

环境科学

深圳妈湾电厂烟气脱硫工程 对区域 SO₂改善作用研究

庄毅璇^{1,2} 梅立永² 周小舟² 刘宝章³

(重庆市环境保护工程设计研究院有限公司¹,深港产学研环境技术中心²,深圳 518057;大气污染控制国家重点实验室³,北京 100871)

摘要 深圳妈湾电厂地处海、陆交界,面临大海,背靠起伏不平的山地和台地。为了较准确评估妈湾电厂治理脱硫效果和周围环境质量改善程度,选用合适模型十分重要。结合电厂和深圳市南山区实际情况,选用诊断风场模式与轨道烟流模式相结合的模型,该模型能较细致地反映海陆风转换、流场辐散、辐合时的污染物浓度分布特征,是中、小尺度范围高架连续点源污染物浓度预测较为理想的模型。研究表明:该模型能够在流场复杂、气象条件多变的情况下,预测精度较好;通过预测分析深圳妈湾电厂采取了烟气脱硫工程后对南山乃至深圳宝安地区的大气环境中 SO₂ 的改善作用明显。

关键词 轨道烟流模式 风场诊断模式 电厂 SO₂

中图法分类号 X701.3; **文献标志码** A

1 妈湾电厂烟气脱硫工程简述

深圳妈湾电厂总体规模为 6 × 300 MW 燃煤机组,一期工程建设 1#、2#机组(2 × 300 MW),已于 1997 年 3 月通过竣工验收,当时未安装脱硫设备。二期工程(4 × 300 MW)1993 年国家计委立项,1994 年 8 月国家环保总局审批,要求电厂二期工程 4 号机组(300 MW)同步建设海水脱硫装置,该脱硫设施于 1999 年 8 月通过验收。二期工程的 5#、6#号机组续建工程仍采用海水脱硫工艺,于 2004 年 10 月通过验收。随后,电厂对 1#、2#、3#机组开始脱硫工程建设,于 2007 年 11 月完成了全部机组的海水脱硫设施建设。

海水脱硫工艺是利用天然海水的碱度达到脱除烟气中 SO₂ 目的一种脱硫方法。取部分升温后的海水进入脱硫塔,在脱硫吸收塔内海水喷淋洗涤进入吸收塔内的燃煤烟气,烟气中的 SO₂ 被海水吸

收而除去,净化后的烟气经除雾器除雾、烟气换热器加热后排放。

1#、2#、3#机组海水脱硫前 SO₂ 排放量为 20 808 t/a,脱硫后为 4 770 t/a,降幅达 77%。为了验证脱硫效果,本研究结合电厂回顾性评价,采用三种方法:一是电厂排放口烟气排放量和排放浓度实测;二是南山地区污染物浓度现场实测;三是模式验证和预测。下面重点介绍研究中模式选取和应用成果。

2 模型选取

常用的高斯烟流模式有其简单方便的优点,但它是以风场的空间均匀和时间上的准定常为前提的,在不稳定条件和复杂地形条件下,其预测值会出现较大偏差^[1]。本文从妈湾电厂和深圳市南山区实际下垫面情况出发,选用风场诊断模式和轨道烟流模式相结合的模型,客观评估妈湾电厂脱硫效果和周围环境改善程度。所选用的轨道烟流模式在形式上与高斯模式相似,但本质上为拉氏烟团模式的简化。Nappo 在 1978 年曾概述过该模式的优缺点^[2],Bass 在 1979 年对轨道模式、正态模式和欧

2010 年 4 月 30 日收到

第一作者简介:庄毅璇(1979—),浙江人,工程师,硕士。研究方向:环境影响评价、环境规划。

拉扩散模式在理论上进行过联合比较研究^[2],刘宝章等将其与常用的高斯模式在宁波地区与海口地区污染物浓度预测中都作了比较研究^[3],发现该模式能够较细致地反映海陆风转换、流场辐散、辐合时的污染物浓度分布特征,是中、小尺度范围高架连续点源污染物浓度预测较为理想的模型。

深圳妈湾电厂位于深圳市南山区南头半岛西南端,距深圳市中心约25 km,整个电厂是在原右炮台众山的基础上,采用定向爆破劈山填海而成。全厂占地面积39.43 kh,填海面积占总面积的70%,厂区背山面水,东侧为牛羊山,海拔126.7 m;东北侧为小南山,海拔288.6 m;南邻赤湾港;西部与珠江伶仃洋水域相连。地处海陆交界,极易形成复杂的海、陆交界热内边界层和其他类型的大气边界层结构。

