氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

秦皇岛2019年冬季重污染过程PM2.5来源数值模拟

王天正 张美根 韩霄

Source Apportionment of PM2.5 during a Heavy Pollution Episode in Qinhuangdao in Winter 2019 Using a Chemical Transport Model

WANG Tianzheng ZHANG Meigen HAN Xiao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19156

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

曹妃甸工业区空气污染来源及其对周边地区污染贡献的数值模拟研究

Modeling Study of PM2.5 Source Apportionment over the Caofeidian Industrial Zone and Surrounding Areas

气候与环境研究. 2019, 24(4): 469 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18022

气象预报模式参数化方案对重污染过程PM2.5浓度预报效果的影响

Inflence of Meteorological Forecast Model Parameterization Schemes on PM2.5 Concentration Forecast Effect in Heavy Pollution Process

气候与环境研究. 2021, 26(3): 312 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20073

北京地区一次PM2.5重污染过程的边界层特征分析

Boundary Layer Characteristics during a Heavy PM2.5 Pollution Process in Beijing

气候与环境研究. 2019, 24(1): 61 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18057

秸秆燃烧排放对北京及其周边地区PM2.5浓度影响的数值模拟

Modeling the Impact of Emissions from Crop Residue Burning on PM2.5 Concentration in Beijing and Its Surrounding Areas

气候与环境研究. 2018, 23(5): 587 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17171

基于无人机垂直观测的南京PM2.5污染个例研究

A Case Study of PM2.5 Pollution in Nanjing Based on Unmanned Aerial Vehicle Vertical Observations

气候与环境研究. 2020, 25(3): 292 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19014

基于能见度及AOD数据的北京市PM2.5浓度的反演

Inversion of PM2.5 Concentration in Beijing Based on Visibility and AOD Data

气候与环境研究. 2020, 25(5): 521 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19114

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王天正, 张美根, 韩霄. 2021. 秦皇岛 2019 年冬季重污染过程 PM2.5 来源数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 471−481. WANG Tianzheng, ZHANG Meigen, HAN Xiao. 2021. Source Apportionment of PM2.5 during a Heavy Pollution Episode in Qinhuangdao in Winter 2019 Using a Chemical Transport Model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 471−481. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19156

秦皇岛 2019 年冬季重污染过程 PM2.5 来源数值模拟

王天正 [1, 2] 张美根 [1, 2, 3] 韩霄 [1, 2]

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 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049
3 中国科学院城市环境研究所区域大气环境研究卓越创新中心，福建厦门 361021

摘 要 秦皇岛地处河北省东北部，是环渤海重要的港口城市，在近几年京津冀地区减排效果较好的情况下，于 2019 年 1 月出现了多次持续细颗粒物（PM2.5）污染过程。因此本文利用耦合了数值源解析模块 ISAM（Integrated Source Apportionment Method）的区域空气质量模式 RAMS-CMAQ（Regional Atmospheric Modeling System–Community Multiscale Air Quality），对 2019 年 1 月秦皇岛地区 PM2.5 进行模拟，并将 PM2.5 质量浓度高于（低于）75 μg m^{-3} 的时段划分为污染（清洁）时段，分别探讨了两个时段本地排放源对秦皇岛市 PM2.5 质量浓度的贡献情况，并且进一步探讨了秦皇岛各区县及外地排放源对秦皇岛市 4 个国控环境监测站点（第一关站、北戴河站、市监测站、建设大厦站）PM2.5 质量浓度的区域传输特征。结果表明，秦皇岛地区 PM2.5 质量浓度整体呈“南高北低”式分布。清洁时段，PM2.5 质量浓度受本地贡献较大，青龙县、卢龙县大部分地区贡献为 40%～50%，海港区、抚宁区、北戴河区、第一关区及昌黎县大部分地区贡献在 60% 以上；4 个国控环境监测站点受跨界输送贡献占 34.7%～41.6%。污染时段，秦皇岛市本地贡献相对于清洁时段整体下降 10% 左右，当地大气污染受到跨界区域传输影响增加；而在 4 个国控站中，北戴河站、第一关站受到跨界输送贡献分别下降 1.0% 和 2.3%；市监测站、建设大厦站受到跨界输送贡献分别上升 2.9% 和 2.0%。

关键词 PM2.5 源解析 CMAQ 模式 ISAM 模块
文章编号 1006-9585(2021)05-0471-11 **中图分类号** X513 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19156

Source Apportionment of PM2.5 during a Heavy Pollution Episode in Qinhuangdao in Winter 2019 Using a Chemical Transport Model

WANG Tianzheng[1, 2], ZHANG Meigen[1, 2, 3], and HAN Xiao[1, 2]

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chelmistry*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Center for Excellence in Urban Atmospheric Environment*, *Institute of Urban Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xiamen*, *Fujian Province* 361021

Abstract Qinhuangdao is an important port city located in the northeast of Hebei province, China. In recent years,

收稿日期 2019-10-02；**网络预出版日期** 2020-06-06
作者简介 王天正，男，1991 年出生，博士研究生，主要从事大气污染数值模式研究。E-mail: 290473953@qq.com
通讯作者 张美根，E-mail: mgzhang@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFB0503901
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFB0503901)

emission reductions were effective in improving the air quality over the North China Plain. However, a heavy PM2.5 pollution event appeared in Qinhuangdao area in January. (In contrast, continuous pollution that contained PM2.5 particles was evident during January 2019 at Qinhuangdao.) In this paper, the regional air quality model RAMS-CMAQ coupled with the integrated source apportionment method (ISAM) was employed to simulate the PM2.5 pollution process and analyze the impact of local sources on PM2.5 mass concentration. Two periods were defined: (1) Clean period in which the PM2.5 mass concentration over Qinhuangdao was below 75 μg m^{-3} and (2) pollution period in which the PM2.5 mass concentration over Qinhuangdao was above 75 μg m^{-3}. Contributions of local emission sources to PM2.5 mass concentration between the two periods were then compared, and the regional transport pattern of PM2.5 particles from different areas to four air quality monitoring sites was evaluated. The results showed that a high PM2.5 mass burden was distributed in the south part of Qinhuangdao. During the clean period, PM2.5 concentration was greatly contributed by local areas, with the contribution of 40%–50% in most areas of Qinglong and Lulong, and more than 60% in most areas of Haigang, Funing, Beidaihe, Tiiguan, and Changli.(Local emission sources of Qinglong greatly contributed to the PM2.5 mass burden. Lulong contributed 40%–50% and Haigang, Funing, Beidaihe, Diyiguan, and Changli together contributed more than 60% of the PM2.5 mass burden.) Regional transport during the clean period accounted for 34.7%–41.6% of the concentration of PM2.5 at the four monitoring sites. Compared with the clean period, the PM2.5 mass concentration from local areas decreased by approximately 10% and the effect of regional transport increased during the pollution period. Among the four monitoring sites, the PM2.5 concentration contributed by regional transport at Beidaihe and Diyiguan sites decreased by 1.0% and 2.3%, respectively while the contribution from surrounding regions increased by 2.9% and 2.0% at Shijiance and Jianshedasha sites, respectively.

