

陈 燕, 蒋维楣, 郭文利, 等. 珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响 [J]. 环境科学学报, 2005, 25 (5) : 700 - 710

CHEN Yan, JIANG Weimei, GUO Wenli, et al. Study on the effect of the city group development in Pearl River Delta on local air pollutant dispersion by numerical modeling [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25 (5) : 700 - 710

珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响

陈 燕¹, 蒋维楣^{1,3,*}, 郭文利², 苗世光^{1,2}, 陈鲜艳², 季崇萍², 王晓云²

1. 南京大学大气科学系, 南京 210093

2. 北京市气象局, 北京 100089

3. 中国科学院大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

收稿日期: 2004-05-08 修回日期: 2004-09-27 录用日期: 2004-09-30

摘要:为探讨城市群发展对局地气象环境和污染物输送的影响,以珠江三角洲不同时期的下垫面为例,选取有利于和不利于污染扩散的较典型的气象条件,采用数值模拟手段,模拟并分析比较该地区城市群的形成与发展对城市气象环境、污染物分布、城市间污染物输送的影响.结果表明,重污染气象条件下出现长时间逆温现象,凌晨 3:00 到 6:00 间逆温最强,强度约为 $2.1 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,逆温层厚度达 300 m.城市群的发展使得城市夜间的逆温强度增强,逆温持续时间增长;城市群的发展使得城市地区风速减小,重污染气象条件下广州小风区面积约增加 28%,佛山约增加 45.2%,轻污染气象条件下增加较小;重污染气象条件时广州和佛山二氧化硫浓度一般大于 $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,城市群的发展使污染物扩散范围变小,对本地贡献率增大,对其它地区的贡献率减小;地区间氮氧化物和二氧化硫的输送基本量级为 $10^0 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 到数 $10^1 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,城市群的发展使污染物不易向外输送,在重污染气象条件时广州二氧化硫输出量由 $51.37 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 减小为 $42.81 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$.

关键词:城市群; 数值模拟; 污染物输送与扩散; 城市气象环境

文章编号: 0253-2468 (2005) 05-0700-11 **中图分类号:** X169 **文献标识码:** A

Study on the effect of the city group development in Pearle River Delta on local air pollutant dispersion by numerical modeling

CHEN Yan¹, JIANG Weimei^{1,3,*}, GUO Wenli², MIAO Shiguang^{1,2}, CHEN Xianyan², JI Chongping², WANG Xiaoyun²

1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

2. Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

3. State key Laboratory of Atmosphere Boundary Physics and Atmosphere Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Received 8 May 2004; **received in revised form** 27 September 2004; **accepted** 30 September 2004

Abstract: A numerical experiment is employed to investigate the impact of the city group's change on local meteorological conditions and pollutant transport. The land-use conditions in Pearl River Delta in two decades had been taken as an example to understand how the change and development of city group affecting the local urban meteorological environment, pollutant dispersion, transporting of airborne pollutant among cities. The results showed that a strong temperature inversion appeared under the heavily polluted meteorological condition. The intensity of the inversion temperature reached the peak about $2.1 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ during 3:00 to 6:00. The height of the inversed temperature layer was 300 m. The inversion temperature was strengthened and lasted for a longer time due to the development of cities. The wind speed was less and the pollutant stayed longer due to the development of the city group. The low wind speed area increased by 28% in Guangzhou and 45.2% in Foshan, the increase of low wind area was less under lightly polluted meteorological conditions. The SO_2 concentration of Guangzhou and Foshan was more than $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in heavily polluted meteorological condition, and the development of the city group made the pollutant disperse more widely. The sources contributed more pollutants to the local area, and less to others. The transported mass of SO_2 and NO_x among different areas reached a magnitude of $10^0 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ to $10^1 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$. The development of cities made the pollutant transport more weakly, for example the transported mass of SO_2 from Guangzhou decreased from $51.37 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ to $42.81 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(编号:40333027),LAPC 开放课题(LAPC-KF-2004-07)

作者简介:陈燕(1977—),女,博士生; * 通讯作者(责任作者)

Foundation item: Key project of National Natural Science Foundation of China (No. 40333027),LAPC Open Subject (LAPC-KF-2004-07)

Biography: CHEN Yan (1977—), Female, Ph. D. Candidate; * **corresponding author**

Key words: city group; numerical modeling; transport and dispersion of air pollutants; meteorological environment in urban area

大气污染物在区域间的扩散受大气局地环流特征和大气湍流特征的影响明显^[1]. 随着城市化的推进,大量的自然下垫面被水泥、柏油等人为的城市下垫面所代替.同时,经济发达地区正在形成城市群或城市带.密集城市群的出现改变了该地区地表环境的能量平衡,影响局地边界层结构,改变本地区的热力和动力环境,造成区域内大气流场特征和湍流特征的改变.城市群一般也是污染物排放比较集中的地区,局地流场特征的改变使得区域内污染物的扩散、转化和积累等规律也出现变化^[2].因此,研究城镇密集地区污染物扩散输送的规律,对于在这些区域内改善城市空气质量,合理分配环境资源,促进城市群科学规划、协调发展具有重要意义.

数值模拟技术作为一种有效的手段被广泛地应用到大气边界层研究和大气污染物输送扩散的研究中,并取得了较好的效果. Klemm^[3]利用数值模式对发生在希腊雅典的一个光化学污染事件进行了模拟,并对海陆风影响下的大气污染物扩散和远程输送进行了模拟. Souto^[4]利用中尺度气象模式和大气污染物扩散模式相结合,对大型污染源周围的大气污染物扩散进行研究,并对常用的几种扩散模式进行了比较. Jung^[5]对大气扩散模式与气象模式的结合使用进行探讨. Mori^[6]则研究了大气扩散模式与计算流体力学方法的结合使用.由于下垫面改变过程是一种不可逆过程,使得实地观测等研究手段受到了一定的限制,而数值模拟方法受到的限制要小得多,因此,这种方法开始被广泛地应用到下垫面变化对污染物扩散特征影响的研究中. Jazcilevich 利用数值模式对墨西哥城地区的城市气候对陆地利用类型改变的响应^[7],以及由此引起的对大气污染物扩散的影响进行了研究^[8],并探讨了该地区气象场与大气污染物输送的关系^[9].北京在开展城市气象要素观测试验、风洞实验等工作的基础上,建立多尺度数值模拟系统,建立北京城市规划建设大气环境影响的评估指标^[10].但是,目前国内对城市群内气象环境的研究开展较少.本文以珠江三角洲为例,利用数值模拟手段研究珠江三角洲区域在城市发展过程中,不同下垫面情况对该区域内城市气象环境的影响,对污染物分布的影响,以及对各个城市之间污染物相互输送的影响,以期城市群或都市圈的经济布局与发展决策提供参考.

