

长江三角洲地区大气污染物输送规律研究

王艳¹, 柴发合^{1*}, 王永红^{1,2}, 刘敏³

(1. 中国环境科学研究院城市与区域大气环境研究基地, 北京 100012; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 3. 泰安市环境保护科学研究所, 泰安 271000)

摘要:采用 NCEP 全球再分析资料运行 MM5 获得研究区域 2004 年代表月份的气象场模拟结果, 运用 HYSPLIT4.8 模式, 计算代表城市的后向及前向气流轨迹. 结果表明, 不同季节, 气流轨迹的分布差异明显, 影响范围各不相同. 影响长三角地区低层大气的输送气流主要来源于蒙古、华北或东北地区, 途径黄海海域或东部沿海的山东、江苏或上海等地抵达长三角地区. 受夏季西南季风的影响, 西南方向也是比较重要的输送途径. 长江三角洲地区对外界的中尺度污染传输主要受东亚季风活动的影响, 其中冬季季风是长三角污染物向华南和西太平洋地区传输的一个主要机制; 影响长三角污染物输送的重要系统还包括春夏控制我国东部沿海地区的西太平洋副热带反气旋环流, 该系统主要向西影响我国内陆地区.

关键词:长江三角洲; 大气污染物; 输送规律; 气流轨迹

中图分类号: X169 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)05-1430-06

Transport Characteristics of Air Pollutants over the Yangtze Delta

WANG Yan¹, CHAI Fa-he¹, WANG Yong-hong^{1,2}, LIU Ming³

(1. Innovation Base of Urban & Regional Atmospheric Environmental Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Taian Research and Protection Institute of Environmental Sciences, Taian 271000, China)

Abstract: Meteorological field of January, April, July and October in 2004 was obtained by running MM5 with NCEP datasets. Then we used HYSPLIT 4.8 model to calculate the backward and forward trajectories of representative cities. Distributions of trajectories and the affected areas vary with seasons. Transport current affecting Yangtze River Delta is mainly from Mongolia, North China or Northeast region, via Yellow Sea area, Shandong, Jiangsu province or Shanghai. Another important transport path is current from southwest because of the Southwest monsoon. A movement of East Asia monsoon plays an important part in the mesoscale transport of pollutants in Yangtze Delta. Winter monsoon is a main mechanism which moves the air pollutants in Yangtze Delta to South China and West Pacific ocean. Another important transport system is the subtropical anticyclone over the western Pacific Ocean which controls the east coast of our country in spring and summer. This circulation system mainly affects the inland area of our country.

Key words: Yangtze Delta; air pollutants; transport characteristics; current trajectory

大气污染是一个区域性的环境问题, 痕量气体、气溶胶、酸雨等物质交换输送时空分布的显著变动, 影响到局地气候、环境与灾害的变异, 关系到社会经济与生态环境间相互作用的良性循环以及与自然环境的协调发展^[1]. 在以往的研究中, 可以通过排放清单^[2]、地面监测^[3~5]、航测^[6, 7]、卫星遥感^[8]、气象场分析^[9]、模型模拟^[10~14]等多种研究手段分析区域大气污染物的输送规律. 其中, 数值模拟作为一种综合性很强的研究工具, 能够较好地反映气流及污染物的传输特征, 被广泛应用于区域大气污染的研究中^[15~17]. 特别是运用中尺度模式 MM5 的模拟结果计算的高分辨率气流轨迹, 可以很好地研究区域中尺度传输路径^[18].

长江三角洲是我国东部沿海经济最发达、人口最密集的地区. 在偏北风的背景下, 长三角地区西、南部高的地形结构将抑制北来污染物继续向南输

送, 导致空气污染物在长三角地区的“迁移”过程减速或短期的“堆积”现象. 此外, 在盛行风的输送作用下, 长三角地区密集的电厂分布也会对下风向城市和地区空气质量造成影响. 本研究以 MM5 气象场模拟为基础, 利用 HYSPLIT4 轨迹模式, 初步探讨了长江三角洲城市群地区大气污染物的输送规律, 并根据轨迹线对其污染的可能来源作了分析, 以期改善区域大气环境、控制周边源影响提供决策帮助.

