

深圳中重度霾污染输送特征的数值模拟分析*

田春艳¹, 周慧娴¹, 沈傲¹, 申冲², 王明洁³, 陈训来³, 樊琦¹

1. 中山大学大气科学学院 / 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室 / 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
2. 广州市气候与农业气象中心, 广东 广州 511430
3. 深圳南方强天气研究重点实验室 / 深圳气象局, 广东 深圳 518040

摘要: 对2008—2018年深圳出现的中重度霾污染事件进行天气分析的基础上, 利用WRF-Chem模式采用敏感性试验的方法定量研究深圳及其周边城市(广州、东莞、惠州)人为排放源对深圳地区霾污染过程的贡献, 揭示该地区霾污染过程的主要输送特征。影响深圳中重度霾污染过程的主要天气型为台风外围环流型及大陆高压(脊)型两类, 其中大陆高压(脊)型又可根据风场进一步细分为3种类型: 偏东风型、风向多变型和偏南风型。典型污染个例的敏感性试验结果表明: 台风外围环流型霾污染过程深圳本地贡献率为40.38%, 其周边城市的总贡献率为22.6%; 大陆高压(脊)型3种类型污染过程, 深圳本地贡献率分别为21.12%、53.92%、55.41%, 其周边城市的总贡献率分别为6.88%、10.97%、3.44%。风速和风向对输送特征的影响最为显著: 当风速为3~4 m/s时, 深圳本地贡献率可达50%; 风速约6 m/s时, 本地贡献率降为20%~40%, 其周边城市输送的贡献率明显增大。不同城市对深圳霾污染的贡献受风向的影响有所差异, 台风外围环流型个例主导风场多为西北风, 此时东莞和惠州对深圳的贡献值分别为15.03%、1.77%; 而其他风向时, 东莞和惠州对深圳的贡献情况较为一致, 其中, 偏东风时约3%, 风向多变型时约5%, 偏南风时1%~2%。广州对深圳的贡献率仅在台风外围环流型的西北风向时较为显著, 可达5.8%。

关键词: 中重度霾污染; 输送特征; 台风外围环流型; 大陆高压(脊)型; 深圳

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 02-0038-10

Numerical simulations of transport characteristics of moderate-to-severe haze pollution in Shenzhen, China

TIAN Chunyan¹, ZHOU Huixian¹, SHEN Ao¹, SHEN Chong², WANG Mingjie³, CHEN Xunlai³, FAN Qi¹

1. School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University / Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies / Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
2. Guangzhou Climate and Agrometeorology Center, Guangzhou 511430, China
3. Shenzhen Key Laboratory of Severe Weather in South China / Shenzhen Meteorological Bureau, Shenzhen 518040, China

Abstract: Based on the analysis of weather of the moderate-to-severe haze pollution incidents in Shenzhen from 2008 to 2018, the WRF-Chem model and sensitivity tests were used to quantify the contribution of anthropogenic emission sources from Shenzhen and its surrounding cities (Guangzhou, Dong-

* 收稿日期: 2020-10-13 录用日期: 2020-11-28 网络首发日期: 2021-07-15
基金项目: 国家自然科学基金(42075181); 国家重点研发计划大气专项(2017YFC0210105, 2016YFC0203305); 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室项目(2020B1212060025)
作者简介: 田春艳(1994年生), 女; 研究方向: 大气数值模拟; E-mail: tianchy@mail2.sysu.edu.cn
通信作者: 樊琦(1977年生), 女; 研究方向: 大气数值模拟; E-mail: eesfq@mail.sysu.edu.cn

guan, and Huizhou) to the hazing process in Shenzhen using sensitivity tests, and to reveal the main transport characteristics of the hazing pollution process in the area. The main weather types affecting the process of moderate-to-severe haze pollution in Shenzhen are typhoon peripheral circulation pattern and Continental high (ridge) type, in which Continental high (ridge) type, can be further subdivided into three different types according to the wind field (north-east wind type, wind direction variable type, southerly wind type). The sensitivity tests of typical pollution cases show that under the typhoon peripheral circulation pattern during hazing pollution process, the local contribution rate of Shenzhen was 40.38%, and the total contribution rate of the surrounding cities was 22.6%. For the three types of Continental high (ridge) pollution processes, Shenzhen's local contribution rates were 21.12%, 53.92%, and 55.41%, while the total contribution rates of the surrounding cities were 6.88%, 10.97%, and 3.44%, respectively. Wind speed and orientation have the most significant impact on transport characteristics. When the wind speed was 3 to 4 m/s, the contribution rate of Shenzhen local sources can reach 50%. When the wind speed was about 6 m/s, the contribution rate of transmission increased significantly while the local contribution rate decreased to 20% to 40%. The contribution of different cities was affected by wind directions. While the dominated wind field of typhoon peripheral circulation pattern haze was mostly northwest, Dongguan and Huizhou's contribution differed, with 15.03% and 1.77%, respectively. In other scenarios, the contributions of these two cities were more consistent, about 1% to 5%. Guangzhou's contribution to Shenzhen can reach 5.8% with the north-west winds caused by the Typhoon peripheral circulation pattern.

Key words: moderate-to-severe haze pollution; transport characteristics; typhoon peripheral circulation pattern; continental high (ridge) type; Shenzhen

霾是大量极细微的干性尘埃、烟粒、盐粒等均匀地悬浮在空气中,使水平能见度 <10 km、空气普遍浑浊的天气现象^[1]。研究表明霾可通过氧化、炎症刺激对动物或人体的遗传物质产生损伤,从而对人体健康产生重要影响^[2-4]。

城市化进程导致城市霾污染现象频现。已有研究表明风速、温度、边界层高度等条件是影响霾污染的重要因素,区域输送作用亦不容忽视^[5-7]。在我国,京津冀、长三角、珠三角一直是霾污染关注的重要区域。对北京冬夏季雾霾研究表明除冬季供暖期外,在输送条件具备的前提下,北京地区夏季仍然会发生雾霾天气^[8-9]。利用二维欧拉统计、HYSPLIT和NAQPMS等模式研究^[10-13]进一步表明北京大气环境中污染主要来自北京周边地区,受地形和天气型控制,西南方向的输送通道是造成北京大气污染的主要通道,一定条件时,外来输送贡献和局地污染贡献可达相当程度。此外,利用反向轨迹法、NAQPMS及其污染源在线追踪技术研究东北地区的霾过程受到京津冀地区输送的影响^[14-16]。对上海地区的霾过程研究发现,全年霾日主要来自通过内陆的西北和西南气流将细颗粒物输送到上海,西北路径和北路径是

