

文章编号:1000-582X(2005)09-0088-04

大气污染的数值模拟*

卢军¹,冯源²,龚琪²

(重庆大学 1. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; 2. 城市建设与环境工程学院, 重庆 400030)

摘要:为比较集中供热与分散供热对重庆涪陵地区的大气污染影响的差异,采用计算流体力学软件 PHOENICS,通过计算机模拟的方法得出该地区大气污染物(SO₂, PM₁₀)的基本分布情况,结果表明,集中供热的污染源面积较大,污染的扩散方向受城市的主导风向影响较大,污染物浓度向扩散方向的两旁下降得较快,该区中心主要小区的污染物浓度从源强的5%降低到1%;而且集中供热产生的污染面积大约只有分散供热的20%,受污染的区域减小,特别是对居民区等人口密集区的污染大大降低了.并从对城市大气污染的角度论证在该地区采用集中供热的优势.同时证明使用一些较为成熟的流体力学软件进行计算机模拟能够为城市的大气污染分析提供一个较为准确而便利的手段.

关键词:模拟;污染;集中供热;PHOENICS

中图分类号:X51

文献标识码:A

20世纪以来,现代工业和交通事业的迅速发展,工业区和城市的大气污染日益严重.实践证明,由于大气污染不仅受污染源性质的影响,还受到多种自然、社会和经济因素的影响和制约.所以,应该把大气污染控制问题看作一个多变量、多目标、多层次的复杂系统,用全面的、相互联系的、发展的观点对这一系统进行量化的研究,找出行之有效的治理方案.

据统计,中国每年约有10亿t煤炭直接用于燃烧,主要用户为燃煤电厂、工业锅炉、窑炉与生活用煤.考虑到清洁能源往往带来较高的技术成本,热电联产、集中供热是改善环境质量、提高能源利用率的重要措施.分散供热的小锅炉单台容量小,(据1995年统计,全国工业锅炉平均单台容量仅2.4 t/h)、烟囱低(一般在40 m以下),热效率低(一般为50%~70%,采暖小锅炉则在30%以下),除尘效果差(有的小锅炉尚无正式的除尘设备,更无脱硫设备),而热电厂的锅炉容量大(3 000 kw 背压机需装35 t/h 锅炉,25 000 kw 背压机需装220 t/h 锅炉)、热效率高(一般链条炉在80%左右,煤粉炉则达85%~90%)、烟囱高(可在80 m以上,大型热电厂可超过200 m)、除尘效率高(一般可在90%以上),如选用循环流化床锅炉还可炉内脱硫,实现热电联产还有利于灰渣综合利用和节省宝贵的城市建设占地^[1-4].

但是集中供热势必造成热电厂的污染物排放量增加,对局部地区的污染定会加重.为了采用相对简便、

准确的方法并且能够直观的了解污染物的排放对周围区域的影响及集中污染源与分散污染源对整个城市影响的区别,笔者借助计算流体力学(CFD)软件 PHOENICS 对大气污染情况下进行模拟及预测^[5].

1 大气污染模拟实例

重庆市龙桥发电厂地处重庆市涪陵区龙桥镇,距涪陵市区14 km,目前总装机容量50 MW,是涪陵地方电网的支柱电站之一.随着涪陵工业的发展,工业企业对热蒸汽的需求量增大,决定在该区建设以热电联产为基础的集中供热来取代大量、分散的小锅炉供热方式,并逐步在涪陵全区推广才用热电联产.

笔者应用 PHOENICS 软件首先对龙桥发电厂的现有的污染源(燃煤锅炉烟囱)的最大落地点浓度及落地点离源距离进行模拟,并与预测计算数据进行比较.然后用最大落地点范围内的区域作为污染源,模拟对整个涪陵区的大气影响,并与分散污染源的情况进行比较.