1 研究方法与资料来源

1.1 研究方法

MM5 把全球数据同化系统获取的粗网格上的

收稿日期: 2007-09-10; 修订日期: 2007-11-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB410811)

作者简介: 王艳(1982~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气数值模拟, E-mail: kristen213@126.com

* 通讯联系人, E-mail: chaifh@craes.org.cn

各种资料内插到中尺度网格上获得初始场和边界值,计算得到反映区域尺度特征的三维流场.模式的原理和具体方法参见文献[1, 19, 20].

轨迹计算模式采用 HYSPLIT4.8(2006 年 6 月更新)模式,需要的气象变量至少包括:地面 u, v 风量、气温、高度或气压,以及地面气压,湿度和垂直速度可选.垂直运动的计算依赖于垂直坐标系的定义.模式采用诊断风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,从大量粒子的空间分布了解实际大气的扩散状况,并进一步模拟污染物在区域内的动态扩散过程^[21, 22].模式平流计算中的空气团运动轨迹是空气团被风输送时移动位置的时间综合.空气团被风的被动输送是通过空气团初始位置的三维速率向量 $P(t)$ 和它第一猜值位置的三维速率向量 $P'(t + \Delta t)$ 的平均计算得到的.速率向量则分别进行时间和空间内插.第一猜值位置为:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t$$

最终位置为:
$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]\Delta t$$
式中 Δt 为时间步长,要求 $\Delta t < 0.75$ 格距/ $U_{\max}, U_{\max}$ 为最大风速,也即一个时间步长内气团的移动不超过 0.75 个格距, $U_{\max}\Delta t < 0.75$. 以下各时间步长依此类推,这样,气块的轨迹就为气块在空间和时间上的位置矢量的积分.

由于本研究主要考虑中尺度扩散过程的作用和影响,故不考虑具体的排放物质及干湿沉积因素,仅以理想化被动示踪粒子模拟从模式区域排放的大气污染物的扩散情况.追踪轨迹所使用的大气三维运动资料由中尺度数值模式 MM5 的模拟输出经 HYSPLIT4.8 中 Meteorology 模块的 convert 程序转化后提供.

1.2 研究范围及网格界定

长江三角洲是在自然和经济方面都具有明显特征和界线的地域,总体以上海为龙头,苏浙为两翼,其范围包括上海、南京、杭州、苏州、无锡、常州、镇江、泰州、扬州、南通、宁波、湖州、嘉兴、绍兴、舟山、台州等共计 16 个城市,总面积约 10 万 km².

模拟采用四层网格嵌套,如图 1 所示.第 1 层网格覆盖东亚地区(D01),第 2 层网格覆盖中国东部地区(D02),第 3 层网格覆盖华东地区(D03),第 4 层网格覆盖江苏省、浙江省及上海在内的长江三角洲地区以及安徽、江西等省的部分地区(D04).格距分别为 81、27、9 和 3 km.

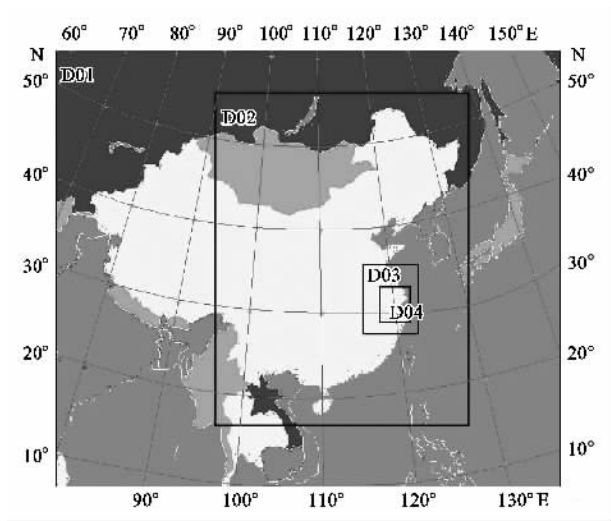


图 1 模拟区域
Fig.1 Modeling domain

1.3 资料来源

MM5 初始场采用美国国家环境预报中心(NCEP)的全球再分析资料,水平分辨率为 2.5° × 2.5°,每日共 4 个时次:00:00、06:00、12:00、18:00 时.地形和地表类型数据采用美国地质调查局(USGS)的全球数据.模式第 1 层采用单向嵌套,其他为双向嵌套,层顶取为 100 mb,垂直方向分为 23 个 σ 层,输出要素则包括地面气压、温度、地面 u, v 风分量.地形高度和相对湿度等在内的地面要素场以及水平、垂直风场,高度等在内的高空要素场每天 24 个时次的资料.