污染事件中的主要输送通道,在到达上海的气团轨迹中,大陆气团和海洋气团分别占总轨迹的79.6%和20.4%。影响上海的潜在源区,除长三角一带人口密集、工业、重工业和交通污染严重的地区以外,山东、河北、河南等地对于上海城区的霾污染亦有贡献,上海城区 $PM_{2.5}$ 长距离输送贡献可达 $38.4\% \pm 20\%$ ^[17-19]。对于华南地区,李婷苑^[20]利用HYSPLIT对广东霾天气输送路径进行研究,结果表明广东的霾过程主要受北路和沿海通道影响,较远城市可至江西、浙江等地。吴蒙等^[21]研究表明珠三角城市群主要聚集在狭小的区域内,导致在发生大气污染时污染物在不同城市之间会相互输送,从而造成显著的区域型污染特征。

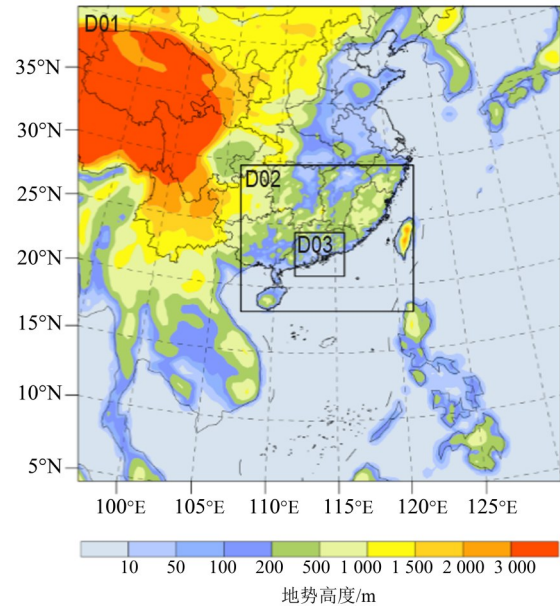
上述研究表明,无论是哪个城市,除了本地排放源影响外,区域输送都是导致城市霾污染的重要原因。深圳作为中国经济特区,是珠三角区域内的重要城市,其污染状况受到广泛关注,其霾污染同样受到自身和外来输送的重要影响。余纬等^[22]对珠三角一次重污染过程分析结果表明广州和佛山本地贡献明显,肇庆主要受输送的影响,而深圳既有本地贡献也有输送影响。张丽等^[23]利

用 HYSPLIT 模式对深圳两次霾天气过程的研究发现, 两次霾污染过程均有来自广州、东莞、惠州、河源等的污染输送。已有的研究中, 较多使用 HYSPLIT、NAQPMS 等模型进行轨迹追踪探究霾输送问题。本研究将首先对影响深圳地区近十年的中重度污染过程的天气型进行统计分析, 在此基础上结合 HYSPLIT 后向轨迹模型的结果, 采用 WRF-Chem 数值模式进行敏感性数值模拟试验, 定量计算得出深圳地区霾过程的区域输送贡献量, 从而揭示该地区不同天气形势影响下中重度霾污染过程的输送特征。

1 研究方法

1.1 模式介绍与设置

WRF-Chem (weather research and forecasting-chemistry) 模式是美国国家大气研究中心、美国大气海洋局及美国西部太平洋国家实验室等单位共同开发的新一代大气化学传输模式^[24]。目前, WRF-Chem 模式在区域气候及大气污染的数值模拟方面均有广泛的应用。本研究采用 WRF-Chem 3.6.1 版本, 模式模拟采用三重嵌套网格(图1), 水平格距分别为 45、15 和 3 km, 格点数为 99×99、106×91 和 151×136, 垂直方向设置 30 层, 模式层顶的气压为 50 hPa。模式采用的物理参数化方案包括: Lin 微物理方案, RRTM 长波辐射方案, New Goddard 短波辐射方案, MM5 Monin-Obukhov 近地层方案, Kain-Fritsch 积云对流方案(仅在第一、二重中使用), Noah 陆面过程, ACM2 边界层方案, UCM 城市冠层方案。在第三重嵌套中引入化学参数化方案有 CBMZ 大气化学机制, MOSAIC 气溶胶



D01, D02 和 D03 分别为第一、二和三重嵌套

图1 WRF-Chem 模式三重嵌套网格

Fig. 1 Three nested domain for WRF-Chem

机制, Fast-J 光解机制。模式气象初始条件和边界条件来自于 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 全球再分析资料, 化学初始边界采用 MOZART 模式全球模拟数据内插至模拟区域。第三重网格采用的人为排放源为清华大学制作的 MIX 排放清单 (<http://www.meicmodel.org/dataset-mix.html>)。本次研究霾污染个例和模拟时段见表 1, 模式 spin up 时间为 40 h。

HYSPLIT-4 模型是由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹和沉降的专业模型^[25]。该模型的平流和扩散计算采用拉格朗日法, 通常采用诊断风

表 1 2008—2018 年深圳中重度霾污染事件列表¹⁾

Table 1 List of moderate-to-severe haze pollution incidents in Shenzhen from 2008 to 2018

类型	污染个例时段	模拟时段 (世界时)
台风外围环流型	2008 年 7 月 27~28 日	2008 年 7 月 25 日 00 时~30 日 00 时
	2013 年 8 月 21 日	2013 年 8 月 19 日 00 时~23 日 00 时
	2016 年 9 月 27 日	2016 年 9 月 25 日 00 时~29 日 00 时
大陆高压(脊)型(I)	2013 年 12 月 10~14 日	2013 年 12 月 8 日 00 时~15 日 00 时
	2014 年 1 月 4 日	2014 年 1 月 2 日 00 时~6 日 00 时
大陆高压(脊)型(II)	2015 年 11 月 30~12 月 1 日	2015 年 11 月 28 日 00 时~12 月 3 日 00 时
	2018 年 1 月 22~23 日	2018 年 1 月 20 日 00 时~25 日 00 时
大陆高压(脊)型(III)	2010 年 1 月 28 日	2010 年 1 月 26 日 00 时~30 日 00 时
	2016 年 3 月 30~4 月 1 日	2016 年 3 月 28 日 00 时~4 月 3 日 00 时