1 研究区域及资料来源 (Simulated area and data source)

珠江三角洲是广东省城市和人口最密集的地区之一.按 1997 年统计,城镇密度达 10 个 km^{-2} .近年来,珠江三角洲地区已形成既有特大城市、又有中小城市和大量建制镇的城镇体系.本文研究区域的中心点坐标为 113.4 E, 22.6 N,范围为 200 km \times 300 km,包括整个珠江三角洲地区,有 16 个常规地面气象观测站.研究区域北部为山区,中部地形较平坦,南部约 1/3 的面积为海,如图 1 所示(图中数字为模拟区域内 16 个地面气象站的站号).数值模拟的水平网格距 4 km,垂直方向的最小格距为 10 m,顶高为 5 000 m.

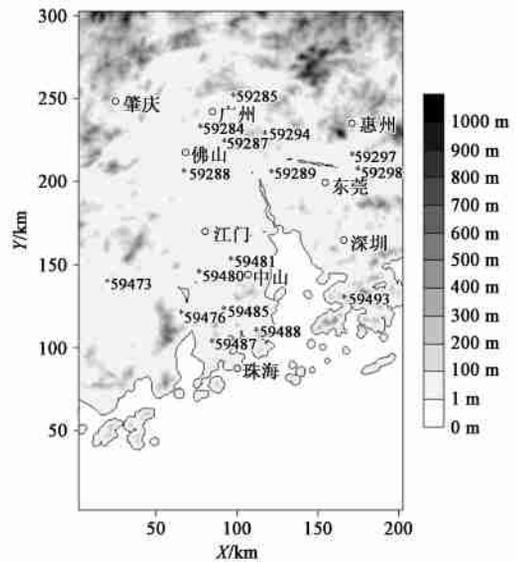


图 1 模拟区域地形图

Fig. 1 The terrain map in simulation domain

珠江三角洲地区的地面气压形势对该地区空气质量状况有很大影响.李琼^[11]对 1986—1993 年间当地大气污染物浓度超过国家大气环境质量二级标准 20% 以上的天数进行了统计,并分析了对应的天气系统特征.研究表明,在冷高压控制时,锋面进入黄河流域至南岭后移动缓慢,这种天气系统在重污染气象条件中出现的概率最大,而暖高压持续多日时则不易出现重污染情况.根据这项分析,本文选取典型不利于和有利于扩散的天气型进行模拟研究,并利用广州区域气象中心的“热带有限区同化预

报系统(TLAPS)^[12]的同化结果作为初始气象场。

为了考察珠江三角洲城市群的形成与发展对污染情况的影响,利用了历史和现状 2 种不同下垫面条件。以取自 1993 年全球下垫面植被类型资料(经纬度分辨率为 30)作为历史上的一种下垫面状况(以下简称“历史下垫面”),以取自 2000 年美国陆地卫星(LANDSAT)的用地属性资料作为接近现状的下垫面状况(以下简称“现状下垫面”)。

污染源包括了珠江三角洲(不包括香港地区)重点大型企业的点源排放、各城市居民生活和小型工业生产形成的面源排放以及主要交通道路上交通工具造成的线源排放。二氧化硫和氮氧化物是目前我国城市大气的主要污染物,同时在珠江三角洲酸雨的形成中起重要作用。所以,本研究中主要考虑了这 2 种污染物。

数值模拟中考虑了城市的人为热源。根据每个地区(市或区县)煤炭、石油、天然气的消耗量和国民经济的增长率,按照各种能源的发热率,计算发热量,并估算释放到大气中的热量,作为不同年代的城市人为热源。

2 数值模式与算例设计(Numerical model and case design)

本文采用数值模拟手段,利用区域边界层模式^[13]和拉格朗日烟团轨迹模式对珠江三角洲地区进行模拟。区域边界层模式可以提供详细的气象场及其时空变化;拉格朗日烟团轨迹模式物理模型清晰,在时空变化比较复杂的地区有较好的模拟能力,有较好的实用性^[14~15]。

本文利用珠江三角洲的历史和现状 2 种不同的下垫面条件,选取有利于污染扩散和不利于污染扩散 2 种比较典型的气象条件,进行了 4 个算例的模拟计算,分析该区域内城市群发展对区域和城市气象环境的影响,并模拟污染物在该区域的分布以及不同地区间的相互影响。2002 年 1 月上旬珠江地区受大陆冷空气的影响,5 日华东地区为一小中心冷高压。在它的控制下,珠江三角洲地区天气晴朗,气温较低,均压,静小风,早晚辐射逆温强度大,低层空气层结稳定。该日空气质量较差,污染严重。2001 年 12 月中旬,珠江三角洲地区为暖高压型天气系统,空气质量较好,为轻污染状况。文本选取 2002 年 1

月 5 日为重污染气象条件,2001 年 12 月 11 日为轻污染气象条件。由于 1990~2000 年广州和佛山都是珠江三角洲地区综合污染指数最高的城市^[1],且排放量大的污染源基本集中在这 2 个地区,其它如深圳、珠江、惠州等地污染源排放量较小,所以本文主要分析这广州和佛山地区的气象特征和污染物输送分布特征。

城市群的发展使许多原来的自然植被和农田变为城市用地,改变了这些地方的粗糙度和摩擦系数。同时,人类活动的增加也使这些地方的人为热源增加。这些因素会通过动力学和热力学作用影响气象环境。本文较为细致地考虑了这些因素的作用,在区域边界层模式^[13]中,进入大气的地表动量、热量通量、水汽通量根据 Businger^[16]和 Byun^[17]的方案计算;地表通量作为湍流动量扩散项、热量扩散项和水汽扩散项的下边界条件进入大气模式;陆面过程采用 Pleim^[18]和 Xiu^[19]提出的两层土壤—植被模式;参考 Kimura^[20]等人的工作,将城市人为热源加入到地表能量平衡方程中。

在本文的拉格朗日烟团轨迹模式中,气流场由区域边界层模式输出提供,各种污染物的沉积速度和转化速率的取值如表 1^[1]。

表 1 各种污染物的沉积速度和转化速率

Table 1 The deposition velocities and transformation rates of the main pollutants

SO ₂ 转化速率 **			SO ₂ 干沉积速	NO _x 转化	NO _x 干沉积速
夏季	冬季	春秋季	度/(cm s ⁻¹)	速率 **	度/(cm s ⁻¹)
8.0 %	4.0 %	6.0 % ~ 7.0 %	0.5	2.0 %	0.5