2 结果与分析

2.1 外地源对长江三角洲地区污染物输送轨迹模拟

为了探询周边地区“外源”输入对长江三角洲地区的影响,选取杭州作为长三角区域的代表城市进行后向气流轨迹的计算,以发现外地源对长江三角洲地区的污染物输送轨迹.

2.1.1 后向气流轨迹计算方法

后向轨迹模式以选定位置(接受点)为基点,计算气团到达该位置的轨迹,然后沿轨迹计算气团一路上经过哪些污染源,直到到达该选定位置.后向轨迹模式能较清晰地说明各个污染源和受体之间的关系,但不能模拟扩散过程.

由于轨迹模式计算污染物长距离输送所需的时间尺度较长,所以采用较粗分辨率的第 2 层网格资料.该资料水平分辨率为 27 km,每日 24 个时次(世界时),垂直网格为 23 层.

使用该气象资料,运行 HYSPLIT4.8 模式计算杭

州市 2004 年 1、4、7、10 月份每日 4 次(6 h 间隔)的后向气流轨迹.轨迹起始点位于地面以上 300 m,由该点后推区域范围内,1 月中每 h 气团所在的三维空间位置.本研究轨迹计算中所采用的垂直运动算法直接使用 MM5 输出结果中的垂直速度场来计算,也就是三维轨迹方法.关于轨迹计算起始点的高度,这里选择 300 m 是因为该高度层代表了边界层低层的情况,用这样高度的轨迹来分析地面的污染指数较

为合理^[18].
2.1.2 外地源对长江三角洲地区污染物输送轨迹模拟
根据上述方法计算得到了 2004 年 1、4、7、10 月份杭州市(120.19°E,30.26°N)的后向气流轨迹,以便对长江三角洲低层大气气团主要来源的气流输送特征进行分析.计算结果如图 2 所示,从中可以清楚地看出长三角地区边界层低层大气气流的主要源地.