1) I: 偏东北风型; II: 风向多变型; III: 偏南风型。下同。

场和边界层高度等要素, 逐一计算示踪粒子的空间位移和拉格朗日轨迹, 并进一步模拟污染物在区域内的动态扩散过程^[23]。该模型已被广泛地应用于污染物在各个地区的传输和扩散研究中。

1.2 霾污染过程的统计分析

中重度污染天气与气象条件密切相关, 是在一定的大尺度环流形势下发生的。参照李霞等^[26]和王健等^[27]污染天气环流分型方法, 普查1954—2017年深圳49个中重度霾日08:00和20:00地面天气图, 850和500 hPa高空天气图, 在考虑欧亚范围环流形势特点的基础上, 重点关注0°~40°N, 90°~120°E范围内的地面系统的演变, 并综合分析850和500 hPa高低空环流特征, 确定中重度霾日天气形势类型。按照深圳处于地面天气系统的位置及高低空影响系统的不同, 深圳中重度霾天气可分为3类: 大陆高压(脊)型、台风外围环流型、均压场型。大陆高压(脊)型最多, 接近67.4%; 其次为台风外围环流型(18.4%); 均压场型为14.3%。根据分型统计结果, 本文对2008—2018

年发生的9个中重度霾污染过程分析发现, 此期间的霾污染类型主要分为台风外围环流型和大陆高压(脊)型(表1)。其中, 3个污染过程属于台风外围环流型, 其余6个属于大陆高压(脊)型。台风外围环流型霾污染过程主要发生在夏、秋两季。图2(a)为台风外围环流型2016年9月27日霾污染事件发生时的东亚地面天气图, 代表此类型霾污染发生时的典型天气形势: 通常此类型霾污染发生时, 深圳以东的海面上有热带气旋形成, 使得深圳位于热带气旋的外围, 深圳上空存在下沉气流, 污染物的垂直扩散条件不利; 大陆高压(脊)型霾污染过程多发于冬、春季节, 此类型霾污染事件2013年12月10日发生时的典型天气形势如图2(b), 受冬季冷高压影响, 深圳地区多为静稳天气, 风速较小, 污染物的输送扩散条件不利。在通过对大陆高压(脊)型霾个例风场分析的基础上, 按主导风向将其进一步细分为3类(表1): I类偏东北风型, II类风向多变型, III类偏南风型。

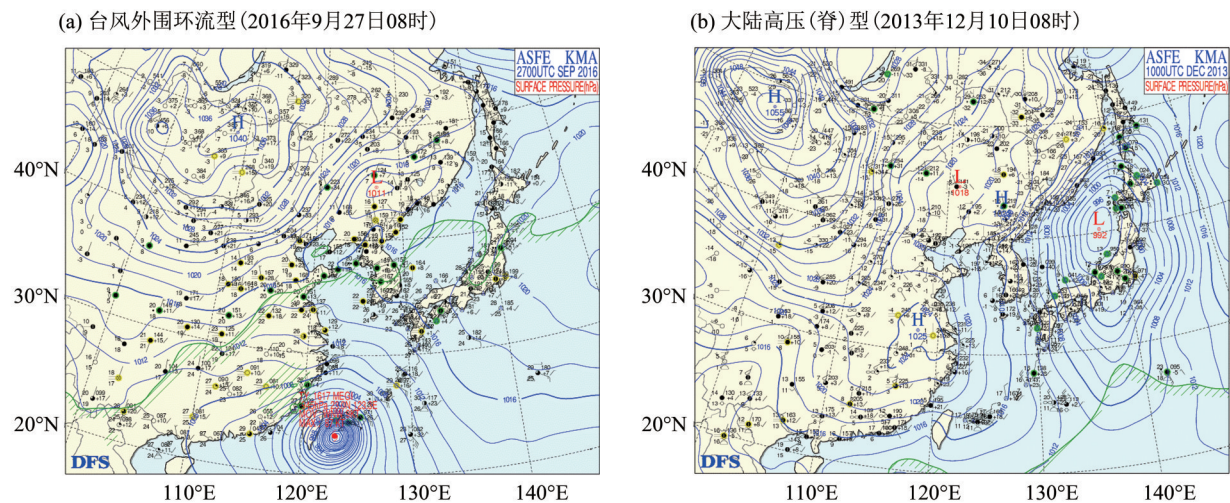


图2 台风外围环流型和大陆高压(脊)型东亚地面天气图

Fig. 2 East Asia surface weather chart of typhoon peripheral circulation pattern (a) and continental high (ridge) type (b)

1.3 模式能力评估及敏感性试验方案设置

1.3.1 模式能力评估 通过收集的珠三角地区气象和污染物浓度观测数据, 对模式模拟的9个个例的气象场和污染物结果进行模式验证, 包括平均值、偏差、均方根误差^[28]以及符合指数^[29]。从各统计量结果来看, 温度的平均值结果随季节有所变化, 但是整体模拟结果和观测接近, 偏差约2℃, 均方根误差主要约3℃, 符合指数在0.4~0.8之间; 风速的观测平均值在2~7 m/s之间, 模拟结果为2~6 m/s, 偏差绝对值在1 m/s左右, 均方

根误差约为2 m/s, 风速的符合指数相对于温度而言较低, 约为0.5。PM_{2.5}观测和模拟结果的对比表明, 观测的平均值介于40~90 μg/m³, 模式模拟的平均值为40~110 μg/m³, 偏差在20~60 μg/m³之间, 均方根误差的结果高于偏差, 符合指数较低, 约为0.3。整体而言, 模式基本能够反映出气象和污染物浓度的变化特征。