** : SO₂ 转化速率和 NO_x 转化速率均为污染物每小时转化的百分比

3 模式检验(model validation)

利用模拟值和观测值的统计量指标对模拟结果进行检验,可以比较客观地评估模式的整体模拟性能。以模拟区域内 16 个地面气象站的观测结果与模拟计算结果作相关分析,其相关系数如表 2 所示。由表 2 可见,模式模拟性能较好,对地面气温的模拟效果好于地面风速的模拟效果。

本文以广州市为例,将污染物浓度模拟结果与相应的监测结果进行比较,如表 3 所示。由表 3 可见,两者浓度量级基本一致,但模拟计算所得的二氧化

1) 数据引自研究报告:《珠江三角洲空气质量研究报告》(内部资料)北京大学环境科学中心、广东省环境保护监测中心站、广州市环境保护科学研究所等单位合编。

化硫浓度比监测值偏低,而二氧化氮则偏高.在重污染气象条件时, SO_2 的相对平均偏差为 - 0.30, NO_x 为 - 0.05;轻污染气象条件时, SO_2 的相对平均偏差为 - 0.11, NO_x 为 0.52.

表 2 风速和温度模拟值与观测值的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between simulated wind speed/temperature and observed results

站名	站号	风速相关系数	温度相关系数
花县	59284	0.70	0.75
从化	59285	0.24	0.74
广州	59287	0.69	0.74
南海	59288	0.45	0.74
东莞	59289	0.45	0.74
增城	59294	0.66	0.26
博罗	59297	0.55	0.74
惠阳	59298	0.82	0.71
高鹤	59473	0.60	0.73
新会	59 476	0.55	0.68
顺德	59480	0.61	0.73
番禺	59481	0.60	0.75
中山	59485	0.46	0.76
斗门	59487	0.65	0.72
珠海	59 488	0.52	0.60
宝安	59493	0.44	0.69
平均		0.56	0.69

表 3 广州市污染物日平均浓度的模拟值与观测值比较

Table 3 The comparison between simulated daily mean concentration and observation results $\mu g \cdot m^{-3}$

日期	SO_2 模拟值	SO_2 观测值	NO_x 模拟值	NO_x 观测值
2002-01-05	67.4	91.5	176.95	185.5
2001-12-11	21.32	23.8	53.34	31.2

4 计算结果(simulation results)

4.1 气象环境特征的变化

利用重污染气象条件,分别用历史和现状 2 种下垫面条件进行模拟计算,比较广州和佛山的温度廓线随城市发展的变化.广州温度廓线如图 2(a)、2(b).在这种气象条件下,广州地区清晨 8:00 从地面到 300 m 为弱逆温层;9:00 后地面气温回升,逆温逐渐消失,发生强烈混合,混合层高度逐渐增高;14:00 混合层高度约发展到 2 500 m 以上;19:00 地面降温,到次日 8:00 左右持续出现强贴地逆温.夜间混合层高度一直约为 100~300 m.相对而言,现状下垫面条件逆温强度稍强,平均达 $2.15 \text{ } \mu m^{-1}$,而历史下垫面条件时平均约为 $1.75 \text{ } \mu m^{-1}$.贴地逆温最强出现在凌晨 3:00 到 6:00 之间,此时逆温厚度也

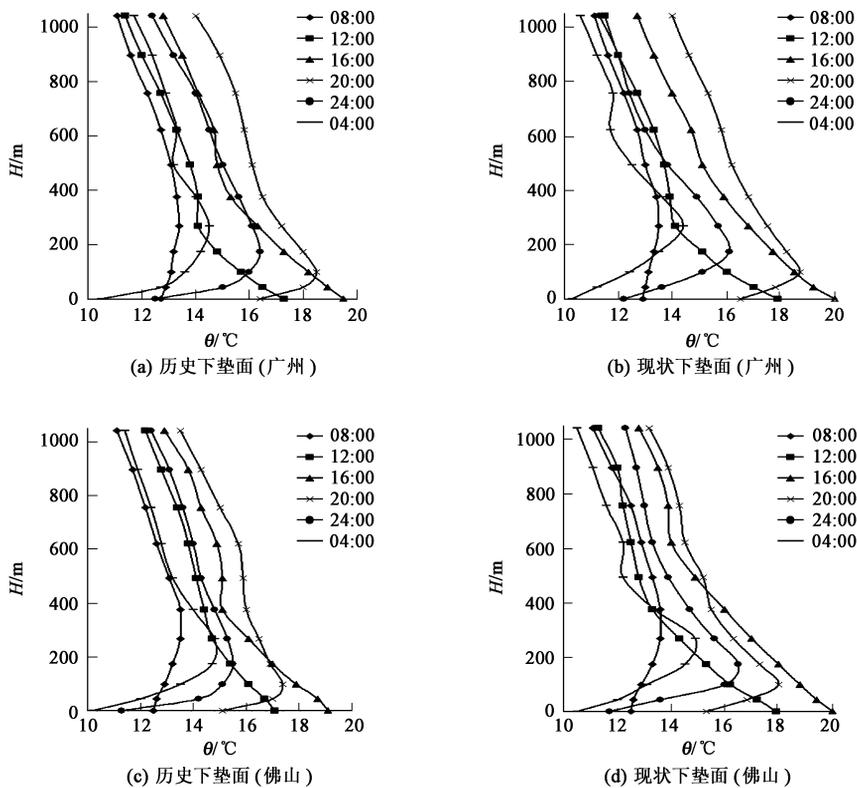


图 2 重污染气象条件下温度廓线((a)历史下垫面(广州);(b)现状下垫面(广州);(c)历史下垫面(佛山);(d)现状下垫面(佛山))

Fig.2 Temperature profile in severe pollution meteorological condition ((a) historical underlying surface (Guangzhou); (b) current underlying surface (Guangzhou); (c) historical underlying (Fushan); (d) current underlying surface (Fushan))

最大,逆温层顶为 300 m;同时,在 500 m 到 1 000 m 之间,2 种下垫面条件都出现了等温层和弱逆温层.佛山温度廓线如图 2(c)、2(d).佛山逆温强度比广州略大,8:00 为 $0.33 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}^{-1}$,晚上 19:00 到次日 8:00 为 $2.25 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}^{-1}$.佛山地区同样是现状下垫面条件的逆温强度比历史下垫面条件大.佛山混合层变化情况与广州相似,但佛山在 11:00 贴地逆温消散后仍有高空弱逆温存在,逆温层底高约 1 200 m,这种情况一直持续到 21:00 出现辐射贴地逆温.