Keywords PM2.5, Source Apportionment, CMAQ (Community Multiscale Air Quality), ISAM (Integrated Source Apportionment Method)

1 引言

秦皇岛市，也称“港城”，位于河北省的东北部，是我国北方重要的港口城市，同时也是一座“新兴工业”城市。由于工业化进程导致当地大气环境的恶化，同时秦皇岛市的能源结构以煤炭为主，钢铁产能相对过剩，砖厂、石灰窑等小企业分布较为集中，设备工艺落后，大部分缺少污染防治手段，导致当地污染排放严重（杨安行和李湘宜, 2014）。秦皇岛港，主要运输煤炭，拥有全国规模最大的港口储煤场，在煤炭装卸、储存以及运输过程中容易造成煤烟尘污染（石碧清等, 2007）。地理位置上，秦皇岛市紧邻唐山市，而唐山市是钢铁、焦化、建材等行业为一体的典型重工业城市，大气污染问题较为严重（张莉等, 2019）。秦皇岛市近几年减排形势较好，根据 2016～2018 年河北省生态环境状况公报（河北省环境保护厅, 2017, 2018, 2019）显示，2016～2018 年秦皇岛市达到或优于《环境空气质量标准》（GB3095-2012）Ⅱ级标准天数分别是 281、268 和 285 d，其中 2018 年 PM2.5 平均质量浓度达到 38 μg m^{-3}，位于京津冀前列。但进入 2019 年后，秦皇岛地区爆发了多次持续性的 PM2.5 污染事件，其中 1 月 PM2.5 平均浓度达到 67 μg m^{-3}，同比 2018 年上升了 63.4%。同时根据 2019 年 1 月全国城市空气质量报告（中国环境监测总站, 2019）显示，京津冀及周边地区“2+26”城市 PM2.5 平均浓度为 108 μg m^{-3}，同比上升 16.1%。这样的结果导致一旦京津冀区域受西南、偏西风控制，秦皇岛地区将受到污染物的区域输送影响（王燕丽等, 2017）。

近年来趋向于使用在化学传输模式（Chemical Transport Models，CTM）的基础上开发的“标记追踪法”（Wu et al., 2013; Yin et al., 2017; 张婷慧等, 2017; 吴育杰, 2019）进行源解析工作。该方法通过在空气质量模型中耦合相关模块，对不同行业、不同区域排放源排放的污染物进行“标记”，在模式中模拟追踪其在大气中传输、扩散、化学转化以及沉降过程，并在质量守恒的基础上估算“标记”排放源对关注地区的污染物浓度贡献（Wagstrom et al., 2008; Kwok et al., 2013）。Wu et al.（2017）使用 NAQPM（The Nested Air Quality Prediction Model System）耦合一种在线源标记模型（An on-line source-tagged model）对上海地区一次和二次无机气溶胶（硫酸盐、硝酸盐、铵盐）进行标记追踪，发现来自江苏和山东地区的输送起重要作用，两个省对上海地区硫酸盐的贡献达到 50% 以上。

Zhang et al.（2018）利用 CAMx-PSAT（Comprehensive Air Quality Model with extensions-Particulate Source Apportionment Technology）对北京四季 PM2.5 的进行来源解析，得出结论：冬季燃煤贡献最大，春季沙尘贡献最大，夏、秋季节贡献最大的是机动车排放源，且北京本地、近郊以及周边城市贡献分别为 47.6%、19.3%、11.4%。Kwok et al.（2012）使用 CMAQ-TSSA（Community Multiscale Air Quality-The Tagged Species Source Apportionment）对珠三角和香港地区 SO_2 以及 PM2.5 中硫酸盐和 EC（elemental carbon）的来源进行解析，发现燃煤电厂、机动车及船舶排放贡献最大。Chen et al.（2017）利用了 CMAQ-ISAM（Community Multiscale Air Quality-Integrated Source Apportionment Method）对山东陵城乡村地区 PM2.5 区域来源进行解析，结果显示，凌城本地排放仅对 PM2.5 浓度贡献了 15.4%，德州市和周边 6 个城市的 PM2.5 浓度分别为 12.6% 和 28.1%。来自其他更远地区和边界的区域长距离运输分别占 31.6% 和 11.1%。

上述工作很好地说明了基于数值模式的源解析方法可以对研究区域实现分区域、分时段的精细化来源解析。目前，针对秦皇岛大气污染特征研究主要是利用观测资料分析污染物的变化特征和污染时段的气象要素（龙小菊, 2017），而对秦皇岛地区的大气污染区域传输源解析工作缺乏系统的模拟研究。因此，本文利用空气质量模型 RAMS-CMAQ（Regional Atmospheric Modeling System –Community Multiscale Air Quality），耦合 ISAM（Integrated Source Apportionment Method），模拟了 2019 年 1 月秦皇岛市 PM2.5 污染和传输过程，分析了期间秦皇岛地区污染物的分布，并且讨论了区域输送对秦皇岛地区的 PM2.5 的贡献情况。

2 模式介绍与试验设计

2.1 模式介绍

CMAQv5.0.2 由美国环保署于 2014 年发布，用于模拟多种大气环境问题。其中包括对流层臭氧、气溶胶，以及酸沉降（Eder and Yu, 2006）。模式中气相化学机制使用的是更新后的 CB05（the Carbon Bond Mechanism；Sarwar et al., 2008），并且使用 ISORROPIA（Nenes et al., 1999）模块处理无机气溶胶与其气相前体物之间的热力学平衡过程。另外使用 AER06 模块模拟气溶胶形成及其动力过程。模式系统模拟的气溶胶物种包括：硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳（BC）、有机碳（OC）、沙尘和海盐气溶胶，并将气溶胶粒子按粒径大小分为 3 个模态（埃根核、聚集态和粗粒子模态）。该模式使用区域大气模式系统 RAMS（6.0 版本）提供气象场。Cotton et al.（2003）对 RAMS 及其性能进行了详细描述。该模式垂直方向采用 δ–z 地形追随坐标系统对边界层及下垫面进行细致模拟，增加模式对边界层内大气污染物模拟的准确性。模式运行所需外强迫气象场由 ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）0.75°（纬度）×0.75°（经度）再分析数据提供。

ISAM 是由 Kwok et al.（2013）对 TSSA（Tagged Species Source Apportionment）（Wang et al., 2009）进行改进的最新版本源解析工具。其工作原理主要是将上一时次模拟生成的污染物浓度按一定的权重分配给当前时次的“标记”污染物。ISAM 在 TSSA 的基础上改善了在平流过程对“标记示踪剂”（tagged tracers）的追踪过程；同时改进了气相化学过程对污染物浓度的分配方式，减少非线性过程带来的影响，兼顾了计算效率和准确性。将 ISAM 与空气质量模式 RAMS-CMAQ 耦合，可以对不同地区的排放源对秦皇岛市大气 PM2.5 浓度贡献进行定量模拟解析。

2.2 试验设计

模式使用的排放源清单如下：人为活动排放的一次气溶胶和前体物采用 MIX 排放源清单（基准年为 2016；Li et al., 2017），水平分辨率为 0.25°（纬度）×0.25°（经度），其中包含了工业源、电厂源、交通源、农业源和居民生活源排放的主要的污染物:CO、NO_x、SO_2、NMVOC、NH_3、BC、OC、PM2.5 和 PM10。另外，由农业活动产生的 VOC 和 NO_x 排放数据取自 REAS2.1（Regional Emission inventory for Asia domain）（Kurokawa et al., 2013）。飞机产生的 NO_x 排放数据由 EDGAR（Emissions Database For Global Atmospheric Research）（Olivier et al., 1994）提供。GEIA（Global Emissions Inventory Activity; Benkovitz et al., 1996）提供由闪电造成的 NO_x 排放数据。此外，森林火