1.3.2 敏感性试验方案设置 利用HYSPLIT-4模式对表1中霾污染事件, 分别进行24 h后向轨迹模拟。模拟数据的气象背景场为美国REANALYSIS

(global, 1948—至今)数据, 初始时刻高度设为 100 m, 源点的位置为 22.55°N 和 14.09°E, 初始时间为每日的世界时 12 时。图 3(a)为台风外围环流型个例 2016 年 9 月 27 日的后向轨迹图(2008 年 7 月 27~28 日和 2013 年 8 月 21 日个例轨迹结果与其类似, 图略)。由图可知, 深圳在此类污染类型下, 污染物的输送主要是由西北方向输送为主, 主要来源城市为广州、东莞和其他较远的城市。图 3(b-d)是大陆高压(脊)型个例, 2013 年 12 月 10~14 日 I 型、2018 年 1 月 22~23 日 II 型、2016 年 3 月 30 日~4 月 1 日 III 型的后向轨迹图。由图可知, 在大陆高压(脊) I、II 类中, 污染物输送轨迹以东北方向输送为主, 主要来源城市为惠州、东莞和其他较远的城市, 在 III 类中, 污染物的输送有 3 个不同

的方向, 主要来源城市有广州、东莞、惠州和香港。综上所述, 短期内对深圳输送影响较大的城市主要是其周边城市广州、东莞和惠州。

根据上述后向轨迹结果, 利用 WRF-Chem 模式, 对深圳及其周边广州、东莞、惠州共 4 个城市设置人为排放源削减的敏感性试验研究, 以研究各周边城市对深圳霾污染过程的输送贡献。敏感性数值模拟试验设计了 5 种模拟方案: ① 基准方案, 包含所有地区的排放源; ② 削减深圳人为源, 目的为探究深圳地区排放源贡献; ③ 削减广州人为源, 为探究广州地区排放源贡献; ④ 削减东莞人为源, 为探究东莞地区排放源贡献; ⑤ 削减惠州人为源, 为探究惠州地区排放源贡献。

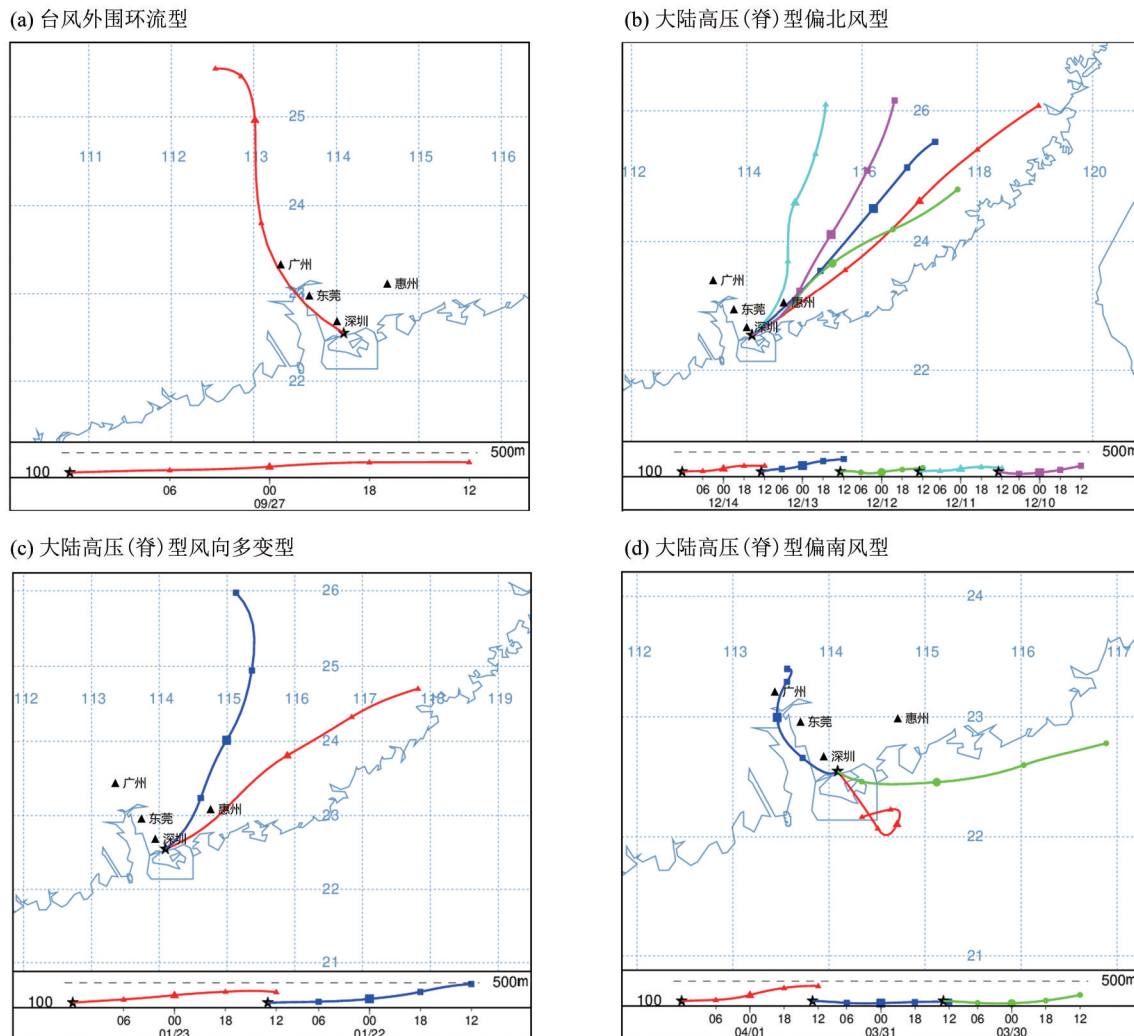


图 3 台风外围环流型和大陆高压(脊)型污染物 24 h 后向轨迹图

Fig. 3 24 h backward trajectory map of pollutants under typhoon peripheral circulation type (a); and continental high (ridge) type: (b) north-east wind type, (c) wind direction variable type and (d) southerly wind type

2 模拟结果分析

针对2008—2018年台风外围环流型和大陆高压(脊)型两类不同天气类型影响下的中重度霾污染事件,通过模式模拟的深圳及其周边城市(广州、东莞和惠州)的平均风场,结合敏感性数值试验结果,分析不同天气形势下深圳及其周边城市 $PM_{2.5}$ 的输送特征。在定性分析的基础上,对比敏感性试验和基准试验的模拟结果,将源排放城市人为源排放量分别削减为0后,将模式第一层 $PM_{2.5}$ 浓度的减少百分比定义为贡献率,即排放城市 m (即深圳、广州、东莞和惠州)对模拟区域的贡献率 $I_m = (B_{ij} - C_{ij})/B_{ij}$, B_{ij} 为未削减排放源时格点 (i, j) 处的 $PM_{2.5}$ 浓度值, C_{ij} 为削减 m 城市排放源后格点 (i, j) 的 $PM_{2.5}$ 浓度值。本文对9个中重度污染个例进行模拟,并将表1中同类型的污染个例时段结果进行平均分析。