南山全区受区外缘羊台山东翼、铁岗和塘朗山等控制;北端的羊台山花岗岩体的环状构造,影响着本区略带环状的丘陵分布。区内大部分地区属台地,地形起伏变化较大,地形复杂。

深圳妈湾电厂正位于南山区这一复杂地形内,又是海陆交界的高架点源排放大户,若采用简单模式来评估大型机组脱硫效果的好坏与优劣,其结果必有偏颇。为了较准确评估妈湾电厂治理效果和南山区环境质量改善程度,研究中选用了轨道烟流模式与流场诊断模式^[4]。

2.1 轨道烟流模式

轨道烟流模式是一种简化的烟团积分模式的做法。它的烟流轴线为一组分段直线,近似反映了污染物的传输路径,如图1所示。

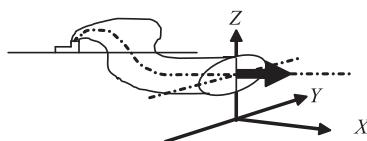


图1 轨道烟流示意图

已知烟团积分模式为

$$C = \int_0^{\infty} \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) dt \quad (1)$$

式(1)中,C为地面(x,y)位置上的污染物浓度,Q为污染源(烟团)的源强, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为x、y、z三方向的扩散参数,u为风速,t为扩散时间,x为下风方向距离,y为垂直于x的横向距离,H为排放源的有效高度。

当t=T=x/u时,其浓度达到最大值,在t趋于0或趋于无穷时,其浓度就变得很小。当烟团积分时间在2δt时段内,于是得到近似方程:

$$C = \int_{T-2\delta t}^{T+2\delta t} \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) dt = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

方程(1)要求稳定、均匀的气象条件,方程(2)若在接受点附近流线为直线且T前后2δt周期内气象条件均匀和不变均可应用。通常计算污染物浓度为1 h的平均浓度,流场也是1 h的平均流场。因此,式(2)完全能够满足实际需要。

式(2)即为轨道烟流模式的基本公式。在研究范围内风向和风速可以有时空变化,只要2δt时间内接受点附近流线和气象条件稳定即可,也就是在此时段内各流线段为直线,气象条件不变。式(2)的形式与高斯烟流模式相似,但在计算中u值是分段的,每一段的x沿实际风的去向,y方向与风向垂直。在具体计算中,又分几种情况进行,在风速不太小,无混合层,又有地面反射时,直接应用式(2)。

当有混合层时,又可分两种情况:

当H≥L(L为混合层高度), $\sigma_z > 1.6L$ 时,

$$C = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} u \sigma_y L} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (3)$$

当 $\sigma_z < 1.6L$ 时,

$$C = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \sum_{n=-k}^k \left[-\frac{(H + 2nL)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (4)$$

式(4)中,k为反射次数,一般取3即可。

在静风、小风(风速u<1 m/s)时,沿风向的扩散不能忽略,高架源的地面浓度往往采用式(5)。

$$C = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \gamma R^2} \exp\left(-\frac{u^2}{2\alpha^2}\right) \left[1 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{ux}{\alpha R} \exp\left(\frac{u^2 x^2}{2\alpha^2 R^2}\right) \right] \times$$

$$\operatorname{erfc}\left(-\frac{ux}{\sqrt{2}\alpha R}\right) \quad (5)$$

式(5)中, R 为离源的距离, u 为小风风速, $\sigma_x = \sigma_y = \alpha t$, $\sigma_z = \gamma t$, α, γ 为常数, erfc 为误差函数。

本模式所采用的扩散参数为布里格斯提出的扩散参数(城市地形), 见表 1。

表 1 布里格斯提出的扩散参数与扩散距离关系(城市地形)

大气稳定度	σ_y/m	σ_z/m
A, B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1+0.001x)^{1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$

稳定性分类和抬升高度采用国标推荐的方法。

2.2 流场诊断模式

风场诊断模式是由实际观测资料来构造当时的三维风场。诊断模式运算需要首先采集多个气象站点的风向与风速等观测数据, 通过数据交换机制汇总到模式计算平台中, 通过流场诊断模式计算, 生成三维风矢量数据。模式采用的风场诊断方法大致可以分为两部分: 第一部分是风场初始化, 即利用观测数据内插外推出整个模式各网格的风速初值; 第二部分是将这样得到的初始风场调整到符合质量守恒(即运动的连续性)条件的约束, 同时使调整后的风场与初始场的总体偏差为最小。