灾、秸秆焚烧、农业活动造成生物质燃烧排放数据由 GFEDv4.1（Global Fire Emissions Database；van der Werf et al., 2010）提供。

模式采用三重嵌套网格（图 1），最外层网格（D1）覆盖了东亚地区，并且为内层网格提供边界条件，模拟区域的水平网格间距为 64 km，总面积为 6654 km（经向）×5440 km（纬向）；第二层网格（D2）覆盖了华北平原的主要的人口密集区，是各种大气污染物主要排放地区，且平原地形易于污染物的跨界输送。该模拟区域的分辨率为 16 km；第三层网格（D3）模拟区域覆盖了整个秦皇岛地区，水平分辨率为 2 km，在水平方向上有 94（经向）×98（纬向）个网格点，可详细的模拟秦皇岛地区的污染物的时空分布。垂直方向上该模式将地面至模式层顶约 23 km 共分为 15 层，为了更好的描述大气边界层，有 6 层分配在 2 km 以下（韩霄和张美根, 2014）。

2019 年冬季秦皇岛地区发生了多次污染过程，本次模拟时段选择为 2019 年 1 月。图 1 中 D3 模拟区域为秦皇岛地区的 7 个区县，利用 ISAM 追踪模块将昌黎县、抚宁区、卢龙县、北戴河区、海港区、第一关区、青龙县和其他区域分别标记。同时，追踪的气溶胶成分包括：硫酸盐、硝酸盐、铵盐、EC、OC、金属和扬尘粒子（PM2.5_IONS），得到的它们的质量浓度并相加即为追踪的 PM2.5 质量浓度。接下来，根据《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）二级标准（75 μg m^{-3}），将 2019 年 1 月秦皇岛市观测 PM2.5 质量浓度高于（低于）此标准的时段划分为污染（清洁）时段，并定量估算污染（清洁）时段 区域传输对秦皇岛地区 PM2.5 的贡献情况。

3 模拟结果评估

本文选取了中国气象局地面气候资料日值数据集（http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx/[2019-06-10]）中秦皇岛、青龙和乐亭的日平均温度、相对湿度、风速和最大风向来评估气象场的模拟效果。结果由图 2 显示，秦皇岛站（图 2a–2d）模拟温度与观测值较为吻合，模拟相对湿度比观测

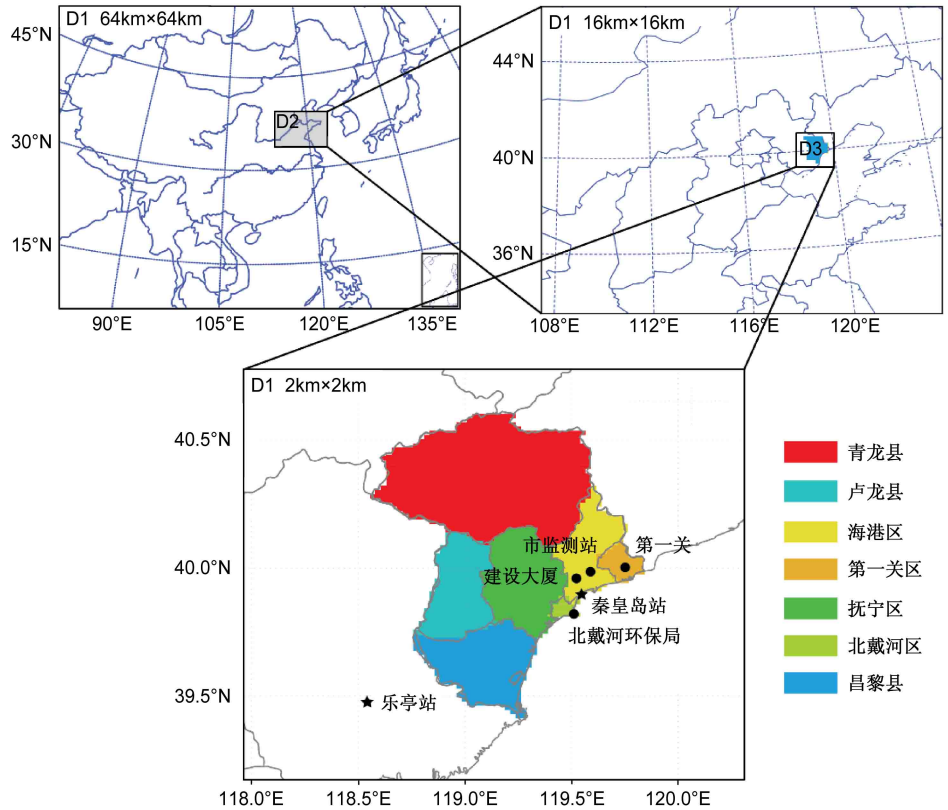

图 1 模式使用的三重嵌套网格的覆盖区域以及秦皇岛行政区（颜色）区划、2 个自动气象站（星星）以及 4 个国控站点（圆点）的位置

Fig. 1 Model domains in triple-nested grid system in this study; the division of Qinhuangdao administrative district (color), and the automatic meteorological stations (stars). The locations of the air quality monitoring sites (dots) are also in the figure