将气象条件改为轻污染情况下的气象条件,同样用 2 种下垫面模拟计算.广州和佛山的温度廓线如图 3 所示,广州清晨 8:00 在 100 m 高度到 400 m 为轻微逆温,强度为 $0.17 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}^{-1}$,日出后出现从地

面向上的强烈混合,逆温逐渐消散,到下午 14:00 到 15:00 混合发展到最强,温度递减率可达 $1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}^{-1}$,这样的情况持续到 17:00.从 20:00 开始,地面气温下降,出现弱逆温.该逆温在历史下垫面下约持续 8 h,逆温层厚度约 150 m,强度为 $0.43 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}^{-1}$;在现状下垫面下约持续 4 h,厚度平均为 50 m,强度约 $1.3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}^{-1}$,此后则一直为近等温层结.佛山和广州的情况类似,夜间的逆温略强于广州.在这种气象条件下,白天混合层高度较高,广州约 900~1 040 m,佛山约 760~1 340 m,广州夜间混合层高度在 100~300 m,佛山在 20:00 只有约 40 m,大多数时间混合层高度在 40~200 m.

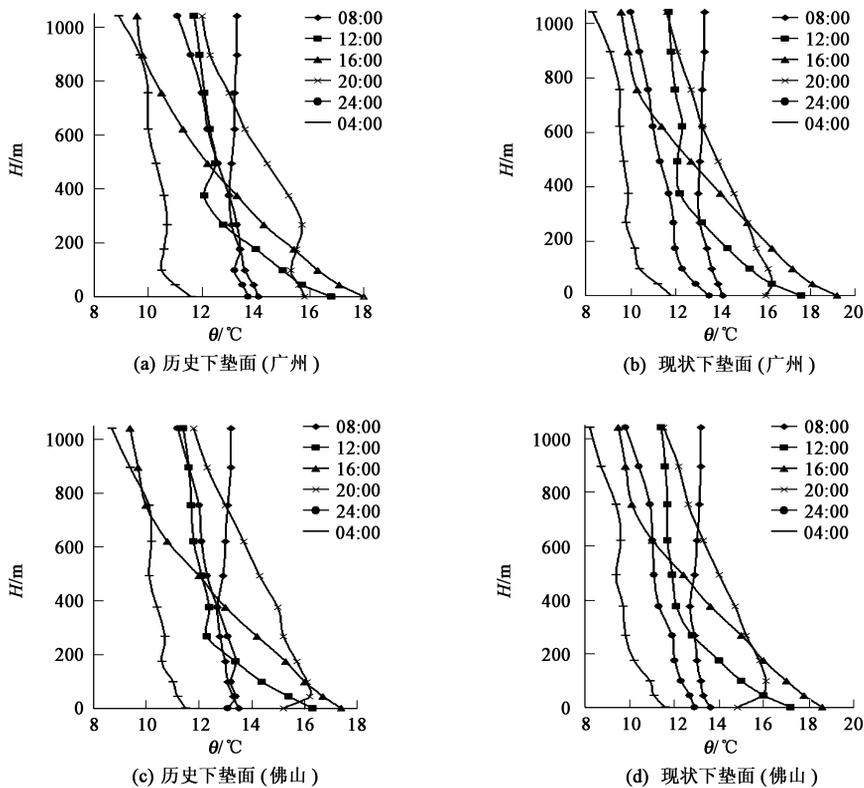


图 3 轻污染气象条件下温度廓线((a)历史下垫面(广州);(b)现状下垫面(广州);(c)历史下垫面(佛山);(d)现状下垫面(佛山))

Fig. 3 Temperature profile in light pollution meteorological condition ((a) historical underlying surface (Guangzhou); (b) current underlying surface (Guangzhou); (c) historical underlying (Fushan); (d) current underlying surface (Fushan))

图 4 为利用重污染气象条件,分别用历史和现状 2 种下垫面模拟得到的整个珠江三角洲地区的地面风速流场图.广州和佛山地区风速较小,一般在 0.5 m s^{-1} 到 1 m s^{-1} 之间,其中 20:00 风速比其它时刻要小.模拟区域的北部山区气流的辐合辐散比较明显,风速较大.南部海域气流较平直,风速最大.比较 2 种下垫面的流场,可以看出整个模拟区域内主

导风向基本没有变化,但在现状下垫面时广州和佛山地区的风速明显小于历史下垫面情况,同时风向也有所改变(一般是向南的分量减小).北部山区的风向也发生不同程度的偏转.

