] 李海萍,赵 颖,傅毅明.京津冀国家干线公路污染空间特征分析 [J]. 环境科学学报, 2016,36(10):3515-3526.
Li H P, Zhao Y, Fu Y M. Spatial distribution of air pollutant emissions from national trunk highway in Beijing-Tianjin-Hebei(BTH) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,36(10):3515-3526.

[22] 黄蕊珠,陈焕盛,葛宝珠,等.京津冀重霾期间 $PM_{2.5}$ 来源数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2015,35(9):2671-2680.
Huang R Z, Chen H S, Ge B Z, et al. 2015. Numerical study on source contributions to $PM_{2.5}$ over Beijing-Tianjin-Hebei area during a severe haze event [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(9):2670-2680.

[23] 周 磊,武建军,贾瑞静,等.京津冀 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其污染风险因素 [J]. 环境科学研究, 2016,29(4):483-493.
Zhou L, Wu J J, Jia R J, et al. Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. Research of Environmental Sciences, 2016,29(4):483-493.

[24] 王晓琦,郎建垒,程水源,等.京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 传输规律研究 [J]. 中国环境科学, 2016,36(11):3211-3217.
Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, et al. Study on transportation of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area [J]. Chinese Environmental Science, 2016,36(11):3211-3217.

[25] 王燕丽,薛文博,雷 宇,等.京津冀区域 $PM_{2.5}$ 污染相互输送特征 [J]. 环境科学, 2017,38(12):4897-4904.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, et al. Regional transport matrix study of $PM_{2.5}$ in Jingjinji region [J]. Environmental Science, 2017,38(12):4897-4904.

[26] ENVIRON: CAMx Users' Guide, version 6.40 [M]. ENVIRON International Corporation, Novato, CA, 2014.

[27] Yarwood G, Wilson G, Morris R. Development of the CAMx Particulate source apportionment technology (PSAT) [R]. Prepared for the Lake Michigan Air Directors Consortium, by Environ International Corporation, Novato, CA, 2005.

[28] 王继康.东亚地区典型大气污染物源—受体关系的数值模拟研究 [D]. 北京:中国环境科学研究院, 2014.
Wang J K. Numerical simulation and source-receptor relationships of typical air pollutants over East Asia [D]. Beijing:Chinese Research Academy of Environmental Science, 2014.

[29] 程念亮.东亚春季典型天气过程空气污染输送特征的数值模拟研究 [D]. 北京:中国环境科学研究院, 2013.
Cheng N L .Simulation study on the air pollution transport characteristics of typical weather in East Asia in Spring [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Science, 2013.

[30] 杜晓惠,徐 峻,刘厚凤,等.重污染天气下电力行业排放对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 的贡献 [J]. 环境科学研究, 2016,29(4):475-482.
Du X H, Xu J, Liu H F, et al. Contribution of power plant emissions to $PM_{2.5}$ over Beijing-Tianjin-Hebei area during heavy pollution periods [J]. Research of Environmental Sciences, 2016,29(4):475-482.

[31] 高愈霄,霍晓芹,闫 慧,等.京津冀区域大气重污染过程特征初步分析 [J]. 中国环境监测, 2016,32(6):26-35.
Gao Y X, Huo X Q, Yan H, et al. Preliminary analysis on the characteristics of heavy air pollution events in Beijing-Tianjin- Hebei region [J]. Environmental Monitoring in China, 2016,32(6):26-35.

[32] 安树伟,郁 鹏,母爱英.基于污染物排放的京津冀大气污染治理研究 [J]. 城市与环境研究, 2016,02(17):17-29.
An S W, Yu P, Mu A Y. Study on air pollution control of Beijing-Tianjin-Hebei based on pollutant emission [J]. Urban and Environmental Studies, 2016,02(17):17-29.

[33] 郎建垒.基于大气污染物总量控制的区域污染源分级与优化减排技术研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2013.
Lang J L. Research on regional pollution source classification and emission reduction optimization technology based on total air pollutant control [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.

作者简介：伯 鑫(1983-),男,山东烟台人,高级工程师,北京科技大学博士研究生,主要研究方向为排放清单以及大气污染模拟.发表论文 50 余篇.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net