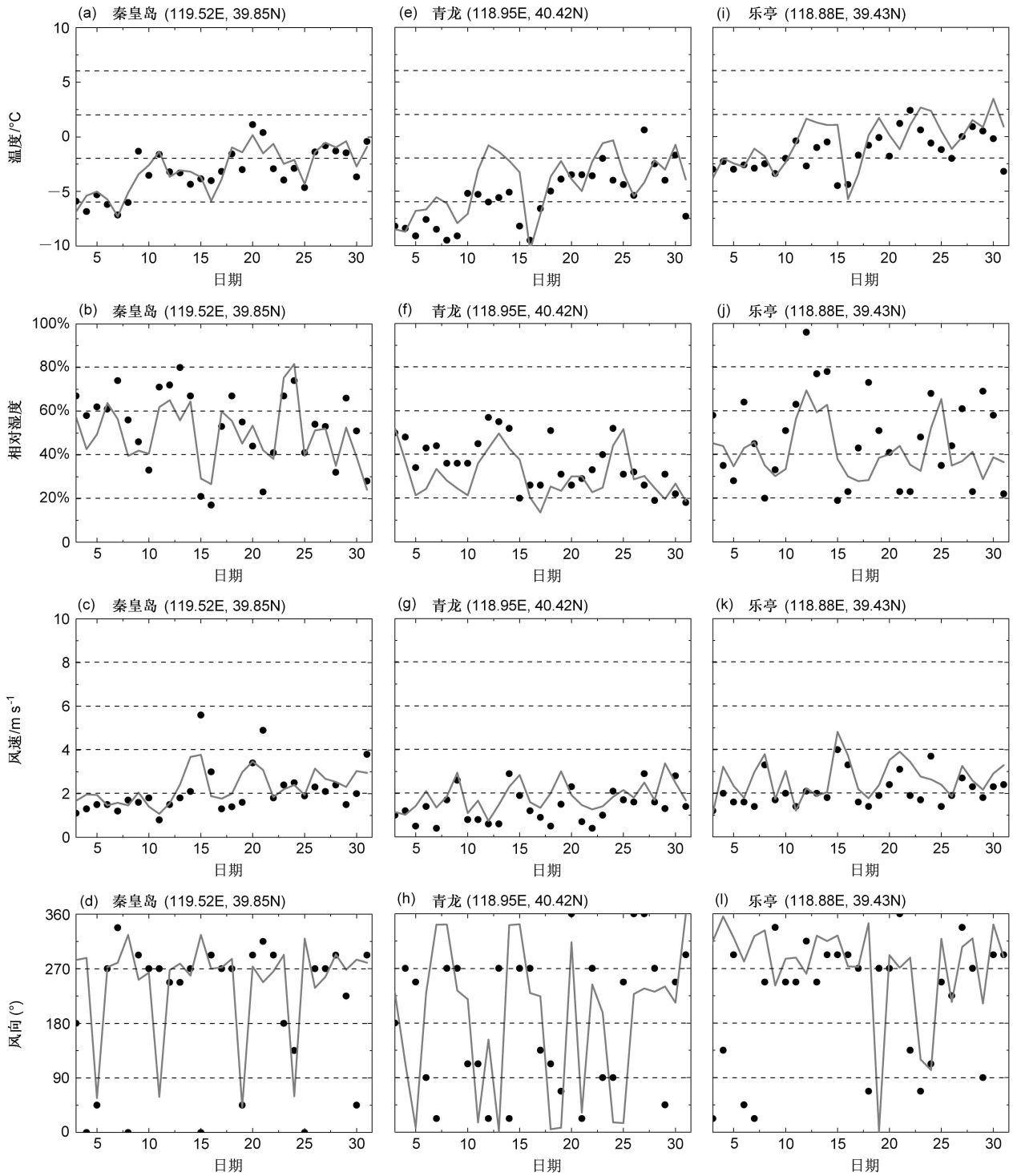

图 2　2019 年 1 月秦皇岛（第一列）、青龙（第二列）和乐亭（第三列）模拟（黑色实线）与观测（黑色圆点）气象要素日均值结果比较：（a、e、i）温度；（b、f、j）相对湿度；（c、g、k）风速；（d、h、l）风向

Fig. 2　Modeled (black solid lines) and observed (black dots) daily averaged meteorological factors of Qinhuangdao (the first column), Qinglong (the second column), and Laoting (the third column) in January 2019: (a, e, i) Temperature; (b, f, j) relative humidity; (c, g, k) wind speed; (d, h, l) wind direction

值略低，模拟风速与观测值对应较好，模拟结果基本再现了观测值的大小和趋势。同时，模拟风向和观测值也较为一致，基本能反应出秦皇岛 2019 年 1 月主要受西北—西南风控制。由图 2e–2h 可以看出，青龙站整体模拟效果较好，模拟相对湿度虽然在数值上略低于观测值，但变化趋势一致。另外，

模拟风速和风向也与观测值变化趋势相符。图 2i–2l 为乐亭站点处观测数据与模拟结果得比较，除相对湿度观测值波动较大，模式模拟未能较好的捕捉，其余气象要素的观测数据与模拟结果在大小和变化趋势上皆具有良好的一致性，这也表明模式比较合理。

图 3 为 2019 年 1 月 PM2.5 的 CMAQ 模拟值与相应国控站点（图 1）观测值逐小时浓度对比图，表 1 汇总了本研究中 PM2.5 模拟浓度的验证统计量。图中显示，CMAQ 模式很好的再现 4 个站点 PM2.5 的质量浓度和变化趋势，同时捕捉到了 10～15 日和 17～18 日这两次污染生消过程中的浓度高值。根据表 1 可以看出，模拟值与观测值的相关系数较高，4 个站点均在 0.6 以上；在北戴河环保局、监测站和城建大厦站模拟均值和观测均值较为接近，仅在第一关相差 10 μg m^{-3} 左右，这可能与第一关站周边的一些无组织散煤燃烧排放有关。模式模拟的标准差普遍低于观测标准差，表明模拟结果的波动幅度较小。一个重要的原因是由于模式输出值是每个网格单元的平均值，难以表征城市区域的污染物质量浓度的极端高值和极端低值（Han et al., 2016）。

4 结果与讨论

4.1 华北地区 PM2.5 的平均水平分布

图 4 展示了 2019 年 1 月华北地区以及秦皇岛市及周边 PM2.5 质量浓度和地面风场的月平均水平分布。从华北地区（图 4a）来看，京津唐、河北省南部、山东省大部和河南省地区 PM2.5 质量浓

表 1 2019 年 1 月 PM2.5 质量浓度模拟和观测小时值统计结果

Table 1 Statistical comparisons between the simulated and observed hourly PM2.5 mass concentrations in January 2019

μg m^{-3}

站点	观测均值	模拟均值	观测标准差	模拟标准差	观测与模拟相关系数
北戴河环保局	73.85	75.75	78.61	58.71	0.70
第一关	73.25	59.33	66.84	52.02	0.61
监测站	75.69	67.96	67.14	51.48	0.62
建设大厦	69.78	69.49	66.99	51.89	0.64

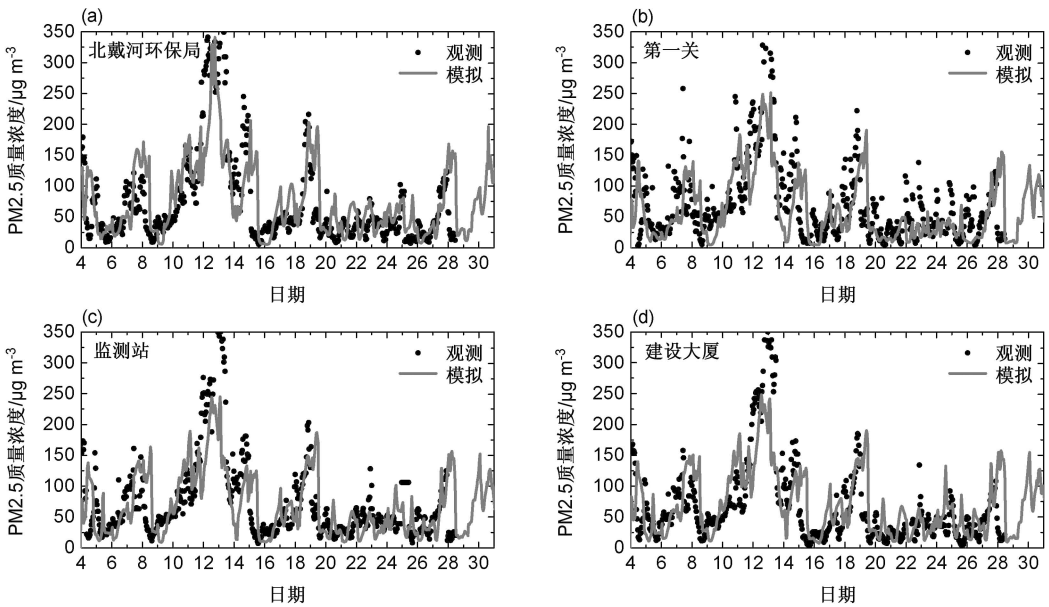

图 3 2019 年 1 月模拟（灰色实线）与观测（黑色圆点）PM2.5 质量浓度小时序列值：（a）北戴河环保局；（b）第一关；（c）市监测站；（d）建设大厦

Fig. 3 Modeled (grey solid lines) and observed (black dots) hourly averaged PM2.5 massconcentrations in January 2019 at (a) Beidaihehuanbaoju site, (b) Diyiguan site, (c) Shijiancezhan site, and (d) Jianshedasha site