在本文中定义 10 m 高度风速小于 1 m s^{-1} 为小风,并将出现小风的面积与城市总面积相比,得到广州和佛山的小风区面积百分比.比较这 2 个城市风

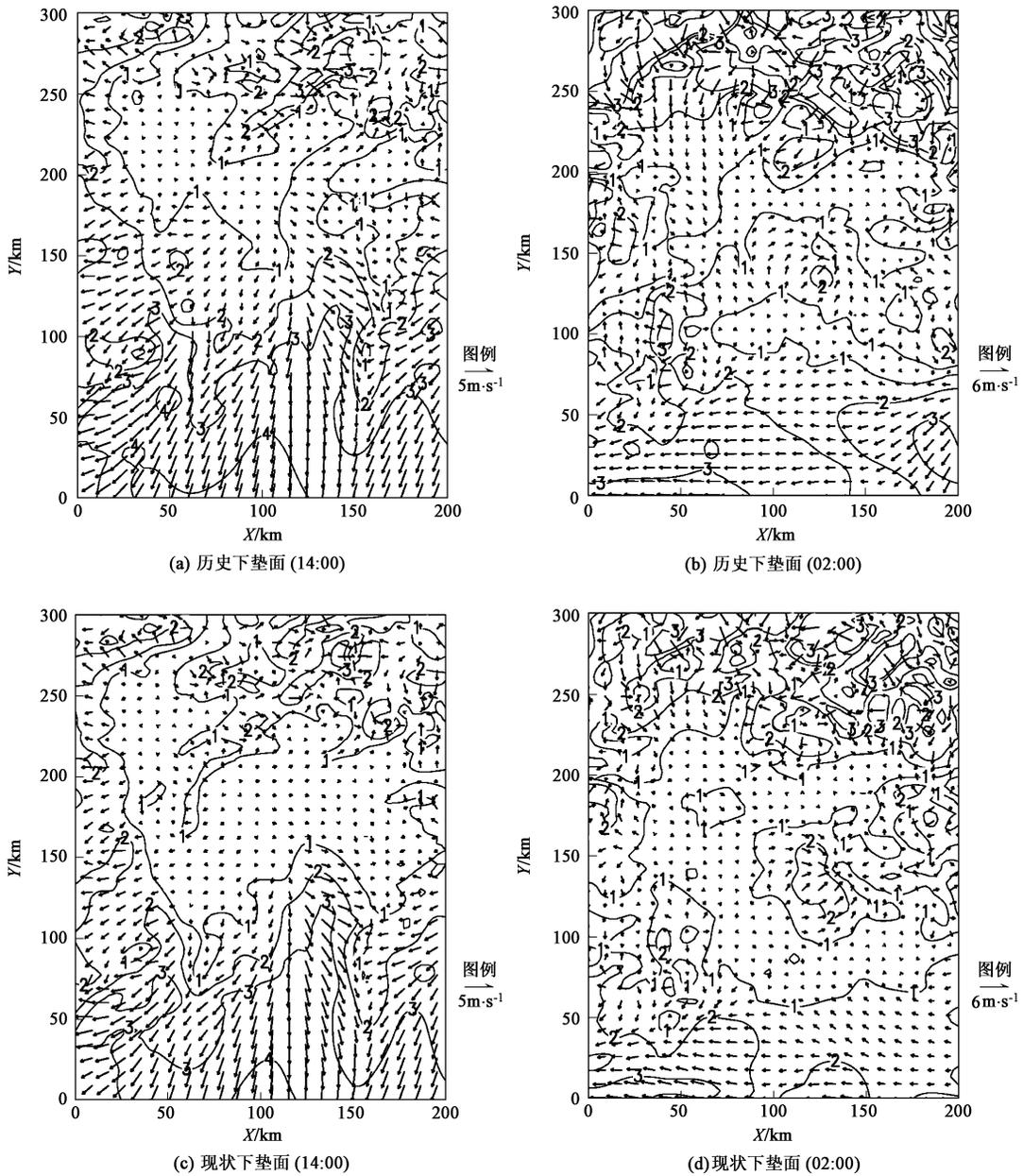


图4 重污染气象条件下珠江三角洲地区地面流场((a)历史下垫面(14:00);(b)历史下垫面(02:00);(c)现状下垫面(14:00);(d)现状下垫面(02:00))

Fig. 4 Simulated wind vector of Pearle River Delta in severe pollution meteorological condition((a) historical underlying surface (14:00);(b) historical underlying surface (02:00);(c) current underlying surface (14:00);(d) current underlying surface (02:00))

速减小的幅度,可以发现,广州和佛山各个时刻的小风区比例都增大,其中佛山更明显.这些变化可从表4看出.

轻污染气象条件时整个模拟区域的风速平均比重污染气象条件时大 $1 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.其中海面上风速增幅大,城市地区增幅小,如图5.14:00主要是东北风,20:00到次日08:00主要是东南风.2种不同的下垫面时,风向变化不大,风速在城市地区变小,但

减小的幅度比重污染气象条件时小,广州小风区面积比例平均增加2.3%,佛山平均增加3.7%(而在重污染气象条件时,广州平均增加28%,佛山平均增加45.2%).和重污染气象条件时一样,佛山风速减小平均比广州大(见表4).

4.2 污染物浓度分布的变化

对于污染物的分布,本文主要分析广州、佛山地区对模拟区域内不同地区二氧化硫和氮氧化物地面

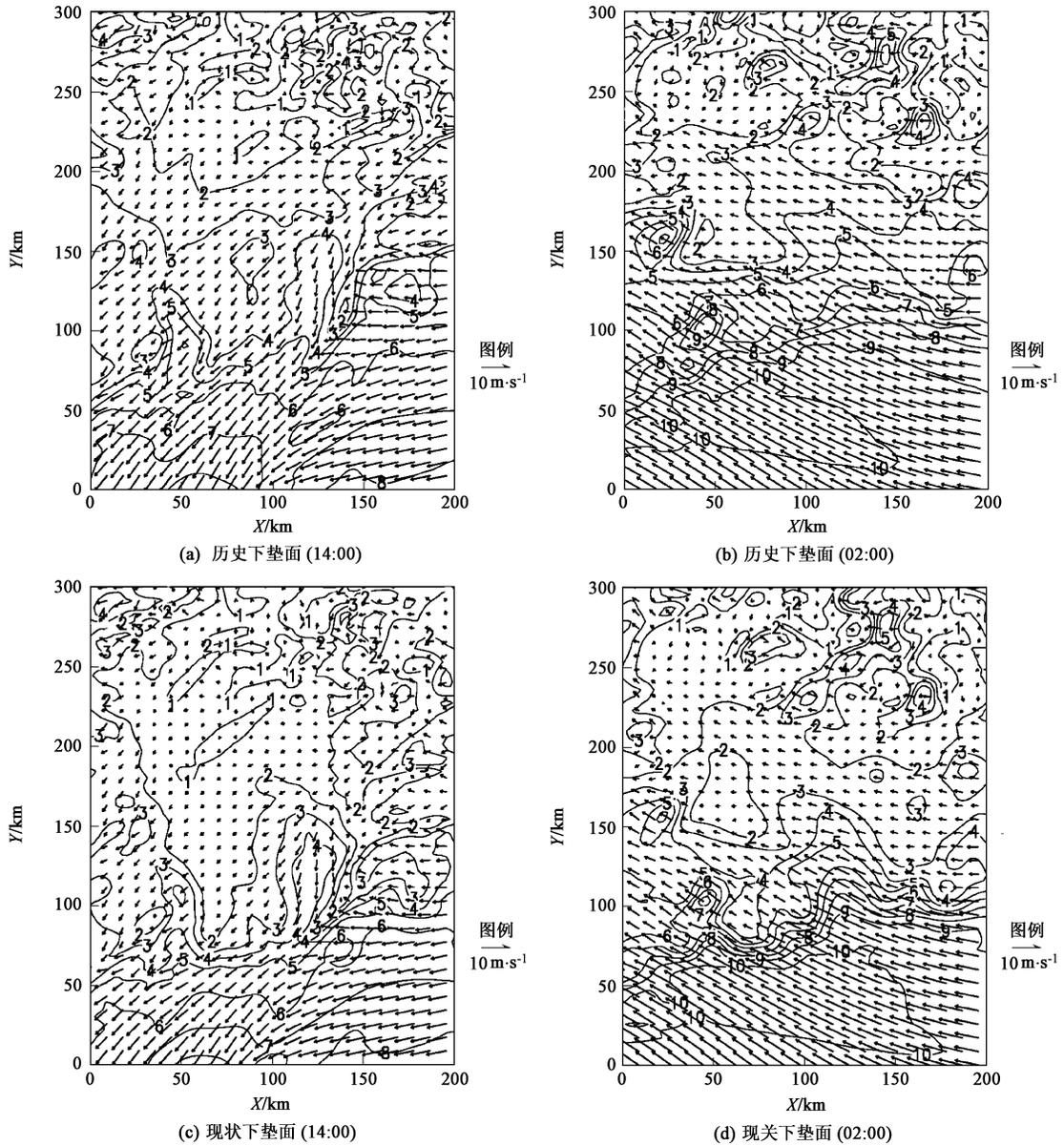


图5 轻污染气象条件下珠江三角洲地区地面流场((a) 历史下垫面(14:00);(b) 历史下垫面(02:00);(c) 现状下垫面(14:00);(d) 现状下垫面(02:00))