2.1 台风外围环流型

图4为台风外围环流型4个排放城市在3个污染时段(表1)对模拟区域 $PM_{2.5}$ 浓度的平均贡献率空间分布图。由图可知,在台风外围环流型霾污染过程中,4个城市的地面风场均为偏西北风,其中深圳平均风速为6.03 m/s,在这样的风场形势下, $PM_{2.5}$ 主要由西北向东南方向输送。从具体贡献率来看,深圳的 $PM_{2.5}$ 浓度以本地贡献为主,达到40.38%;东莞与深圳接壤且位于其西北方向,其对深圳的贡献率达15.03%,广州虽位于上风向,但相隔较远,其贡献率为5.8%,惠州位于深圳的东北方向,但由于与深圳东部接壤,有一定的贡献,贡献率为1.77%。在西北风下,深圳超过一半的贡献来自这4个排放城市,对深圳的总贡献率为62.98%,其中东莞、广州和惠州3个城市的总贡献率为22.6%。

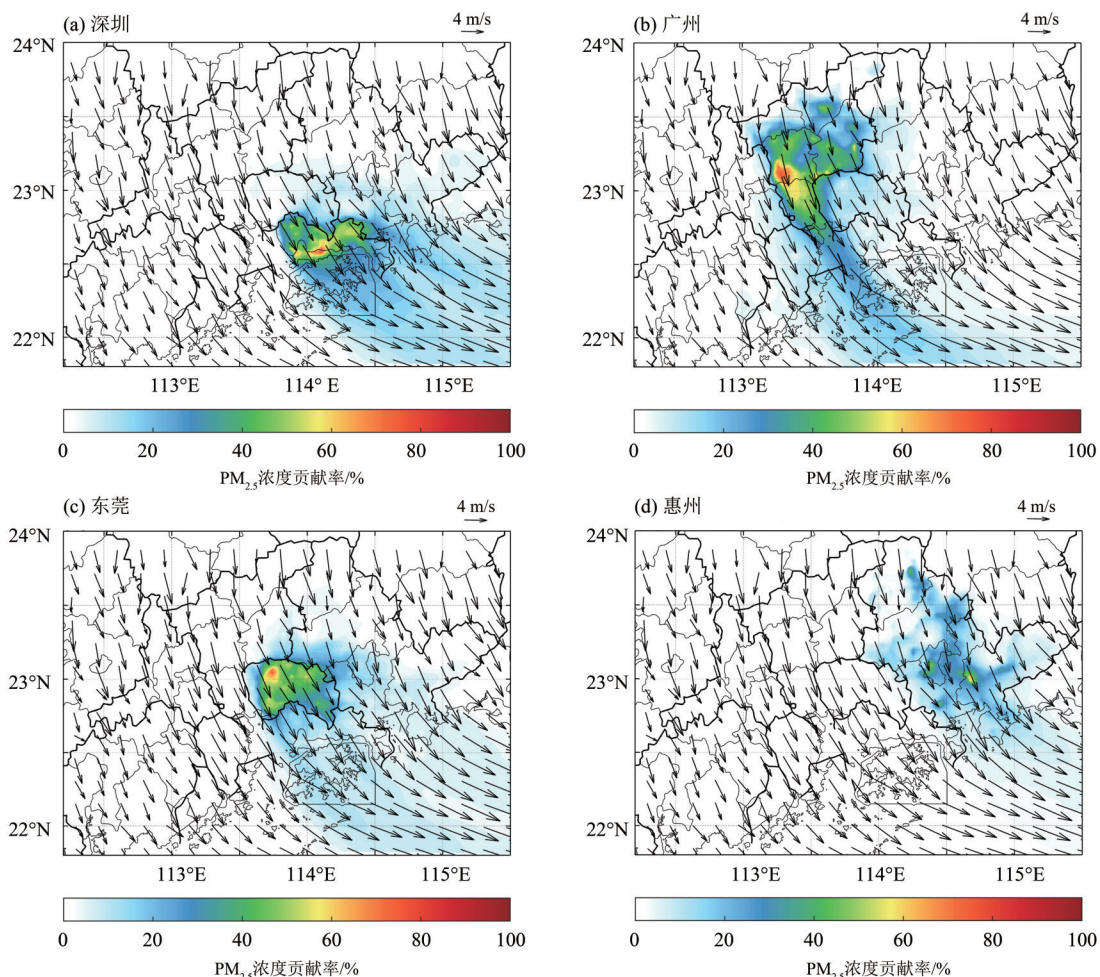


图4 台风外围环流型近地面风场下深圳及其周边城市的 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentration contribution rate (unit:%) of Shenzhen (a) and its surrounding cities including Guangzhou (b), Dongguan (c), and Huizhou (d) under the near-surface wind field of typhoon peripheral circulation pattern

进一步利用模式的结果对逐小时的输送贡献特征进行分析。对各城市行政边界内模式中每个网格点的 10 m 水平风做矢量平均, 得到 4 个城市污染时段第一日和第二日的平均风场时间序列(图 5)。污染时段各城市对深圳 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率的时间序列如图 6。结合图 5 和图 6 可知, 在第一日 04 时之前, 风向以偏西风为主且风速较弱, 深圳的 $PM_{2.5}$ 以本地贡献为主, 达 60% 以上, 其周边 3 个城市对深圳的贡献较小, 共约 10%。04 时后, 风速逐渐增加, 且风向向南偏转, 深圳 $PM_{2.5}$ 的本地贡献率逐渐降低, 其周边 3 个城市的贡献逐渐上升, 尤其以与深圳接壤且位于上风方向的东莞的贡献增加最为显著, 其周边 3 个城市的贡献在 08 时左右达到最大。深圳本地贡献最小值出现在中午 12 时左右, 而 4 个城市总贡献的最小值出现在午后, 与风速的高值时段基本对应一致, 说明风速增大, 在外来输送贡献增加的同时, 也有利于本地污染物浓度的降低。第一日 20 时至次日 08 时, 风速风向基本保持不变, 4 个城市对深圳的总贡献也基本保持不变, 随后风速增加, 总贡献再次降低。在台风外围环流型霾污染过程中, 受地理位置和风向的影响, 广州对深圳的贡献主要在西北风向时, 由于与深圳的位置较远, 其贡献低于东莞, 但高于不在深圳上风方向的惠州。