1.1 污染源的模拟

选用的代表性污染物为SO₂和PM₁₀,SO₂是大气污染物中数量较大、影响面较广的气态污染物.PM₁₀是空气动力学当量直径小于10 μm的颗粒物,通常称为浮游粉尘或可吸入颗粒物,较长期的在大气中漂浮^[6].排放源强及参数参见表1:

* 收稿日期:2005-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目资助(50278099)

作者简介:卢军(1966-),男,四川渠县人,重庆大学副教授,博士,主要从事建筑技术通风空调方面的研究.

表 1 正常排放拟建工程废气源强及参数表

污染物	源强/kg·h ⁻¹	H×Φ/m	出口烟温/℃	烟气流/m ³ ·h ⁻¹
SO ₂	404.2	120×3.2	77	336 800
PM ₁₀	168.4			

1.2 模型概况

主要数学模型:连续方程,动量方程,浓度方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_{\phi} \quad (1)$$

连续方程、动量方程及能量方程的具体表达式见表 2.

表 2 符号及表达式

类型	φ	Γ _φ	S _φ
连续方程	1	0	0
X-动量方程	u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial x})$
Y-动量方程	v	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial y})$
Z-动量方程	w	μ	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial z}) - \rho g$
浓度方程	C	Γ _C	S _C

模拟的城市模型尺寸为 3 km×5 km×1.5 km,模型左侧为主导风入口,风速 2 m/s. 污染源为锅炉烟囱排放的有害气体及粉尘,分别模拟 2 种污染物:SO₂ 和 PM₁₀.

1.3 模拟结果

图 1、2 中的浓度为相对于源强为 1 的相对浓度值. 污染物最大落地浓度及其离源距离的模拟结果:风速为 2 m/s 时,PM₁₀ 的最大落地点浓度为 5.267 E-04,离源距离为 4 266 m,SO₂ 的最大落地点浓度为 5.55E-04,离源距离为 3 205 m.

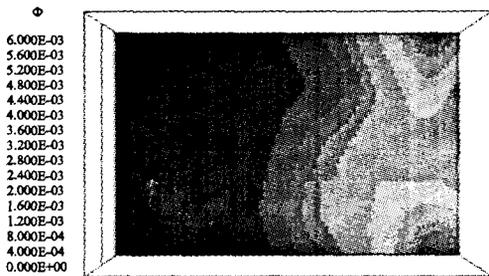


图 1 风速为 2 m/s 时 PM₁₀ 的浓度



图 2 风速为 2 m/s 时 SO₂ 的浓度

1.4 理论预测结果

理论预测计算采用点源扩散的高斯模式^[7]:

设 x 轴为扩散方向,由于理论中地面浓度是以 x 轴为对称的,则轴线 x 上的浓度为:

$$C_{(x,0,0,H)} = \frac{q}{\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

由于 σ_y、σ_z 是距离轴线 x 的函数,而且随 x 的增大而增大. 所以必然在某一距离处具有最大值即最大落地浓度为:

$$\frac{d}{d\sigma_z} \left[\frac{q}{\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] = 0 \quad (3)$$

由式(4)可查出最大落地浓度的离源距离

$$\sigma_z | x = x_{c_{max}} = \frac{H}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

式(2)~(4)中:C 为烟气浓度,mg/m³;q 为烟流的热释放率,kW;q = C_p (T_i - T_a) Q_N;C_p 为比热,kJ·kg/°C;T_i 为出口烟温,K;T_a 为环境温度,K;Q_N 为烟气流量,m³/s; \bar{u} 为烟囱出口处的平均风速,m/s;σ_y、σ_z 为污染物在 y、z 方向的标准差,m;确定 σ_y、σ_z 时需考虑到风的稳定度级别.H 为有效源高,m;H = H_i + ΔH;H_i 为烟囱几何高度,m;ΔH 为烟气抬升高度,m;ΔH = n₀q^{n₁}H_i^{n₂} \bar{u}^{-1}

系数及指数 n₀、n₁、n₂ 是根据烟囱出口是否强热源及下垫面状况确定,计算结果见表 3.