Fig. 5 Simulated wind vector of Pearl River Delta in light pollution meteorological condition ((a) historical underlying surface (14:00); (b) historical underlying surface (02:00); (c) current underlying surface (14:00); (d) current underlying surface (02:00))

表4 10 m高度小风(<1 m s⁻¹)面积比例

Table 4 The area proportion of wind speed less than 1 m s⁻¹ at 10 m

时刻	重污染气象条件				轻污染气象条件			
	广州		佛山		广州		佛山	
	A	B	A	B	A	B	A	B
14:00	45.8%	69.8%	36.8%	76.9%	15.3%	20.7%	10.7%	24.3%
20:00	54.8%	87.5%	31.3%	91.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
02:00	32.6%	54.9%	25.3%	68.1%	0.0%	3.6%	0.0%	1.2%
08:00	30.2%	63.3%	17.6%	55.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
平均	40.9%	68.9%	27.8%	73.0%	3.8%	6.1%	2.7%	6.4%

注:A表示历史下垫面,B表示现状下垫面

浓度的贡献以及随不同下垫面所产生的变化。

图6为重污染气象条件时模拟区域内日平均地面二氧化硫的浓度分布.由于该气象条件下地面风速较小,陆地上风速多在1 m s⁻¹左右,所以污染物的散布范围较大,珠江三角洲的中部和西部均在其影响下.不同下垫面时广州和佛山均为二氧化硫的高值区,一般大于45 μg m⁻³.现状下垫面和历史下垫面情况相比,污染物浓度值变化不大,但影响范围变小,污染物更加集中在城市地区.轻污染气象条件

下地面二氧化硫的浓度分布如图 7. 该气象条件下, 污染物浓度较低, 广州、佛山地区浓度在 $20 \sim 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 其它地区的浓度更低. 因地面风速较大, 使得污染物的散布范围更集中在污染源的下风方向, 故影响范围较重污染气象条件时小.

4.3 污染物区域间输送的变化

将珠江三角洲地区的源分为 3 部分, 分别为广州地区、佛山地区和其它区域的源, 比较这 3 个地区的源对模拟区域内各地的贡献. 贡献地区的源在接受区域内造成的日平均地面浓度与所有源在接受区

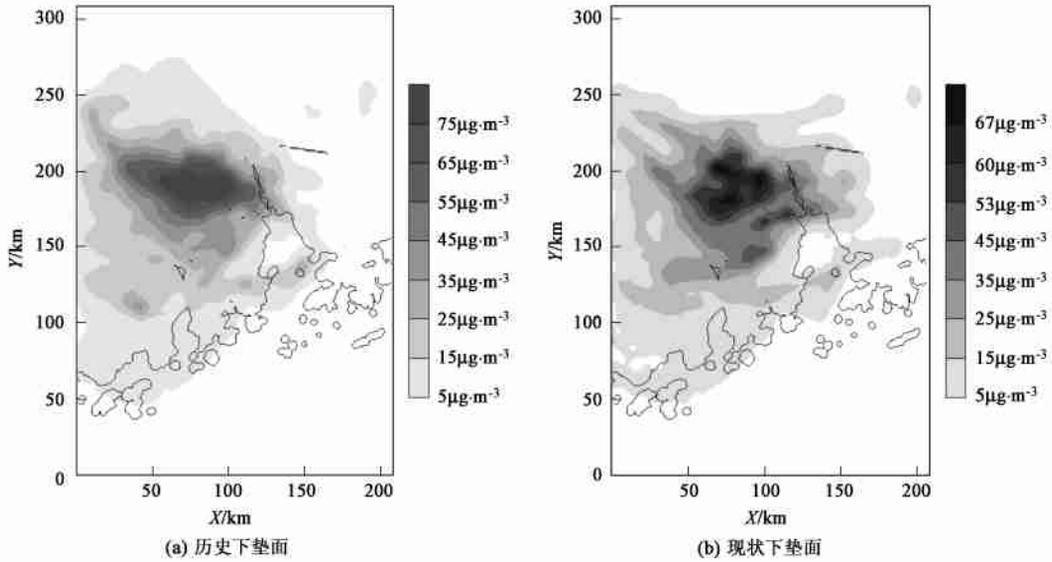


图 6 重污染气象条件下二氧化硫地面浓度图((a) 历史下垫面; (b) 现状下垫面)

Fig. 6 Simulated ground concentration of SO_2 in severe pollution meteorological condition ((a) historical underlying surface; (b) current underlying surface)

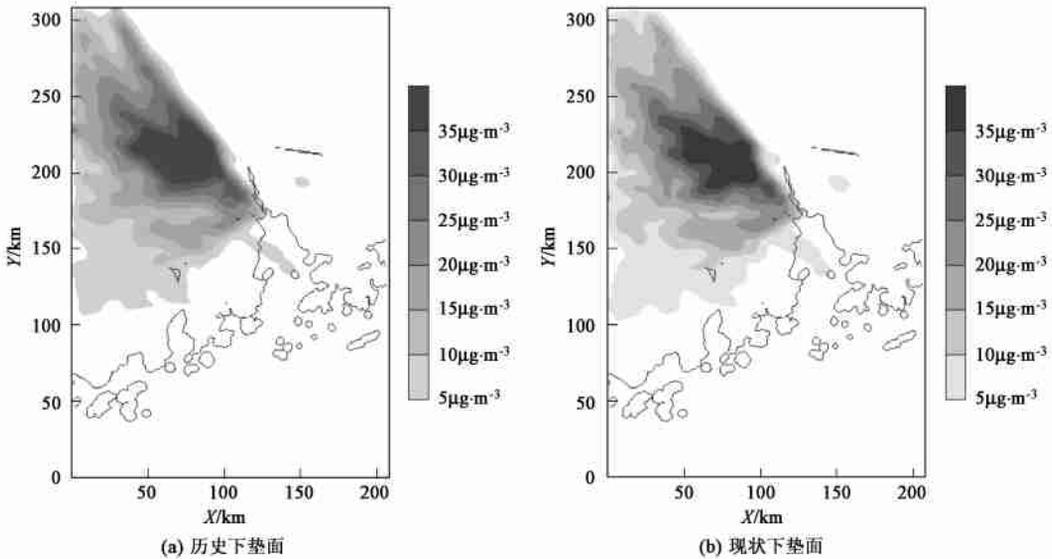


图 7 轻污染气象条件下二氧化硫地面浓度图((a) 历史下垫面; (b) 现状下垫面)