2.2 大陆高压(脊)型

结合大陆高压(脊)型各城市对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率的空间分布(图略), 在大陆高压(脊)型的 3 类霾污染过程中: 第 I 类以东北风为主, 深圳平均风速为 5.95 m/s, 4 个城市对深圳 $PM_{2.5}$ 的总贡献率约

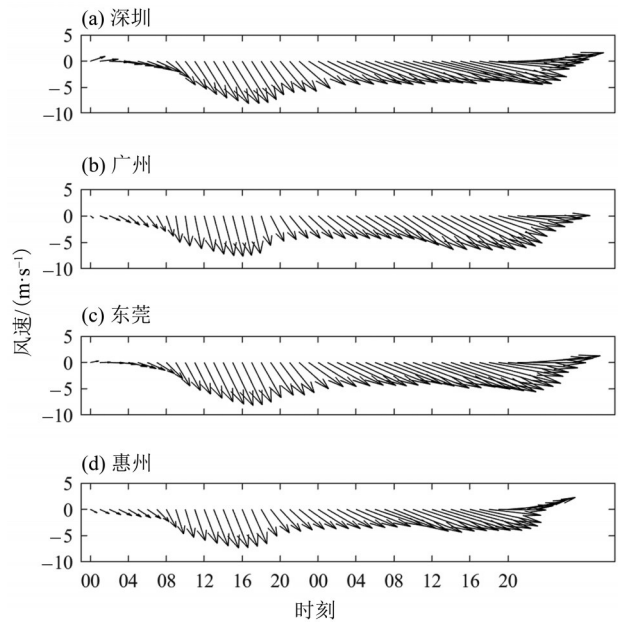


图 5 台风外围环流型深圳及其周边城市的平均 10 m 风场时间序列

Fig. 5 Time series of average 10 m wind field in Shenzhen (a) and its surrounding cities (Guangzhou (b), Dongguan (c), and Huizhou (d)) under typhoon peripheral circulation pattern

为 28%, 其中深圳本地贡献为 21.12%, 周边 3 个城市总贡献率为 6.88%。东莞和惠州在其上风方向且均与深圳有接壤, 对深圳的贡献率基本一致, 分别为 3.34% 和 3.53%。该类型的污染过程深圳及其周边城市的贡献较小, 更大范围的区域输送会起到最主要的贡献; 第 II 类风场多变型, 深圳平均风速为 4.08 m/s, 本地贡献率达到 53.92%, 其周边 3 个城市总贡献率为 10.97%, 东莞和惠州对深圳的贡献率分别上升至 5.20% 和 5.59%, 4 个

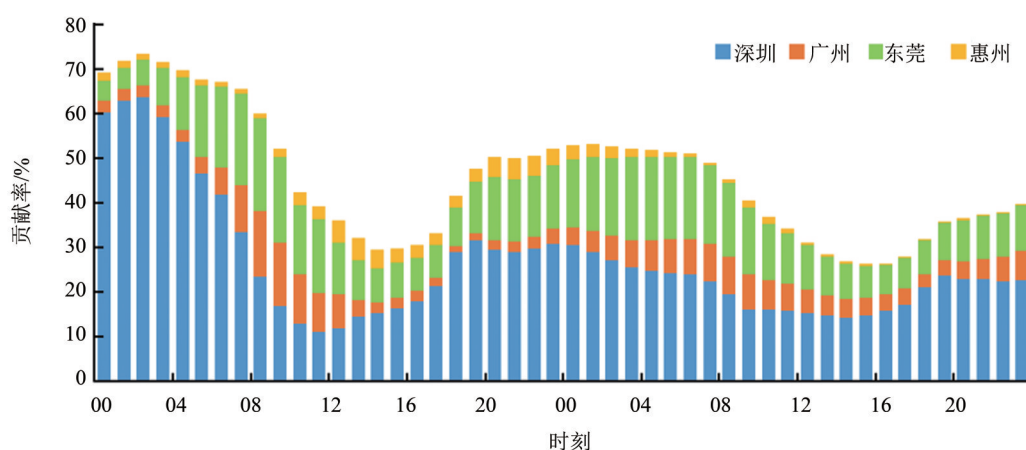


图 6 台风外围环流型深圳及其周边城市对深圳 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率的时间序列图

Fig. 6 Time series of contribution rate of Shenzhen and its surrounding cities including Guangzhou, Dongguan and Huizhou to $PM_{2.5}$ concentration in Shenzhen under typhoon peripheral circulation pattern

城市对深圳的总贡献率为 64.89%。这与刘建等^[30]对珠江三角洲典型灰霾过程的边界层特征研究结果基本一致, 风向风速变化大, 对污染物的输送和积累效果不同, 不同风向会导致不同地区的污染物输送来源, 而不同风速大小将决定污染物的输送和积累效果; 第Ⅲ类以偏南风为主, 深圳平均风速为 3.59 m/s, 风速在 3 种类型中最低, 4 个城市对深圳的总贡献率为 58.85%, 其周边 3 个城市的总贡献率仅为 3.44%。在偏南风的这类型污染过程中, 由于深圳地区上风向无大排放源城市, 深圳的 PM_{2.5} 以本地贡献为主, 为 55.41%, 东莞和惠州由于在深圳的下风方向, 对深圳的贡献在 3 类霾污染过程中最低, 但由于与深圳接壤, 对深圳仍有稍许的贡献, 分别为 2.30% 和 1.07%, 受地理位置和风向影响, 广州对深圳的贡献则微乎其微。对比大陆高压(脊)型霾污染个例可知, 东莞和惠州与深圳接壤, 对深圳的贡献基本一致, 广州距离深圳较远, 无论何种风场, 其对深圳的贡献均是最低的。4 个城市对深圳的贡献明显受到风场和地理位置的影响。

图 7 是大陆高压(脊)型霾污染过程中 4 个城市污染时段第一日和第二日平均风场的时间序列。图 8 是 4 个城市污染时段第一日和第二日对深圳 PM_{2.5} 浓度贡献率的时间序列图。结合图 7 和图 8 可知, 在大陆高压(脊)型霾污染过程中: 以东北风为主的第 I 类, 风速高值(约 7 m/s)出现在 04 时左