2.2.1 控制方程

任一流体微团在运动过程中体积和形状一般都要发生变化, 但是流团的质量是不会变化的。大气作为一种流体也遵循质量守恒原理, 故连续方程是描述大气运动的基本方程之一。

对于不可压缩流体的连续方程为:

$$\frac{dp}{dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (6)$$

u, v, w 分别是直角坐标三个方向 x, y, z 的风速分量, x, y 为水平方向, z 为垂直方向。为保证物理上的合理性和数值方便, 一般采用地形随动坐标, 并对垂直坐标适当变换, 即为 σ 坐标, 于是连续方程可改为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

在有地形起伏的情况下, 为简化边界条件的处理,

将模式坐标取为 $xy\sigma$ 坐标, 其中水平方向 x, y 标取为通常的直角坐标, 垂直方向 σ 坐标取如下形式:

$$\sigma = \frac{z - h_s}{H(x, y) - h'_s}, \quad (8)$$

$$\text{式(8)中, } \begin{cases} h_s(x, y) = h'_s(x, y) + 10 \\ H(x, y) = Z_s + h'_s(x, y) \end{cases} \quad (9)$$

Z 为直角坐标系中的垂直坐标, h_s 是模式区域内地形的相对高度, h'_s 是模式下边界高度, $H(x, y)$ 是模式上边界高度, σ 是变换后的垂直坐标。在此 $xy\sigma$ 坐标系中, 不可压缩性大气运动的连续性方程可以表示为:

$$\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial \sigma} = 0 \quad (10)$$

$$\text{式(10)中: } u^* = u\Delta H(x, y), v^* = v\Delta H(x, y), \Delta H(x, y) = H(x, y) - h'_s(x, y), w^* = \frac{d\sigma}{dt}\Delta H = w - \left(u \frac{\partial h_s}{\partial x} + v \frac{\partial h_s}{\partial y} \right) - \sigma \left[u \frac{\partial \Delta H(x, y)}{\partial x} + v \frac{\partial \Delta H(x, y)}{\partial y} \right] \quad (11)$$

u^*, v^*, w^* 分别为 $xy\sigma$ 坐标系下水平和垂直方向上的风速分量, $\Delta H(x, y)$ 为模式上下边界高度差。

2.2.2 风场的调整

风场的调整要使得 $xy\sigma$ 坐标下的插值风场满足连续性方程, 同时使调整后的风场与初始场的总体偏差为最小。即求下式的极小值:

$$E(u^*, v^*, w^*, \lambda) = \int_v \alpha_1^2(u^* - u_0^*)^2 + \alpha_1^2(v^* - v_0^*)^2 + \alpha_2^2(w^* - w_0^*)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial \sigma} \right) dx dy dz \quad (12)$$

这里, u^*, v^*, w^* 表示调整后的风场, u_0^*, v_0^*, w_0^* 为初始插值风场, λ 为拉格朗日乘子, α_1, α_2 是代表水平及垂直方向观测误差大小的系数。使得式(12)取极小值的欧拉-拉格朗日方程组为:

$$u^* = u_0^* + \frac{1}{2\alpha_1^2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial x}, v^* = v_0^* + \frac{1}{2\alpha_1^2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial y}, w^* = w_0^* + \frac{1}{2\alpha_1^2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial \sigma} \quad (13)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial \sigma} = 0 \quad (14)$$

其边界条件为:

$$\eta_x \lambda \delta(u^*) = 0, \eta_y \lambda \delta(v^*) = 0, \eta_\sigma \lambda \delta(w^*) = 0 \quad (15)$$

由式(12)、式(13)可得:

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \sigma^2} = -2\alpha_1^2 \left(\frac{\partial u_0^*}{\partial x} + \frac{\partial v_0^*}{\partial y} + \frac{\partial u_0^*}{\partial \sigma}\right) \quad (16)$$

方程式(16)可由边界条件式(15)用数值方法解出。将求出的解代回式(13),即可实现对风场的调整。

3 参数选取

3.1 初始风场的获得

初始风场由实测资料插值而得,实测资料主要有地面测站的水平风观测、当地的大气稳定度类型、高空地转风资料以及垂直风速廓线资料。本研究收集了监测期间研究范围内12个气象站的地面气象资料,利用这些气象资料可作出逐时流场图,然后输入轨道模式进行预测。因缺乏高空探测资料,所以流场只限于地面流场的诊断。