Fig. 7 Simulated ground concentration of SO_2 in light pollution meteorological condition ((a) historical underlying surface; (b) current underlying surface)

域内造成的日平均总地面浓度之比为贡献率. 表 5 为重污染时不同地区的贡献率. 广州地区污染物主要是以局地贡献为主, 受佛山和其它地区的影响不大. 广州地区的源对当地贡献率最大, 一般在 70 %

以上, 现状下垫面时更大; 对佛山地区的贡献率在 35 % 左右, 现状下垫面时减小; 对其它地区的贡献率在 20 % 左右. 佛山地区则受本地和其它区域的共同影响, 佛山本地、广州地区和其它区域源的浓度贡

献率基本相当. 佛山地区的主要规律和广州一样, 都是对本地的贡献率增大, 对其它地区的贡献率减小.

轻污染气象条件时(表6), 广州的污染受佛山的影响较小, 主要受本地和其它地区的贡献. 而对佛山来说, 3个部分都有明显的贡献. 2种不同的下垫面下, 这种地区之间相互影响的情况变化不大, 这和该气象条件下, 城市地区风速衰减幅度较小有关.

表5 重污染气象条件各区域之间污染物(SO₂)浓度的贡献率

Table 5 The distribution of SO₂ among cities in severe pollution meteorological condition

污染物接受区域	各区域污染物贡献率 (历史下垫面)			各区域污染物贡献率 (现状下垫面)		
	广州	佛山	其它区域	广州	佛山	其它区域
	广州	77.26 %	1.60 %	21.14 %	87.74 %	1.90 %
佛山	36.44 %	39.64 %	23.92 %	33.86 %	44.28 %	21.86 %
其它区域	22.23 %	6.41 %	71.36 %	17.13 %	6.20 %	76.67 %

表6 轻污染气象条件各区域之间污染物(SO₂)浓度的贡献率

Table 6 The distribution of SO₂ among cities in light pollution meteorological condition

污染物接受区域	各区域污染物贡献率 (历史下垫面)			各区域污染物贡献率 (现状下垫面)		
	广州	佛山	其它区域	广州	佛山	其它区域
	广州	45.93 %	0.45 %	53.62 %	49.47 %	3.15 %
佛山	35.44 %	24.22 %	40.34 %	37.85 %	24.63 %	37.52 %
其它区域	19.75 %	7.63 %	72.62 %	25.53 %	11.94 %	58.53 %

污染物在各区域之间的输送对城市的空气质量的影响比较大. 为了比较广州、佛山和其它地区之间污染物的相互输送, 利用以下公式¹⁾ 计算污染物的输送总量, 即:

$$F_{is,A} = \sum_k C_{k,is} V_k$$

式中, $F_{is,A}$ 为单位时间内从源 is 输送到区域 A 的污染物的总量, 这里的时间单位是 d , $C_{k,is}$ 为源 is 在网格 k 内造成的单位时间的平均浓度, V_k 为网格 k 的体积, k 为在区域 A 内的网格.

重污染气象条件下 2 种污染物的输送量如表 7、表 8, 氮氧化物和二氧化硫在区域间的输送基本量级为几 $t \cdot d^{-1}$ 到几十 $t \cdot d^{-1}$. 对广州地区来说, 基本是净输出; 对佛山地区来说, 输入和输出的量大体相当; 对于其它区域来说, 则大多时为净输入. 在历史下垫面时, 广州每天输出 51.37 t 二氧化硫, 输入 5.08 t ; 在现状下垫面时, 广州每天输出减小为 42.81 t , 输入也减小为 4.64 t . 由此亦可看出, 城市群的发

展使污染物更易集中在当地, 不易向其它地区城市扩散.

5 分析讨论(analysis and discussion)

本文的模拟结果表明, 在重污染这种气象条件下, 地面逆温较强, 持续时间长, 不利于污染物的稀释扩散. 随着城市的发展和人口的增加, 逆温现象会增强. 这主要因为经济的发展和人口的增加使得白天城市地区产生更多的热量, 地面温度增加(由图 2 可以看出广州和佛山的气温一般增加 0.5 ~ 1 °C), 同时热量向上输送, 一般影响到 200 m 高度左右. 夜间地面降温, 高空气温也在降低, 但由于有白天热量的积累, 故降温比地面较慢, 这样地面和高空的温差就增大, 逆温现象增强.

表7 重污染气象条件各区域之间二氧化硫日输送总量

Table 7 The transport mass of SO₂ among cities in severe pollution meteorological condition $t \cdot d^{-1}$

污染物接受区域	区域间污染物日输送量 (历史下垫面)			区域间污染物日输送量 (现状下垫面)		
	广州	佛山	其它区域	广州	佛山	其它区域
	广州	—	0.69	4.39	—	1.00
佛山	16.90	—	8.04	13.29	—	6.00
其它区域	34.47	18.21	—	29.52	14.83	—

表8 重污染气象条件各区域之间氮氧化物日输送总量

Table 8 The transport mass of NO_x among cities in severe pollution meteorological condition $t \cdot d^{-1}$

污染物接受区域	区域间污染物日输送量 (历史下垫面)			区域间污染物日输送量 (现状下垫面)		
	广州	佛山	其它区域	广州	佛山	其它区域
	广州	—	0.56	4.66	—	0.82
佛山	13.07	—	7.78	10.24	—	5.22
其它区域	25.26	11.13	—	21.17	9.22	—

由于建筑物对城市低层风场的阻尼和扰动作用, 使城市内风速衰减; 同时, 城市群的发展使城市面积迅速扩大, 对周围的影响也增强, 导致低风速的范围扩大, 使污染物易集中在城市地区, 并使城市下风向区域的污染物浓度降低. 2 种气象条件下都出现了这种风速衰减现象. 佛山由于近几年发展迅速, 其现象更加明显, 小风区面积增加幅度比广州大. 例如在重污染气象条件下, 20:00 时, 佛山现状下垫面的小风区面积为 91.7 %, 是历史下垫面时的 2.9 倍, 而此时广州为 1.6 倍(见表 4).