右, 16 时左右风速较小(约 3 m/s)。对比 4 个城市对深圳的贡献率, 在 08 时前 4 个城市的风速较为一致, 对应的 4 个城市对深圳的总贡献也基本保持一致, 约 20%; 08 时后风速逐渐增加, 对应的各城市的贡献率降低, 随后风速再次降低, 各城市贡献再次升高, 直至次日 08 时风速再次升高, 各城市贡献降低, 如此循环; 第 II 类过程风速相对于 I 类, 明显有所降低, 风向在 00~16 时以东北风为主, 且风速呈现一个先增加后减小的过程, 在 16 时左右达到最低值, 在此期间, 位于深圳上风方向的东莞、惠州对深圳有较大贡献率, 约 10%, 随着风速的增加东莞和惠州的输送增强, 深圳本地贡献降低, 16~20 时, 风向转为东南风, 东莞、惠州对深圳的贡献降低, 本地贡献增加, 随后逐渐转为偏西风, 东莞和惠州的贡献有所增加, 直到次日 08 时开始, 风场转变为偏南风, 风速呈现先增加后减小过程, 东莞和惠州的贡献率降低, 在 20 时左右基本无贡献, 本地贡献增加; 第 III 类污染过程中, 主要以偏南风为主, 08 时以前, 风向以东南风为主, 且风速较小, 以深圳本地贡献为主, 约 55%, 08 时后风向转为偏南风, 风速明显增加, 深圳本地贡献明显降低, 两日的风速最大值在正午时左右增加, 各城市贡献较低, 凌晨的风速最低, 各城市贡献较高。对比三类霾污染过程, 4 个城市中, 东莞和惠州对深圳的贡献较为一致, 广州对深圳基本无贡献。

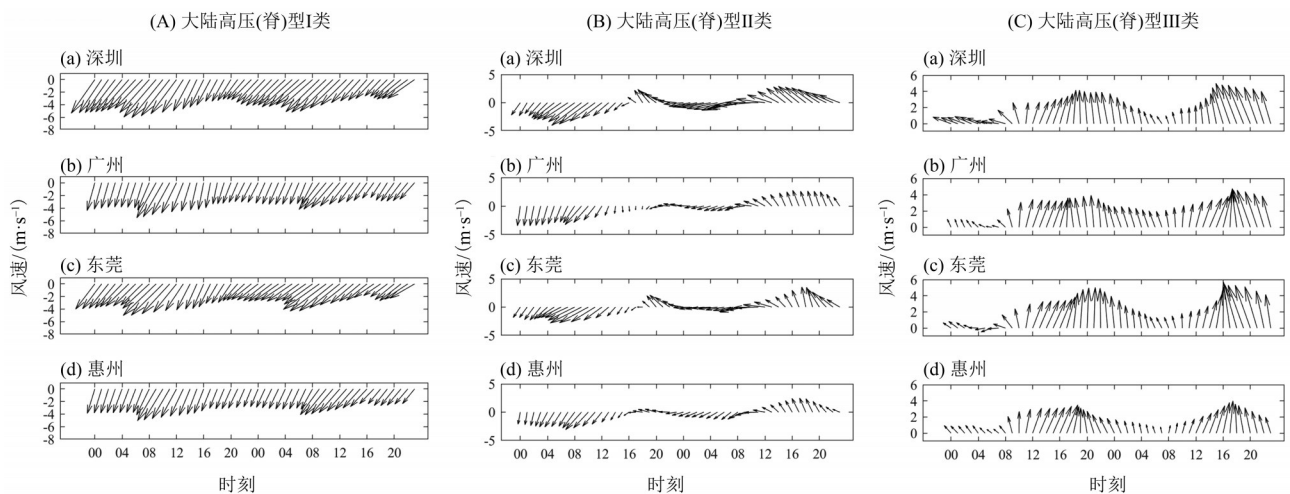


图 7 大陆高压(脊)型深圳及其周边城市的平均 10 m 风时间序列

Fig. 7 Time series of average 10 m wind field in Shenzhen (a) and its surrounding cities including Guangzhou (b), Dongguan (c), and Huizhou (d) under continental high (ridge) type

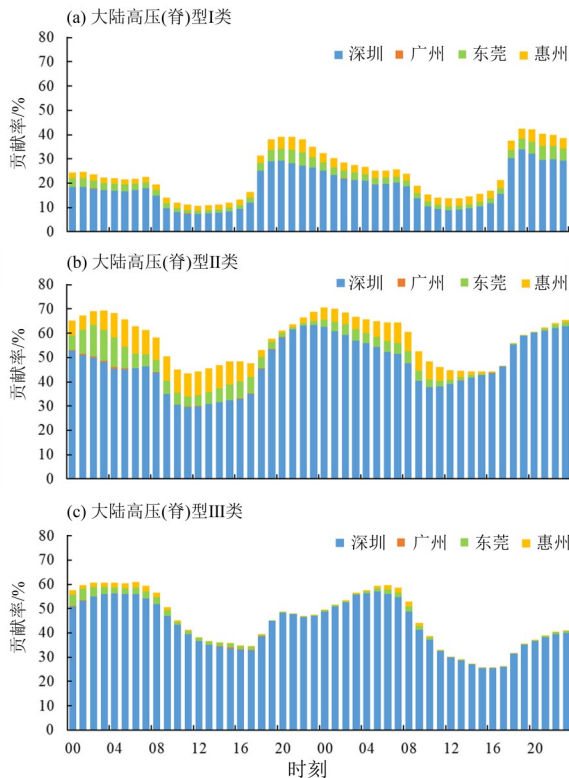


图 8 大陆高压(脊)型深圳及其周边城市对深圳 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率时间序列图

Fig. 8 Time series of contribution rate of Shenzhen and its surrounding cities (Guangzhou, Dongguan and Huizhou) to $PM_{2.5}$ concentration in Shenzhen under continental high (ridge) type

3 结 论

利用 WRF-Chem 模式设置深圳及其周边城市(广州、东莞、惠州)排放源对深圳霾污染输送影响的敏感性试验,以揭示在台风外围环流型和大陆高压(脊)型霾污染下,深圳及其周边城市(广州、东莞、惠州)城市对深圳霾污染输送贡献特征。通过对 4 个城市风场及贡献率的分析得以下