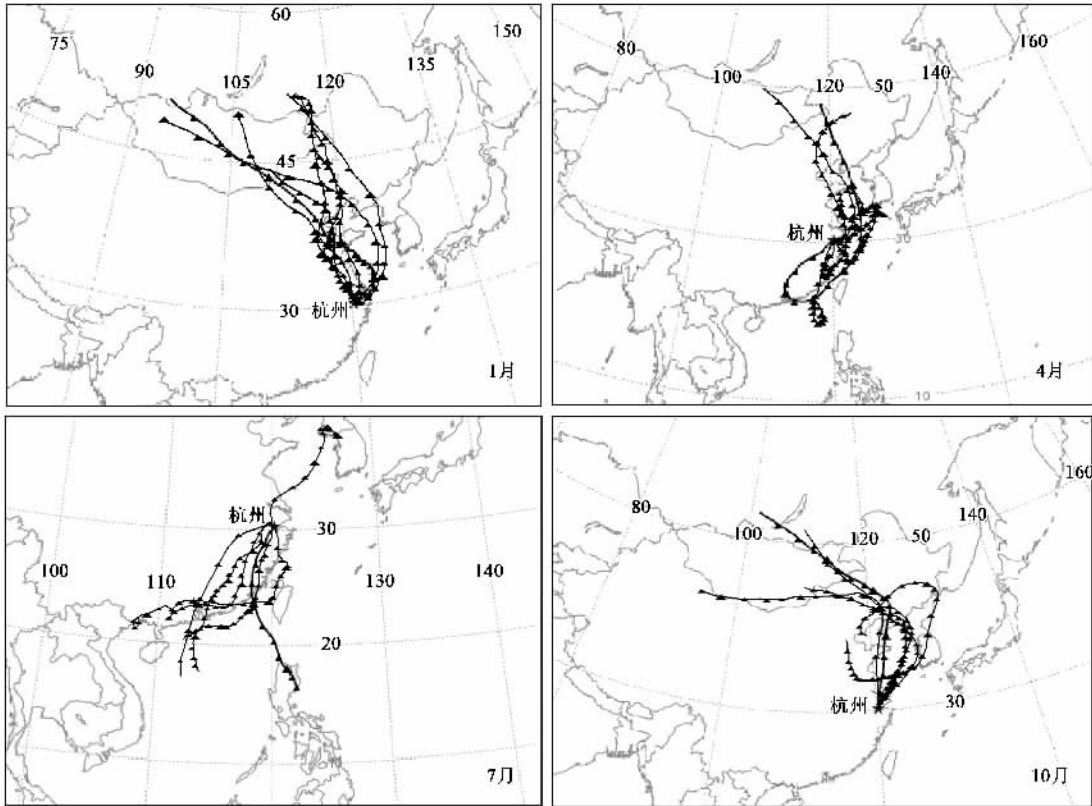


图 2 杭州市不同季节 300 m 轨迹分布
Fig. 2 Distribution map of 300 m trajectories of Hangzhou in different seasons

为了解长三角地区月际输送特征的变化,图 2 中列出了 4 个季节杭州市的低层大气输送路径分布.由图 2 可知,对于长三角区域来说,1~4 月份,由于大陆高压的影响,影响该地区的气团性质比较接近,均是源自于北亚大陆中心,途经华北的京津唐地区,沿东部沿海省份抵达杭州;其中,4 月份还有一条重要的输送路径,即西南输送气流,受西太平洋反气旋环流的影响,气团经东海海面、台湾海峡、福建或广东省由西南或南面进入杭州;而 7 月,则基本为西南和东南季风所控制,相对来说气团是比较干洁的海洋性空气,所以长三角区域各城市空气质量状况良好;10 月,主要是夏季风逐步向冬季风转变

的过渡时期,输送特征与 1 月相近,但路径更偏向东部,经由东海海面抵达杭州.
总的来看,低层大气的最主要来源是气团经蒙古、华北或东北,途径黄海海域或东部沿海的山东、江苏或上海等地而抵达杭州的,这主要是对应着整个冬季时段亚洲大陆高压所造成的反气旋性环流输送特征;除此以外,西南方向也是比较重要的输送途径,这主要与夏季的西南季风有关.
2.2 污染物中尺度输送轨迹模拟
除长距离传输外,中尺度的输送对区域空气质量也有着非常重要的影响,不同的中尺度输送条件可造成很大差异的污染情况.因此,为了更好地反映

长江三角洲地区大气污染物排放对外界的中尺度输送影响,选取电厂排放作为主要研究对象,在研究区域电厂集中分布区选取 3 个代表城市——南京、上海以及杭州进行气流中尺度轨迹计算。

2.2.1 前向气流轨迹计算方法

前向轨迹从污染源出发计算轨迹,然后沿轨迹模拟该污染源排放的污染物通过输送扩散过程对计算区域空气污染的影响。考虑到区域尺度或中尺度的输送一般 $< 1\,000\text{ km}$,在边界层内的传输时间约需 $2\sim 3\text{ d}$ ^[18],所以本研究计算了每个城市前推 72 h 的气流前向轨迹。

研究主要考虑长三角区域气流输送对周边城市空气质量的影响,因此在选择模拟时间时,重点考虑长三角地区城市污染指数较高、重污染天数较多的冬、春、秋季进行模拟计算,选取 1、4、10 月份作为各季代表月,每日 4 次,即 6 h 时间间隔。

由 MM5 模拟结果可知,600 m 以下风向随高度变化较明显,600 m 以上风向随高度变化不大。以往的研究表明,一般城市建筑群上空(320 m)为大尺度远距离输送,即大气污染周边源影响显著区,城市近地层低层则为大气污染近郊输送影响区^[23]。电厂烟囱高度多为 240 m 左右,考虑抬升后烟气排放高度大致为烟囱高度的 2 倍,因此选取地面以上 500 m,代表电厂排放污染物的低层主要输送层进行研究。这 3 个月主要的天气特征如下:1 月,华东地区气象条件的主要特征是较为频繁的冷锋的影响;4 月,冷锋活动有所减少但海洋性气团开始影响华东地区,尤其是在 4 月的下半月,从平均情况来看,由于大陆高压的影响,华东地区主要是受反气旋环流影响;10 月,该地区则开始受我国大陆东部地区极地变性高压反气旋环流影响,盛行东北风。