度基本超过了 75 μg m^{-3}，其中最高可达到 115 μg m^{-3} 以上。秦皇岛地区（图 4b）位于京津唐 PM2.5 浓度的高值区的东部，其质量浓度的南北差异比较明显，主要污染地区集中在南部，高 PM2.5 浓度气团覆盖了昌黎县，卢龙县南部以及北戴河区域，形成了污染区域性分布的特点，PM2.5 浓度在 75 μg m^{-3} 以上，其中昌黎县西北部的浓度最高，可达到 115～250 μg m^{-3}，这可能也与当地较高的工业源排放有关。此外，在抚宁区、海港区、山海关区和青龙县南部月均 PM2.5 浓度在 75 μg m^{-3} 以下，而在青龙县北部则更为清洁，PM2.5 浓度在 35 μg m^{-3} 以下。同时，华北地区区域风场显示，2019 年 1 月平均风向以西北为主，说明秦皇岛北部区域不易于受到西部高浓度污染物输送的影响。

4.2　秦皇岛市 PM2.5 的来源解析

4.2.1　秦皇岛 PM2.5 月均水平分布特征

图 5 展示了秦皇岛清洁时段和污染时段 PM2.5 质量浓度的平均值和近地面风场的水平分布。从图 5a 中可以看出，当秦皇岛市处于清洁时段，整个区域受到较强的西北风控制。青龙县大部分区域 PM2.5 不到 35 μg m^{-3}；卢龙县、抚宁区、海港区和第一关区南部以及北戴河地区 PM2.5 在西北风的影响下，浓度在 75 μg m^{-3} 以下；昌黎县在清洁时段 PM2.5 浓度水平仍在 75 μg m^{-3} 以上，这与其西部紧邻 PM2.5 高值区有关，且存在小部分区域 PM2.5 浓度高于 115 μg m^{-3}，这可能与当地污染排放强有关。由图 5b 可知，污染日期间秦皇岛北部地区污染较轻，青龙县以及卢龙县、抚宁区、海港区北部区域污染时段风向和 PM2.5 浓度与清洁时段相比改变都不大。在污染较重的秦皇岛南部地区，昌黎县 PM2.5 质量浓度大部分地区超过 115 μg m^{-3}，西部地区浓度在 150～250 μg m^{-3}；卢龙县大部分地区、抚宁区南部、海港区南部，北戴河区和山海关区，质量浓度也可达 75～115 μg m^{-3}，图中的风场显示秦皇岛南部地区受偏西风向控制，风速为 4 m s^{-1} 左右，因此偏西风带来的污染物输送是造成秦皇岛市南部地区 PM2.5 污染加重的重要原因之一。

4.2.2　秦皇岛市 PM2.5 的本地贡献

图 6 展示了本地排放对秦皇岛 PM2.5 质量浓度的贡献百分比。从图 6a 中可以看出，清洁时段本地排放对秦皇岛地区 PM2.5 的贡献较大，青龙县、卢龙县大部分地区本地源贡献在 40%～50%，抚宁区、海港区和昌黎县大部分区域，以及北戴河区和第一关区本地源贡献都在 60% 以上。图 6b 所示的污染时段秦皇岛市本地贡献相对于清洁时段整体下降 10% 左右，其中抚宁区本地贡献下降最为明显，其西部地区下降 20%，可见污染物的区域输送对当地空气质量影响较大。另外，昌黎县北部区域、海港区中东部区域以及北戴河区在污染期间本地贡献依旧达到 60% 以上，说明本地排放源贡献是上述地区大气污染的另一个重要原因。

4.2.3　秦皇岛市 PM2.5 的区域传输贡献

图 7 和图 8 分别为清洁时段和污染时段秦皇岛市内标记的 7 个区县以及外来跨界传输贡献对 4 个国控站点处 PM2.5 质量浓度的贡献比例。图 7 显示，清洁时段，近地面风场为较强的西北风，外来贡献主要是西北风带来的较为清洁的空气。北戴河环保局站贡献主要来源于外界输送（41.6%）、北戴河区（18.4%）、抚宁区（15.8%），而昌黎县也贡献了 12.0%，这可能是由于图中所示的近地面风场是整个清洁时段的平均风场，而当期间风向转至偏西风时，昌黎县排放的污染物就会对北戴河造成影响；第一关站受到外界传输贡献为 37.3%，海港区为 20.6%，山海关区为 16.1%；在海港区内的市监测站和建设大厦站，由于相距较近，其传输贡献特征基本一致：除了外界传输贡献最大，为 34.7% 和 35.3%，海港区本地源贡献分别占 34.9% 和 33.4%，其次为相邻的抚宁区，分别为 15.2% 和 16.1%。虽然平均风向为西北风，但由于青龙县排放量较低，4 个站点受到青龙县贡献较小。

由图 8 可知，污染时段，风场转为偏西气流控制，这样的风向有利于将京津唐地区的高浓度污染物输送过来。其中，北戴河环保局站的受到的贡献主要来源于外界输送、北戴河区、昌黎县、抚宁区，分别为 40.6%、22.4%、13.1% 和 12.6%，与清洁时段相比，外地和抚宁区贡献下降 1.0% 和 3.2%，北戴河区和昌黎县贡献上升 4.0% 和 1.1%。第一关主要受到的贡献为外地输送（37.3%），同时山海关区、海港区、抚宁区贡献分别为 18.0%、21.4% 和 15.6%，相比清洁时段外地贡献下降 2.3%，本市内传输贡献分别上升 2.0%、0.7% 和 4.7%。市监测站和建设大厦站在污染时段，外地贡献分别占 37.6% 和 37.2%，相比清洁时段上升 2.9% 和 2.0%，海港区对两个站点贡献分别为 27.2% 和 24.2%，同比下降 7.2% 和 9.2%，临近的抚宁区贡献分别为

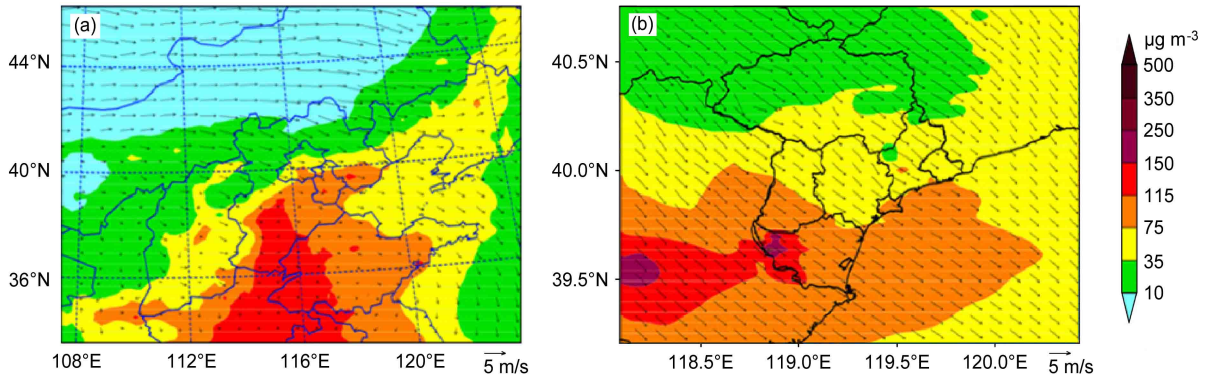

图 4 2019 年 1 月（a）华北地区和（b）秦皇岛区域 PM2.5 质量浓度月平均水平分布及近地面风场

Fig. 4 Spatial distribution of the monthly average PM2.5 mass concentration and surface wind field on (a) North China Plain and (b) Qinhuangdao in January 2019