表 3 风速 2 m/s 时地面轴线最大浓度及落地距离

稳定度	污染物	最大浓度/mg·m ⁻³	离源距离/m
不稳定	SO ₂	0.086 9	1 863
	PM ₁₀	0.036 2	1 863
中性	SO ₂	0.044 1	6 215
	PM ₁₀	0.018 4	6 215
稳定	SO ₂	0.039 8	10 388
	PM ₁₀	0.016 6	1 0388

1.5 模拟结果与计算结果对比

把烟囱出口的浓度设为 1,把计算值折合成和出口的比值浓度与模拟结果进行比较(见表 4),

表 4 风速 2 m/s 模拟值与测量值对比表

污染物		最大落地浓度 × 10 ⁻⁴ /mg·m ⁻³	离源距离/m
PM ₁₀	计算值	5.82 ~ 2.67	1 836 ~ 10 388
	模拟值	7.514	4 266
SO ₂	计算值	5.82 ~ 2.67	1 836 ~ 10 388
	模拟值	7.04	3 205

用 PHOENICS 软件模拟的污染物分布与实测结果对比进行分析,理论计算是在二维情况下得出的;所以最大落地点浓度出现在 x 轴线上;而模型是三维模型中建立,烟囱不在对称中点上,而且采用梯度风的进口边界,最大落地点浓度与污染源不在同一条 x 轴上. 最大落地浓度及离源距离的模拟值均在计算值的区间

内,其偏差原因可能是由于模拟中简化了边界条件,受主导风速因素的影响,而忽略了受热作用的影响,导致最大落地点浓度变大.

通过模拟结果分析,可以看出在以污染源的最大落地浓度点为圆心,2 000 m 为半径的区域内,PM₁₀ 的浓度值从 0.263 3 mg/m³下降到 0.058 mg/m³,SO₂ 的浓度值从 0.844 8 mg/m³下降到 0.216 9 mg/m³;污染源的随着污染物浓度半径每扩大 200 m,其浓度值就减小 10%.

2 涪陵区大气污染情况的模拟

2.1 涪陵区城市概况

涪陵区位于四川盆地东部,重庆市中部,长江乌江交汇处,是长、乌两江物资集散和水陆交通枢纽.现状城市人口 23 万,建成区面积 10.8 km².涪陵区年平均风速小,平均风速 1 m/s;静风频率大,年静风率达 57%;风向频率分散.常风向为东北风.湿度大、云雾多、日照少.地貌以丘陵台地为主,长江自西向东北斜贯全境,在涪陵城区与南来的乌江交汇,形成 T 型河谷通道,又将全区划分为江东、江北、江南三大片.

2.2 模型概况

数学模型同式(1),为简化模拟的城市模型,没有包括整个涪陵区,但包含了主要居民区商业区,尺寸为 12 km × 20 km × 1.5 km,长宽为真实地形的 0.1 倍,地形高度为 230 m.模型左侧为主导风入口,模拟风速采用 0.2 m/s,该区风速小,静风频率大.

用浓度较大的落地点周围的区域作为污染源,集中供热的污染源大小为 400 m × 400 m,污染源的浓度值由该区域的浓度变化曲线积分得出,PM₁₀ 为 0.164 mg/m³,SO₂ 为 0.394 mg/m³;分散供热的污染物浓度模拟是假设涪陵市里各工业区采用单独的锅炉,用集中供热时的总污染量平均分给这 5 个地点,用文中所介绍的模拟方法,可得到分散供热的各个污染源大小为 200 m × 200 m,污染物源浓度 PM₁₀ 为 0.026 9 mg/m³,SO₂ 为 0.064 6 mg/m³,模拟时,污染源按比例大小输入源值.集中供热时,污染源在龙桥电厂,分散供热时,污染源位置见图 3.