2.2.2 长江三角洲污染物对外地输送轨迹模拟

根据上述方法计算得到了 2004 年 1、4、10 月份杭州市(120.19°E, 30.26°N)、南京市(118.78°E, 32.04°N)和上海市(121.48°E, 31.22°N)72 h 一次的前向气流轨迹,如图 3 所示。

由图 3 可见,1 月份,伴随着冷空气的东移南下,长三角区域气团主要是由西北向东南方向延伸,然后沿海岸线折向西南方。1 月上半月,气流轨迹呈顺时针旋转,可将这一时期的中尺度气流输送途径分为 3 类:一类影响 30°N 附近的海面,另一类输送距离较远,沿海岸线,影响台湾海峡、南海海面及海南,最后一类向西南影响 30°N 纬线圈南北的内陆地区,此时,由于污染物的输送,可对下风向内陆地区

空气质量产生较大影响。1 月下半月,各城市前向轨迹的分布趋势较为一致,南京、杭州影响范围大致在浙江、福建、台湾海峡及南海海面一线,其中,南京市一条前向轨迹向内陆影响安徽、湖北、湖南直到广西省境内,造成内陆地区空气污染物的大范围传播。而上海输出气团则主要影响东海及台湾以东海面。

4 月全月,轨迹输送方向变化较大,且影响范围较 1 月份变化显著,主要表现在:4 月上半月,受残余冷锋影响,仍存在一条向南沿海岸线的较长距离输送轨迹,而大部分时间,由于受海上西太平洋反气旋环流影响,为向西、向北和东北方向的气流轨迹;此时的影响范围主要为 110°~130°E、30°~40°N 之间的区域,向西,影响江苏、安徽、湖北以及陕西、四川的部分地区,向北影响山东半岛、渤海海域。4 月下半月,随着反气旋环流的加强和北方冷空气势力的减弱,向南的轨迹变短,而偏北方向的气流轨迹明显变长,尤其是西北方向和东北方向,长三角区域排放的电厂污染物已转而影响北方地区。

10 月份,轨迹分布与 1 月相似,长三角区域主要受东北气流影响,此时,南京、杭州、上海输出的气流轨迹覆盖了整个东南沿海地区,向南可达海南岛以南海面,整体来看,10 月下半月影响范围更广,其中,上海输出气流西线经过江西、湖南、广西等省,东线气流则可达到台湾岛以东地区。

总的来看,不同季节,气流轨迹的分布差异明显,影响范围各不相同。东亚季风的活动对长江三角洲地区污染物的中尺度传输有着非常重要的影响,其中冬季季风是长三角污染物向华南和西太平洋地区传输的一个主要机制,而冬季风的活动在中尺度上的主要表现是造成频繁的冷锋活动^[24]。由于冷锋伴随着大风出现在冷高压的前沿迅速南下,穿过华北平原,较强时可以抵达华南地区甚至南海。这种强度较大、范围较广的天气系统,可以通过迅速的水平输送和垂直抬升造成亚洲大陆对流层低层较大范围空气污染物的长距离输送和再分布。其次,影响长三角污染物输送的重要系统还包括春夏控制我国东部沿海地区的西太平洋副热带反气旋环流,该系统主要影响我国西部内陆地区。

3 结论

采用 MM5 数值模拟结果结合 HYSPLIT4.8 模式,计算分析了 2004 年代表月份、长江三角洲地区气流的水平输送特征,通过后向及前向气流轨迹的计算,结果表明,影响长三角地区低层大气的输送气