城市发展造成能源消耗增加和下垫面类型改

1) 引自研究报告:《珠江三角洲空气质量研究报告》(内部资料) 北京大学环境科学中心、广东省环境保护监测中心站、广州市环境保护科学研究所等单位合编

变,使得逆温的强度增强.同时,建筑物分布范围和密度的增大使得市区内风速减小的趋势明显,这也使逆温层结构增强,持续时间延长,从而在城市上空形成更明显的“空气穹隆”^[21]效应.该效应使低层大气更加稳定,大气垂直交换减弱,稀释扩散能力减小,污染物不易向外扩散,使得本地源对当地的影响更大.在本文算例中的重污染气象条件下,广州本地源对广州市的贡献率增加了 10.48%.

6 结论(conclusion)

1)以当地 2002 年 1 月 5 日的气象条件作为重污染气象条件,在该条件下,广州和佛山出现长时间逆温,凌晨 3:00 到 6:00 逆温最强,平均强度为 2.14 m^{-1} ,逆温层厚度达 300 m.现状下垫面和历史下垫面相比,白天城市增温,夜间逆温增强.不同城市相比,佛山的逆温比广州稍强.以 2001 年 12 月 11 日的气象条件为轻污染气象条件,此时在暖高压型天气系统的影响下,逆温强度明显减弱,持续时间变短,其它变化规律和重污染气象条件基本一致.

2)在重污染气象条件下,广州和佛山地面风速均较低,为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右.现状下垫面时城市风速减小,佛山风速减小的幅度比广州大.轻污染气象条件时,大部分时间内广州和佛山的地面风速较大.城市风速的减小幅度比重污染气象条件小.

3)在重污染气象条件下,广州和佛山为污染物浓度高值区,一般大于 $45\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.现状下垫面时污染物扩散范围较小.和历史下垫面情况相比,2 个城市的源对本地贡献率增大,对其它地区的贡献率减小.

4)氮氧化物和二氧化硫的输送基本量级为几 $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ 到几十 $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$.广州地区基本是净输出,佛山地区的输入输出量大体相当.

5)城市群的发展对边界层大气输送与扩散影响较大,使平均逆温增强,风速减小,污染物扩散范围减小,从而使污染物更易集中在城市群区域内.

通讯作者简介:蒋维楣(1939—),男,南京大学大气科学系教授,博士生导师.长期从事空气污染气象学,大气扩散与大气环境,大气边界层研究和教学工作,历年来主持承担并完成各级各类研究课题 20 余项.1990 年以来正式发表学术论文 100 余篇,正式出版著作 6 部.近期获教育部自然科学二等奖(2002 年度)、教育部科技进步三等奖(1995 年度)、电力部科技进步二等奖(1995 年度)等.

参考文献(References):

- [1] Carroll J J, Dixon A J. Regional scale transport over complex terrain, a case study: tracing the Sacramento plume in the Sierra Nevada of California[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(23): 3745—3758
- [2] Romero H, Ihl M, Rivera A, et al. Rapid urban growth, land-use changes and air pollution in Santiago, Chile [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(24): 4039—4047
- [3] Klemm O, Zomas I C, Balis D, et al. A summer air-pollution study in Athens, Greece [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(12): 2071—2087
- [4] Souto M J, Souto J A, Perez-Munuzuri V, et al. A comparison of operational Lagrangian particle and adaptive puff models for plume dispersion forecasting [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(14): 2349—2360
- [5] Jung Y R, Park W G, Park O H. Pollution dispersion analysis using the puff model with numerical flow field data[J]. Mechanics Research Communications, 2003, 30(4): 277—286
- [6] Mori A. Integration of plume and puff diffusion models /application of CFD[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(1): 45—49
- [7] Jazcilevich A D, Fuentes V, Jauergui E, et al. Simulated urban climate response to historical land use modification in the basin of Mexico[J]. Climatic Change, 2000, 44(4): 515—536
- [8] Jazcilevich A D, Garcia A R, Ruliz-Sularez L G. A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the Valley of Mexico[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(13): 2297—2307
- [9] Jazcilevich A D, Garcia A R, Ruliz-Sularez L G. A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the central region of Mexico[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(2): 183—193
- [10] Fang X Y, Jiang W M, Miao S G, et al. The multi-scale numerical modeling system for research on the relationship between urban planning and meteorological environment [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(1): 103—112
- [11] Li Q, Li F J, Ye Y X, et al. The relationship between synoptic patterns and potential pollution and the density of surface air pollution over Pearl River Delta [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1999, 15(4): 363—369(in Chinese)
- [12] Xue J S, Wang K L, Wang Z M, et al. Test of a tropical limited area numerical prediction model including effect of real topography [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1998, 5(1): 1—23
- [13] Xu M, Jiang W M, Ji C P, et al. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(supplement): 61—68(in Chinese)
- [14] Jiang Y H, Jiang W M. Study on application of the puff trajectory model in the field of estimation of regional transport and dispersion of air pollutants[J]. China Environmental Science, 1989, 1(1): 15—21
- [15] Baker C J. Outline of a novel method for the prediction of atmospheric pollution dispersal from road vehicles [J]. Journal of Wind Engineering and Industry Aerodynamics, 1996, 65(4): 395—404
- [16] Businger J A, Brown M. Flux-profile Relationships in the Atmospheric

- Surface Layer[J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1971(28):181—189
- [17] Byun, D W. On the Analytical Solutions of Flux-profile Relationships for the Atmospheric Surface Layer [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990(29):652—657
- [18] Pleim J E, Xiu A. Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995,34(1):16—32
- [19] Xiu A, Pleim J E. Development of land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001,40(3):192—209
- [20] Kimura F, Takahashi S. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment[J]. *Atmosphere Environment*, 1991,25B(2):155—164
- [21] Xu X D, Bian L G, Ding G A, *et al.* Theory and Technology on Urban Atmospheric Environment Observation Project [M]. Beijing: Meteorology Press, 2003:56—105 (in Chinese)

中文参考文献:

- [11] 李 琼,李福娇,叶燕翔,等. 珠江三角洲地区天气类型与污染潜势及污染浓度的关系[J]. *热带气象学报*, 1999,15(4):363—369
- [13] 徐 敏,蒋维楣,季崇萍,等. 北京地区气象环境数值模拟试验[J]. *应用气象学报*, 2002,13(特刊):61—68
- [21] 徐祥德,卞林根,丁国安,等. 城市大气环境观测工程技术与原理[M]. 北京:气象出版社, 2003:56—105