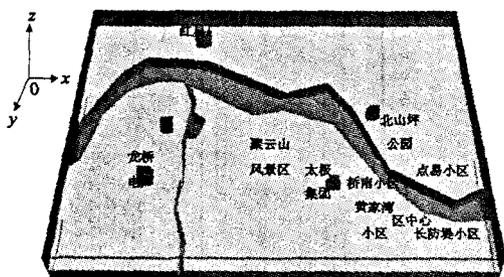


图 3 模型概况图

2.3 模拟结果

污染物分布结果采用了高度为 250 m 水平面上的污染物浓度值.

2.3.1 污染物浓度分布

分散与集中供热模型的 PM₁₀, SO₂ 的浓度分布见图 4~7:

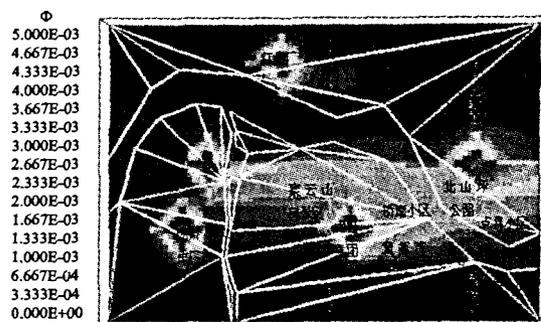


图 4 分散污染源时 PM₁₀ 浓度

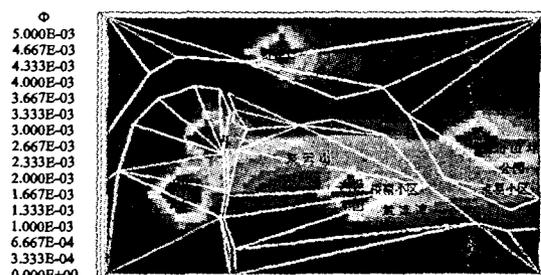


图 5 分散污染源时 SO₂ 浓度

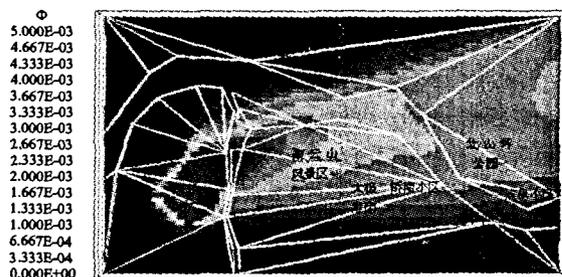


图 6 集中污染源时 PM₁₀ 浓度

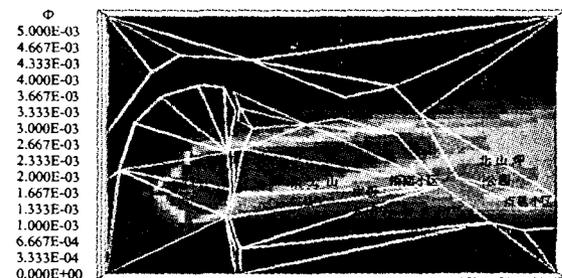


图 7 集中污染源时 SO₂ 浓度

2.3.2 浓度值对比

把模拟结果的比例值换算成浓度值,就很容易进行对比,选取城市中的桥南小区的污染物浓度值作为对比(见表 5):

表5 桥南小区污染物浓度对比表 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

供热方式	PM ₁₀ 的浓度值	SO ₂ 的浓度值
分散供热	6.46 E-04	4.85 E-03
集中供热	1.97 E-04	1.31 E-03

2.4 模拟结果分析

从图4~7中可较为直观地看出污染物浓度值随着城市风向的方向减弱的程度远低于非风向的方向,在集中供热时尤为明显:沿着城市主导风向,其污染物一直影响到城市边缘,尤其是SO₂,影响范围长度达18 km.而沿着非主导风向的方向,浓度值在2 km之内就能减少80%以上.可见对于烟囱排放的污染物分布主要是受城市风向的影响.