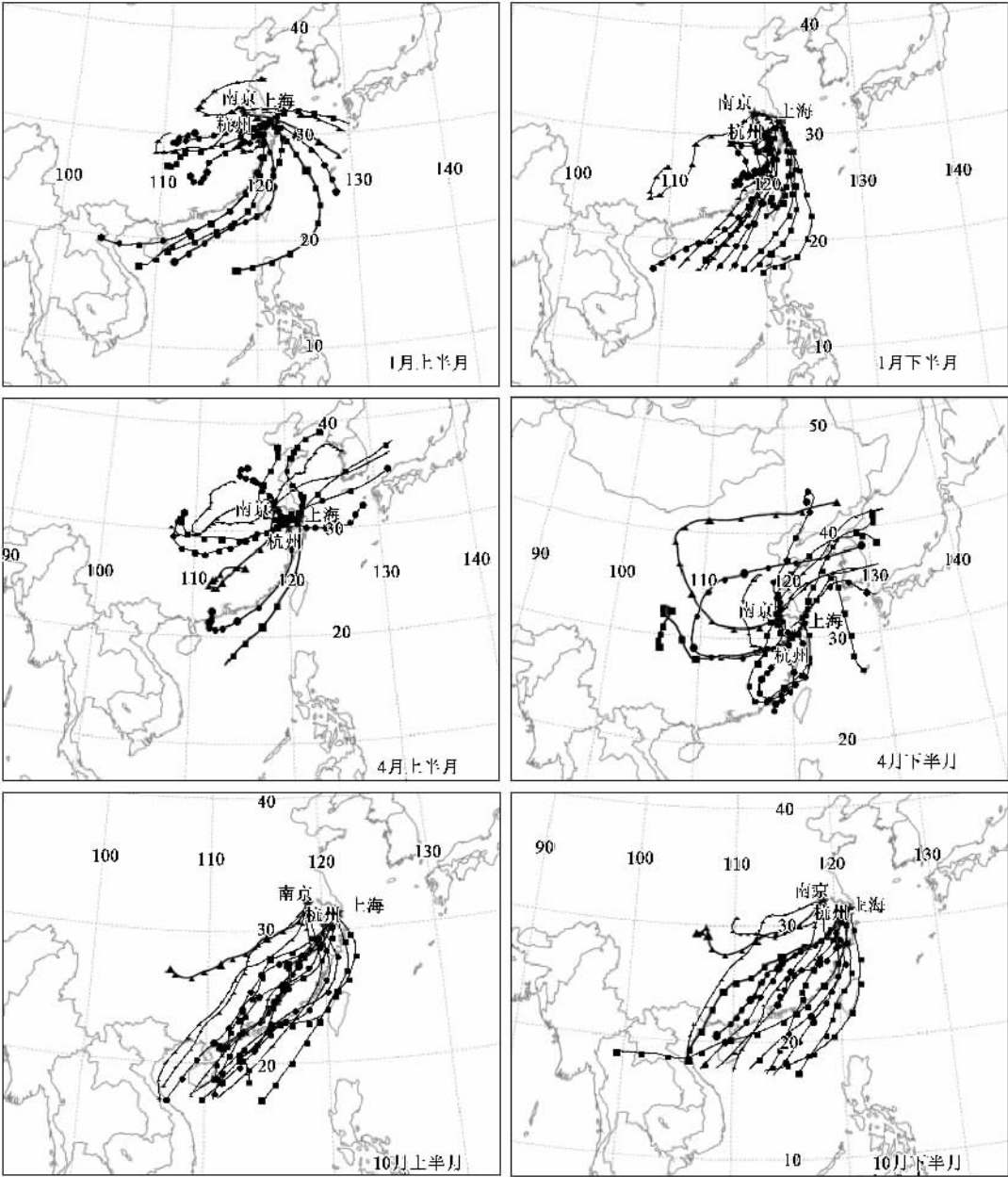


图 3 2004 年 1、4、10 月份前向 500 m 轨迹分布

Fig.3 Distribution map of 500 m forward trajectories in different seasons in 2004

流主要来源于蒙古、华北或东北地区,西南方向也是比较重要的输送途径,而长江三角洲地区对外界的中尺度污染传输主要受东亚季风活动的影响,其中冬季季风是长三角污染物向华南和西太平洋地区传输的一个主要机制;影响长三角污染物输送的重要系统还包括春夏控制我国东部沿海地区的西太平洋副热带反气旋环流,该系统主要影响我国内陆地区.

参考文献:

[1] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究[M]. 北京:气象出版社,2004.294-296.