结论:

1) 台风外围环流型霾污染风场为弱西风转西北风,广州和东莞位于深圳上风方向,对深圳霾污染的贡献率较大,分别为 5.8%、15.03%,惠州在其下风方向,贡献率较小为 1.77%。大陆高压(脊)型霾污染风向分 I 类东北风型,东莞和惠州在其上风方向,有一定贡献,约 3%,广州不在其上风方向,基本无影响; II 类为风向多变型,广州由于距离较远,风速较小,输送贡献率小,东莞和惠州对深圳有一定贡献,约 5%; III 类为偏南风型,各城市均不在其上风方向,对深圳基本无影响。

2) 深圳霾污染过程受到外来输送贡献影响,但以本地贡献为主,其中,台风外围环流型本地贡献率为 40.38%,其周边 3 个城市总贡献率为 22.6%,大陆高压(脊)型 3 种类型本地贡献率分别为 21.12%、53.92%、55.41%,其周边 3 个城市的总贡献率分别为 6.88%、10.97%、3.44%。

3) 不同城市对深圳霾污染的贡献率受风向的影响有所差异,西北风向时,广州对深圳的贡献率较显著,为 5.8%,而其他风向下,其贡献值低于 0.2%。东莞和惠州由于与深圳有接壤,各风速下均有贡献,但不同风向贡献值有所差异,台风外围环流型西北风向下,东莞和惠州的贡献值分别为 15.03%、1.77%;而其他风向下,东莞和惠州对深圳的贡献情况较为一致,其中,东北风向下约 3%,风向多变情况下约 5%,偏南风时 1%~2%。

4) 风速为 3~4 m/s 时,输送对深圳贡献小,深圳本地源贡献率较大,约 50%,4 个城市总贡献率增加,约 60%;风速约 6 m/s 时,输送贡献增大,本地贡献有所减小,约 20%~40%,4 个城市总贡献率为 20%~60%。

参考文献:

- [1] 中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 1979: 22-27.
- [2] 方叠. 中国主要城市空气污染对人群健康的影响研究[D]. 南京:南京大学, 2014.
- [3] 谢鹏, 刘晓云, 刘兆荣, 等. 珠江三角洲地区大气污染对人群健康的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(7): 997-1003.
- [4] 孙维哲, 王焱, 唐小哲, 等. 雾霾对人群健康效应研究: 现状与建议[J]. 中国公共卫生管理, 2016, 32(2): 166-169.
- [5] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008(1): 1-9.
- [6] 范绍佳, 祝薇, 王安宇, 等. 珠江三角洲地区边界层气象特征研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005(1): 99-102.
- [7] 刘厚凤, 杨欣, 陈义珍, 等. 中国重霾过程污染气象研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1917-1922.
- [8] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区秋冬季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2031-2044.

- [9] 王自发,李丽娜,吴其重,等. 区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究[J]. 自然杂志,2008(4):194-198+247-248.
- [10] LI H, DUAN F K, MA Y L, et al. Case study of spring haze in Beijing: characteristics, formation processes, secondary transition, and regional transportation [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 544-554.
- [11] 张志刚,高庆先,韩雪琴,等. 中国华北区域城市间污染物输送研究[J]. 环境科学研究,2004(1):14-20.
- [12] 陈朝晖,程水源,苏福庆,等. 华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析[J]. 环境科学研究,2008(1):17-21.
- [13] 王自发,李杰,王哲,等. 2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(1):3-14.
- [14] 唐娴,王喜全,洪也,等. 辽宁中部城市群一次灰霾天气过程的外来影响程度研究[J]. 环境科学学报,2014,34(6):1541-1550.
- [15] 洪也,马雁军,王喜全,等. 辽宁中部城市群灰霾天气的外来影响——个案分析[J]. 环境科学学报,2013,33(8):2115-2122.
- [16] 王喜全,杨婷,王自发. 灰霾污染的跨控制区影响——一次京津冀与东北地区灰霾污染个案分析[J]. 气候与环境研究,2011,16(6):690-696.
- [17] ZHUANG Z Y, SHU J. Study on the characteristics and influence factors of the haze in Shanghai [C]// *World Automation Congress*, 2012: 1-5
- [18] 李莉,蔡蓓琳,周敏. 2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. 环境科学,2015,36(7):2327-2336.
- [19] 安静宇,李莉,黄成,等. 2013年1月中国东部地区重污染过程中上海市细颗粒物的来源追踪模拟研究[J]. 环境科学学报,2014,34(10):2635-2644.
- [20] 李婷苑. 广东省灰霾天气输送路径及垂直交换特征 [C]//中国环境科学学会科学技术年会. 合肥,2018:53-69.
- [21] 吴蒙,范绍佳,吴兑,等. 广州地区近十年来霾天气近地层流场特征研究[J]. 环境科学与技术,2014,37(5):82-88+98.
- [22] 余纬,罗栩羽,范绍佳,等. 珠三角一次重空气污染过程特征分析及数值模拟[J]. 环境科学研究,2011,24(6):645-653.
- [23] 张丽,施何俊,李磊,等. 深圳两次霾天气过程分析 [J]. 广州环境科学,2011,26(3):10-13.
- [24] GRELL G A, PECKHAM S E, SCHMITZ R, et al. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(37). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.
- [25] XU X, AKHTAR U S. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(203). DOI:10.5194/acp-10-7073-2010.
- [26] 李霞,杨静,麻军,等. 乌鲁木齐重污染日的天气分型和边界层结构特征研究[J]. 高原气象,2012,31(5):1414-1423.
- [27] 王健,李景林,张月华. 乌鲁木齐市冬季严重污染日的环流分型特征[J]. 气象与环境学报,2013,29(1):28-32.
- [28] 蓝静. 珠三角区域气溶胶污染及低能见度过程的数值模拟[D]. 广州:中山大学,2013.
- [29] 刘新峰,袁惠,杨军,等. 统计分析方法在大气环境监测数据符合性分析中的应用探讨[J]. 四川环境,2012,31(2):36-39.
- [30] 刘建,范绍佳,吴兑,等. 珠江三角洲典型灰霾过程的边界层特征[J]. 中国环境科学,2015,35(6):1664-1674.

(责任编辑 秦社彩)