由于集中供热后大型锅炉改进了污染物排放得控制技术,所以污染物的出口浓度降得更低,所以很明显集中供热所产生的污染区域要远远小于分散供热.虽然分散的污染源虽然比较小,但总的污染面积大,而且有一些污染区域靠近居民区及商业区等人群密集区,对这些地点的空气质量影响较大;而集中供热以后,龙桥附近的污染源变大,但受污染物影响的总区域要小的多,虽然龙桥处于城市主导风向的上风,但是在主城区(桥南小区处)的污染物浓度仅为污染源浓度的1%.而分散的污染源对主城区(桥南小区处)的浓度为污染源浓度的5%.集中供热产生的污染面积大约只有分散供热的20%,受污染的区域减小,特别是对居民区等人口密集区的污染大大降低了.

3 结论

一般情况下,集中供热的污染源要比分散供热的污染源大,在源强附近的大气污染比分散供热的污染

程度大,但是污染的扩散方向受城市的主导风向影响较大,污染物浓度向扩散方向的两旁下降的较快,污染面积没有也分散污染源的情况广.但是,集中供热的方案对城市的大气污染并不是任何情况下都比分散供热的污染小,在从环境的角度讨论集中供热与分散供热,不单单要考虑污染源的情况,还要结合该城市的地形特征,气象条件,城市现有布局及城市的长期规划.

利用一些功能完善、方便使用的计算机模拟软件(如PHOENICS)可以较为准确并直观的模拟大气污染情况,而且方法较为简便,可以节省大量人力物力.尤其是在城市规划中利用计算机模拟能更为直观的预测未来城市的大气污染情况,寻求整体的最优化方案,对城市规划方案的确定可以起到辅助作用.

参考文献:

- [1] 曹玉文. 营口经济开发区供暖锅炉污染分析[J]. 辽宁城乡环境科技, 2001, 21(4): 18-19.
- [2] 陈军, 范寿波, 王锦成. 我国工业锅炉污染存在的问题及治理对策[J]. 中国环境管理, 2003, 22(2): 26-27.
- [3] 柴新玲, 齐金池. 根本改善乌鲁木齐市大气环境质量的探讨[J]. 新疆环境保护, 1996, 18(31): 33-35.
- [4] 王容, 潘丽英. 乌鲁木齐市冬季大气污染特征及区域集中供热的环境效益浅析[J]. 干旱环境检测, 1997, 11(3): 154-159.
- [5] 陈静, 卢军, 刘淑丽. 山地城市室外空气热环境与大气污染[J]. 贵州工业大学学报, 2003, 32(增1): 91-93.
- [6] 刘忠. 锅炉烟尘污染的成因剖析及防治对策[J]. 河南城建高专学报, 1996, 5(3): 9-12.
- [7] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

Numerical Simulation of Air Pollution

LU Jun¹, FENG Yuan², GONG Qi²

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment Under the State Ministry of Education;

2. College of Urban Construction and Environment engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To compare the difference of air influences in Fuling county between adopting Central heating at Longqiao power station and dispersing the heating all around the county, the authors simulate the distributing of the city air pollution(SO₂, PM₁₀) with the computational fluid dynamics software-PHOENICS. The simulation results show that the pollution source are much wider. Because the main reason infecting the diffused of pollution is the city dominant wind, the decrease of the pollution along the side of city dominant wind is tremendous, the percentage of the pollution recedes from 5% to 1%, and the polluted area of the central heating is 20% of the area of separate heating, especially the pollution of the area with high population is decreasing remarkably such as the residential area. The simulation has proven the advantage of the central heating on the point of the air pollution. In the meanwhile, computer simulation is an accurate and convenient means to help analyze air pollution of urban.

Key words: simulation; pollution; central heating; PHOENICS