[2] Carmichael G R, Streets D G, Calor G, *et al.* Changing trends in sulfur emissions in Asia: Implications for acid deposition, air pollution, and climate[J]. *Environment Science Technology*, 2002, **36**(22): 4707-4713.

[3] Shungo K, Yoshizumi K, Ryunosuke I, *et al.* Transport of atmospheric carbon monoxide, ozone, and hydrocarbons from Chinese coast to Okinawa island in the Western Pacific during winter[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 2975-2981.

[4] 马雁军,崔劲松,刘晓海,等. 1987-2002 年辽宁中部城市群大气污染物变化特征分析[J]. *高原气象*, 2005, **24**(3): 428-435.

[5] 刘新民,邵敏,曾立民,等. 珠江三角洲地区气溶胶中含碳物质的研究[J]. *环境科学*, 2002, **23**(增刊): 54-59.

[6] Rosenthal J S, Helvey R A, Battalino T E, *et al.* Ozone transport by mesoscale and diurnal wind circulations across southern California [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(Supplement No.2): S51-S71.

[7] Kim B G, Han J S, Park S U. Transport of SO₂ and aerosol over the Yellow sea[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(4):727-737.

[8] Liu Y, Sarnat J A, Kilaru V, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} in the eastern United States using satellite remote sensing [J]. *Environment Science Technology*, 2005, **39**(9):3269-3278.

[9] 苏福庆,高庆先,张志刚,等. 北京边界层外来污染物输送通道[J]. *环境科学研究*,2004, **17**(1):26-40.

[10] 安兴琴,左洪超,吕世华,等. Models-3 空气质量模式对兰州市污染物输送的模拟[J]. *高原气象*,2005, **24**(5):748-756.

[11] Chang K H, Jeng F T, Tsai Y L, *et al.* Modeling of long-range transport on Taiwan's acid deposition under different weather conditions[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 3281-3295.

[12] Zunckel M, Koosailee A, Yarwood G, *et al.* Modelled surface ozone over southern Africa during the Cross Border Air Pollution Impact Assessment Project [J]. *Environmental Modelling & Software*,2006, **21**:911-924.

[13] Schmitz R. Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile [J]. *Atmospheric Environment*,2005, **39**:2035-2047.

[14] Brandt J, Christensen J H, Frohn L M, *et al.* Numerical modelling of transport, dispersion, and deposition-validation against ETEX-1, ETEX-2 and Chernobyl[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2000, **15**:521-531.

[15] 黄健,颜鹏,ROLAND R D.利用 HYSPLIT_4 模式分析珠海地面 SO₂ 浓度的变化规律[J]. *热带气象学报*,2002, **18**(4):407-413.

[16] 梁永志,李崇德,刘绍臣,等. 北台湾地区长程传输气胶化学特性[J]. *干旱区资源与环境*,2004, **18**(1):157-161.

[17] 郑永光,朱佩君,陈尊裕,等. 东南亚地区生物体燃烧影响华南地区对流层臭氧垂直分布的个例分析[J]. *地球物理学报*, 2004, **47**(5):767-775.

[18] 丁爱军.东亚地区低层空气污染物变化特征与输送规律研究 [D]. 南京:南京大学,2004. 61-63.

[19] Juneng L, Tangang F T, Reason C J, *et al.* Simulation of tropical cyclone Vamei (2001) using the PSU/NCAR MM5 model [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, **97**(1-4):273-290.

[20] Srinivas C V, Venkatesan D V, Bhaskar Rao D V, *et al.* Numerical Simulation of Andhra Severe Cyclone (2003): Model Sensitivity to the Boundary Layer and Convection Parameterization[J]. *Pure and Applied Geophysics*,2007, **164**(8-9):1465-1487.

[21] 蔡旭晖,张祯玺,康凌,等. 珠江三角洲东部低层大气流动与中尺度扩散特性[J]. *热带气象学报*, 2005, **21**(5):497-505.

[22] Zannetti P. Air pollution modeling[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 185-222.

[23] 徐祥德,周秀骥,施晓晖.城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*,2005, **35**(增刊 I):1-19.

[24] Ding Y H. Monsoons over China[M]. New York: Kluwer Academic Publisher, 1994. 1-90.