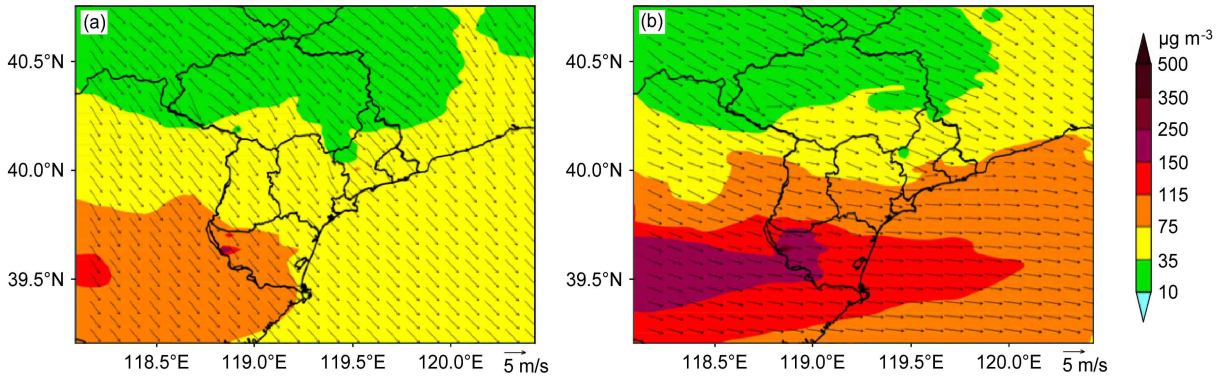

图 5 2019 年 1 月秦皇岛（a）清洁时段和（b）污染时段 PM2.5 质量浓度水平分布及近地面风场

Fig. 5 Spatial distribution of PM2.5 mass concentration and surface wind field during (a) clean period and (b) pollution period in Qinhuangdao in January 2019

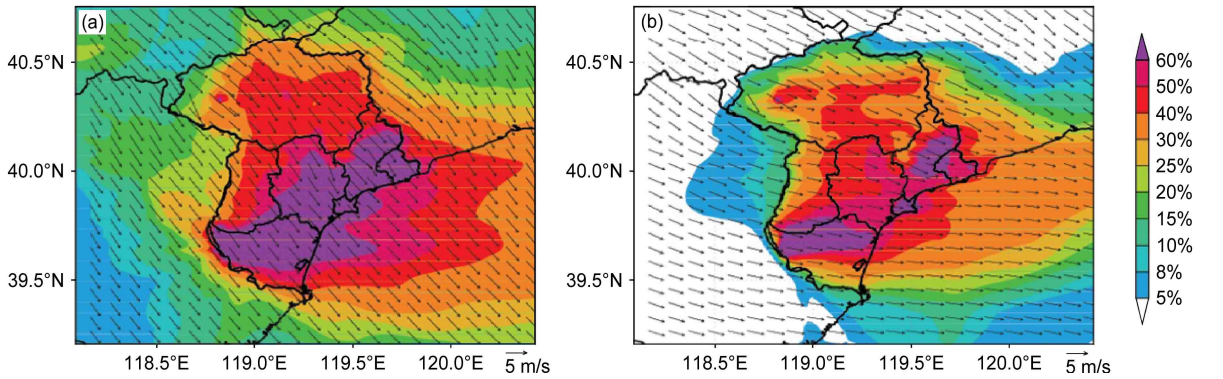

图 6 2019 年 1 月秦皇岛市（a）清洁时段和（b）污染时段本地排放源对 PM2.5 质量浓度贡献百分比及近地面风场

Fig. 6 Contribution percentage to the PM2.5 mass concentration and surface wind field during the (a) clean period and (b) pollution period from Qinhuangdao local emission sources in January 2019

19.9% 和 20.8%，同比上升 4.7% 和 4.7%。青龙县由于排放量低，因此对四个国控站点贡献较小；卢龙县污染排放也相对较轻，但由于污染时段偏西风的影响，导致该地区排放的 PM2.5 对四个国控站点的贡献略有增加；昌黎县虽然排放量也比较可观，但从所处位置以及风向来看难以影响到除北戴河环保局站以外的其他国控站点。

5 结论

本文利用区域空气质量模式 RAMS-CMAQ 耦合了 ISAM 源解析工具，对秦皇岛地区 2019 年 1

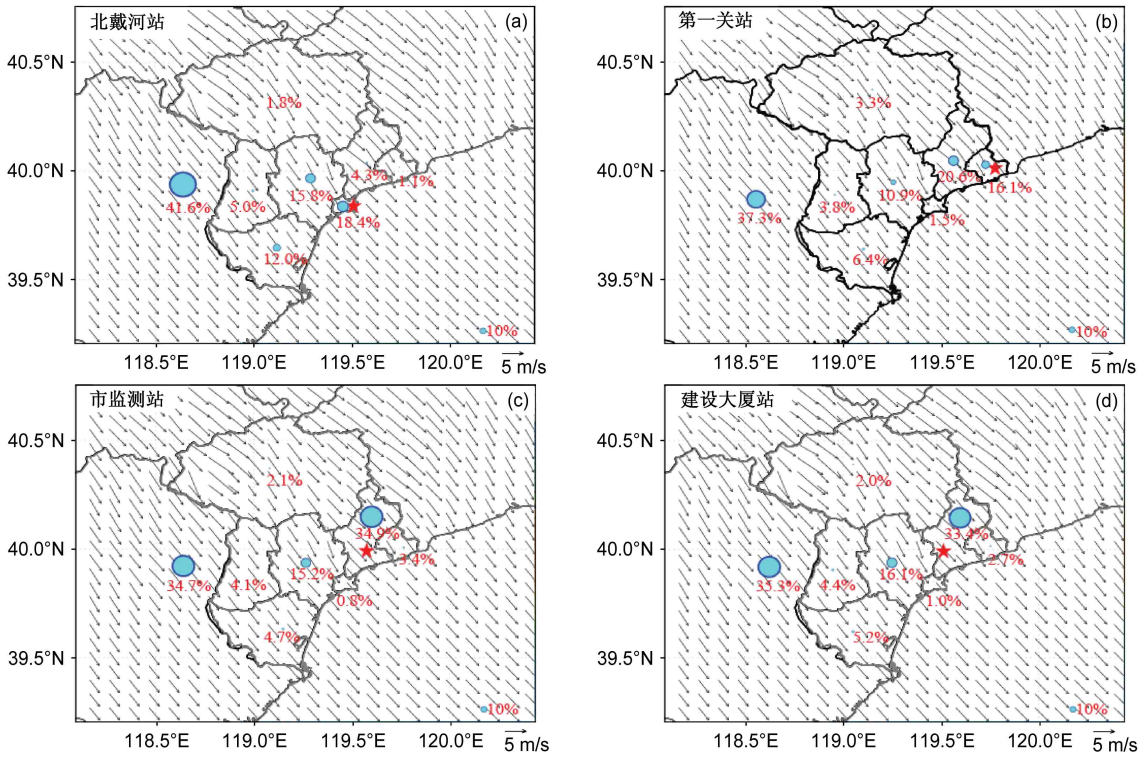

图 7　2019 年 1 月清洁时段 4 个国控站点处 PM2.5 质量浓度传输贡献及近地面风场：（a）北戴河环保局；（b）第一关；（c）市监测站；（d）建设大厦

Fig. 7　Contribution percentage of PM2.5 mass concentration and surface wind field at monitoring sites during the clean period in January 2019 at (a) Beidaihehuanbaoju site; (b) Diyiguan site; (c) Shijiancezhan site; (d) Jianshedasha site

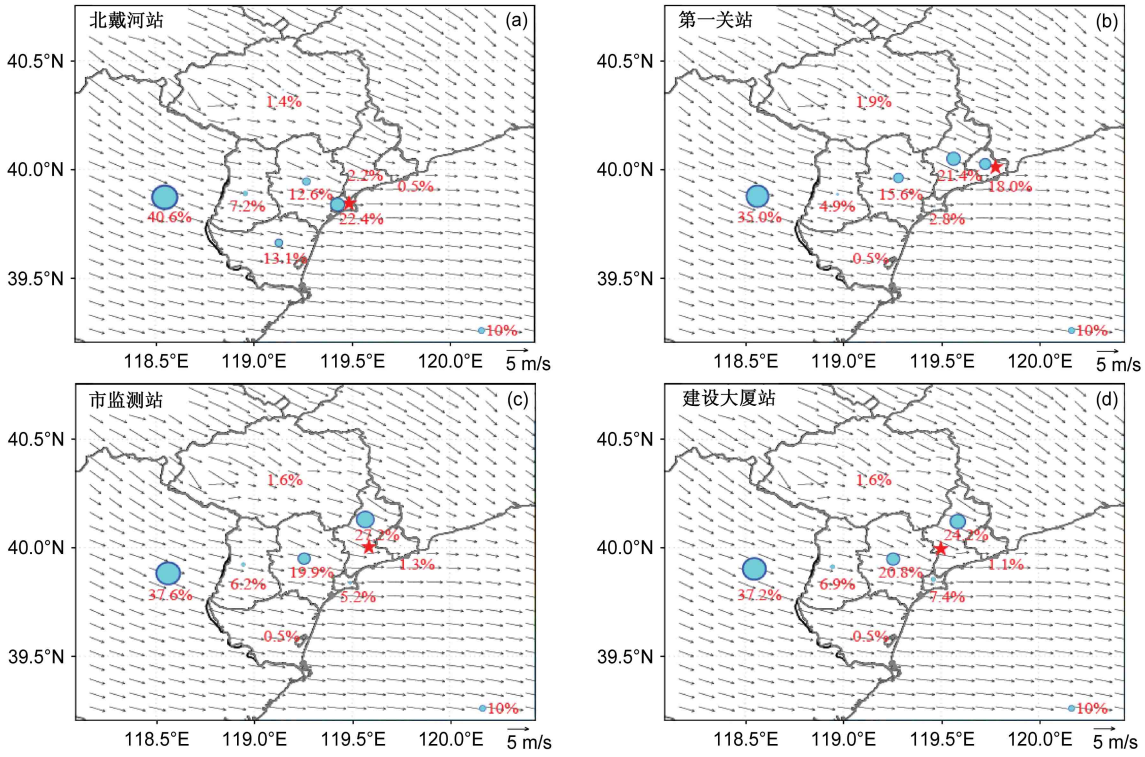

图 8　2019 年 1 月污染时段 4 个国控站点处 PM2.5 质量浓度传输贡献及近地面风场：（a）北戴河环保局；（b）第一关；（c）市监测站；（d）建设大厦

Fig. 8　Contribution percentage of PM2.5 mass concentration and surface wind field at monitoring sites during the pollution period in January 2019 at (a) Beidaihehuanbaoju site; (b) Diyiguan site; (c) Shijiancezhan site; (d) Jianshedasha site

月 PM2.5 质量浓度进行模拟，并以 75 μg m^{-3} 为标准，将秦皇岛市 4 个国控站点观测 PM2.5 浓度均高于（低于）此标准的时段划分为污染（清洁）时段，并分析污染（清洁）时段 PM2.5 分布特征与来源贡献。

（1）2019 年 1 月华北大部分地区平均 PM2.5 浓度高于 75 μg m^{-3}，秦皇岛市污染呈现“南高北低”的分布，西部紧邻 PM2.5 浓度高值区，受影响区域主要位于秦皇岛南部，其中昌黎县西部 PM2.5 浓度最高，可达到 150 μg m^{-3} 以上。清洁时段秦皇岛地区盛行风向为西北风，大部分区域浓度较低，但昌黎县的地理位置导致其受到区域输送的影响较大。污染时段秦皇岛北部仍受西北风控制，PM2.5 质量浓度较低，南部区域转为偏西风控制，导致西部地区的污染物输送，PM2.5 质量浓度上升。

（2）清洁时段秦皇岛市 PM2.5 浓度主要受到本地排放贡献影响。青龙县、卢龙县大部分地区本地源贡献为 40%～50%，其中抚宁区和海港区大部，昌黎县北部地区，以及北戴河区和第一关区全部地区本地源贡献都在 60% 以上。污染时段风向转为偏西风，除昌黎县北部区域、海港区中东部区域以及北戴河区在污染期间本地贡献依旧达到 60% 以上，秦皇岛市本地贡献相对于清洁时段整体下降 10% 左右，抚宁区东部本地贡献下降至 40%~50%，说明当地大气污染受到区域传输影响增加。

（3）清洁时段，外地输送对 4 个国控站点贡献在 34.7%～41.6%，北戴河环保局站受到的贡献主要来自北戴河区、抚宁区和昌黎县，分别为 18.4%、15.8% 和 12.0%。第一关站 PM2.5 污染主要来自北戴河区和海港区排放源的贡献，分别为 16.1% 和 20.6%。在海港区内的市监测站和建设大厦站，本地贡献主要来自海港区，分别为 34.9% 和 33.4%，其次为抚宁区，贡献百分比为 15.2% 和 16.1%。污染时段，北戴河环保局站的外地贡献下降 1.0%，北戴河区和昌黎县贡献上升 4.0% 和 1.1%。第一关站外地贡献下降 2.3%，海港区、山海关区和抚宁区贡献分别上升 0.7%、2.0% 和 4.7%。市监测站和建设大厦站在污染时段，外地贡献分别上升 2.9% 和 2.0%，临近的抚宁区、北戴河区贡献上升 4.7%、4.7% 和 4.4%、6.4%。

参考文献（References）

Benkovitz C M, Scholtz M T, Pacyna J, et al. 1996. Global gridded inventories of anthropogenic emissions of sulfur and nitrogen [J]. J. Geophys. Res., 101(D22): 29239−29253. doi:10.1029/96jd00126

Chen D S, Liu X X, Lang J L, et al. 2017. Estimating the contribution of regional transport to PM2.5 air pollution in a rural area on the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 583: 280−291. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.066

Cotton W R, Sr R A P, Walko R L, et al. 2003. RAMS 2001: Current status and future directions [J]. Meteor. Atmos. Phys., 82(1-4): 5−29. doi:10.1007/s00703-001-0584-9

Eder B, Yu S C. 2006. A performance evaluation of the 2004 release of Models-3 CMAQ [J]. Atmos. Environ., 40(26): 4811−4824. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.08.045

韩霄, 张美根. 2014. 2013 年 1 月华北平原重霾成因模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19(2): 127−139. Han Xiao, Zhang Meigen. 2014. Model analysis of haze formation over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research, 19(2): 127−139. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13136

Han X, Zhang M G, Zhu L Y, et al. 2016. Assessment of the impact of emissions reductions on air quality over North China Plain [J]. Atmospheric Pollution Research, 7(2): 249−259. doi:10.1016/j.apr.2015.09.009

河北省环境保护厅. 2017. 2016 年河北省环境状况公报 [N/OL]. http://hbepb.hebei.gov.cn/hjzlzkgb/201706/P020170606576840937404.pdf.

河北省环境保护厅. 2018. 2017 年河北省生态环境状况公报 [N/OL]. http://hbepb.hebei.gov.cn/hjzlzkgb/201807/P020180705353443962431.pdf.

河北省生态环境厅. 2019. 2018 年河北省生态环境状况公报 [N/OL]. http://hbepb.hebei.gov.cn/root8/auto454/201906/W020190625351798592022.pdf.

Kurokawa J, Ohara T, Morikawa T, et al. 2013. Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000–2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(21): 11019−11058. doi:10.5194/acp-13-11019-2013

Kwok R, Fung J C H, Lau A K H, et al. 2012. Tracking emission sources of sulfur and elemental carbon in Hong Kong/Pearl River delta region [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 69(1): 1−22. doi:10.1007/s10874-012-9226-5

Kwok R H F, Napelenok S L, Baker K R. 2013. Implementation and evaluation of PM2.5 source contribution analysis in a photochemical model [J]. Atmos. Environ., 80: 398−407. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.08.017

Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, et al. 2017. MIX: A mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS –Asia and HTAP [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(2): 935−963. doi:10.5194/acp-17-935-2017

龙小菊. 2017. 秦皇岛市大气重污染特征及防控策略 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 27(3): 82−86. Long Xiaoju. 2017. Atmospheric heavy pollution characteristics and prevention and control strategies in Qinhuangdao urban area [J]. Journal of EMCC, 27(3): 82−86.

doi:10.13358/j.issn.1008-813x.2017.03.22

Nenes A, Pandis S N, Pilinis C. 1999. Continued development and testing of a new thermodynamic aerosol module for urban and regional air quality models [J]. Atmos. Environ., 33(10): 1553−1560. doi:10.1016/s1352-2310(98)00352-5

Olivier J G J, Bouwman A F, van der Maas C W M, et al. 1994. Emission database for global atmospheric research (Edgar) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 31(1-2): 93−106. doi:10.1007/BF00547184

Sarwar G, Luecken D, Yarwood G, et al. 2008. Impact of an updated carbon bond mechanism on predictions from the CMAQ modeling system: Preliminary assessment [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47(1): 3−14. doi:10.1175/2007JAMC1393.1

石碧清, 刘湘, 喻晴. 2007. 秦皇岛市环境空气中主要污染物变化趋势分析及控制对策 [J]. 环境科学与管理, 32(7): 54−57. Shi Biqing, Liu Xiang, Yu Qing. 2007. Changeable trend of major pollutants in Qinhuangdao's atmosphere and its measurement [J]. Environmental Science and Management, 32(7): 54−57. doi:10.3969/j.issn.1673-1212.2007.07.017

van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, et al. 2010. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10(23): 11707−11735. doi:10.5194/acp-10-11707-2010

Wagstrom K M, Pandis S N, Yarwood G, et al. 2008. Development and application of a computationally efficient particulate matter apportionment algorithm in a three-dimensional chemical transport model [J]. Atmospheric Environment, 42(22): 5650−5659. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.03.012

王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 2017. 京津冀区域 PM2.5 污染相互输送特征 [J]. 环境科学, 38(12): 4897−4904. Wang Yanli, Xue Wenbo, Lei Yu, et al. 2017. Regional transport matrix study of PM2.5 in Jingjinji region, 2015 [J]. Environmental Science, 38(12): 4897−4904. doi:10.13227/j.hjkx.201703282

Wang Z S, Chien C J, Tonnesen G S. 2009. Development of a tagged species source apportionment algorithm to characterize three-dimensional transport and transformation of precursors and secondary pollutants [J]. J. Geophys. Res., 114(D21): D21206. doi:10.1029/2008JD010846

Wu D W, Fung J C H, Yao T, et al. 2013. A study of control policy in the Pearl River delta region by using the particulate matter source apportionment method [J]. Atmos. Environ., 76: 147−161. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.11.069

Wu J B, Wang Z F, Wang Q, et al. 2017. Development of an on-line source-tagged model for sulfate, nitrate and ammonium: A modeling study for highly polluted periods in Shanghai, China [J]. Environmental Pollution, 221: 168−179. doi:10.1016/j.envpol.2016.11.061

吴育杰. 2019. 基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的京津冀及周边地区 PM2.5 来源解析研究 [D]. 浙江大学硕士学位论文.

杨安行, 李湘宜. 2014. 秦皇岛市大气污染成因与防治对策初探 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 24(3): 68−70. Yang Anxing, Li Xiangyi. 2014. Causes and prevention countermeasures of air pollution of Qinhuangdao [J]. Journal of EMCC, 24(3): 68−70. doi:10.13358/j.issn.1008-813x.2014.03.20

Yin X H, Huang Z J, Zheng J Y, et al. 2017. Source contributions to PM2.5 in Guangdong province, China by numerical modeling: Results and implications [J]. Atmospheric Research, 186: 63−71. doi:10.1016/j.atmosres.2016.11.007

张莉, 花家嘉, 王猛, 等. 2019. 唐山地区污染气体分布特征及气象要素关系分析研究 [J]. 环境科学与管理, 44(5): 133−140. Zhang Li, Hua Jiajia, Wang Meng, et al. 2019. Analysis on distribution characteristics of pollution gas and its relationship with meteorological elements in Tangshan area in recent five years [J]. Environmental Science and Management, 44(5): 133−140. doi:10.3969/j.issn.1673-1212.2019.05.031

张婷慧, 陈报章, 王瑾, 等. 2017. 基于 CAMx 的徐州市 2016 年冬季 PM2.5 污染过程及来源分析 [J]. 环境科学学报, 37(10): 3918−3925. Zhang Tinghui, Chen Baozhang, Wang Jin, et al. 2017. Process analysis and source apportionment of PM2.5 pollution in Xuzhou in winter 2016 based on CAMx [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 37(10): 3918−3925. doi:10.13671/j.hjkxxb.2017.0078

Zhang Y P, Li X, Nie T, et al. 2018. Source apportionment of PM2.5 pollution in the central six districts of Beijing, China [J]. Journal of Cleaner Production, 174: 661−669. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.332

中国环境监测总站. 2019. 2019 年 1 月全国城市空气质量报告 [N/OL]. China National Environmental Minitoring Centre. 2019. National Urban Air Quality Report for January 2019 [N/OL]http://www.mee.gov.cn/hjzl/dqhj/cskqzlzkyb/201906/P020190624538513817305.pdf.[2019-06-10]