3.2 主要点源排放量

南山区大气污染源较多,90%的大气污染物排放,集中在电力、热力的生产和供应业。为简化计算,模型选取了南山区污染物排放量较大的几个点源。其中部分数据引用《深圳市南山区环境保护“十一五”规划研究报告》,妈湾电厂和华晶玻璃有限公司数据引用其环评和设计文件。

4 计算结果及讨论

4.1 流场特征

因研究区域下垫面比较复杂,大气污染物浓度预测不能采用平直气流传输、扩散模式,本研究采用轨道烟流模式。按流场诊断模式功能,根据收集的地面气象资料,可逐时绘制流场图。为节省篇幅,本文选取研究区域冬季典型日(2009年1月10日20时)和夏季典型日(2008年7月29日16时)的流场特征和污染物浓度预测结果进行分析。

从图2可看出:冬季流场比较单一,以北风和东北风为主,污染物通过平流输送对市区影响很小,尤其是南山区高架点源基本影响南部海区;夏季情况则完全不同,夏季盛行西南风和南风,加上地形作用,流场出现辐合、辐散现象,流场辐合区污染物容易聚集,流场辐散区污染物容易稀释。下面根据上述实际流场和南山区现有高架源与线源分布作预测。

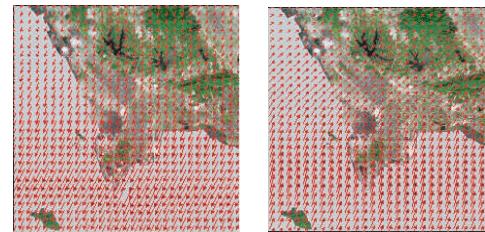


图2 冬季代表性流场(左)和夏季代表性流场(右)

4.2 SO₂浓度预测

据调查,妈湾电厂1~3#机组采取海水脱硫措施后,SO₂排放量由原来的2.08万t/a降到0.48万t/a,降幅77%;南山热电油改气工程完成后,SO₂排放量由原来的9.93万t/a降到6.93万t/a,降幅30%。为阐明这两家电力企业改造后对大气环境中SO₂的综合贡献,这里以改造前后对某些敏感点环境改善的具体数据来说明。

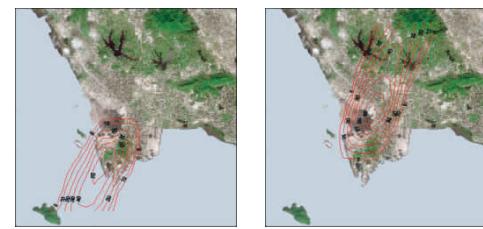


图3 冬季典型日(左)和夏季典型日(右)SO₂浓度分布图

以青青世界和南头中学为例,脱硫措施实施后,青青世界SO₂地面浓度降低40%—43%,南头中学SO₂地面浓度降低30%—39%。

5 结语

(1) 采取脱硫措施后的预测数据与现场监测数

据基本相符,验证采用烟流轨道模式和现实流场相结合的预测方法进行妈湾电厂脱硫工程对区域大气SO₂的改善效果进行研究是合理且有效的。

(2) 根据对选取的敏感点的预测表明,妈湾电厂脱硫工程的上马对于区域环境质量改善效果十分明显。

参 考 文 献

- 1 Nappo Jr C J. Workshop on long-range trajectory-puff and plume modeling of continuous point source emissions. NOAA Technical Memo,

ERLARL-72. 1978

- 2 Bass A, Beckley C W, Scire J S, et al. Development of mesoscale air quality simulation models, Vol. 1. Comparative sensitivity studies of puff, plume, and grid models for long-distance dispersion. U. S. Environmental Protection Agency, EPA600/7-80-056, Research Triangle Park, NC. 1979
- 3 刘宝章. 宁波地区大气环境现状评价与规划研究. 科技通报, 1994;(1):38—42
- 4 刘宝章, 潘林林. 轨道烟流模式在复杂气象条件下的应用. 科技通报, 1993;(11):359—363

Research on the Effect of Shenzhen Mawan Power Plant Flue Gas Desulphurization Project on the Improvement of Regional SO₂ Concentration at the Atmosphere

ZHUANG Yi-xuan^{1,2}, MEI Li-yong², ZHOU Xiao-zhou², LIU Bao-zhang³

(Chongqing Institute of Environmental Engineering Co., Ltd¹, Chongqing 400700, P. R. China;

Shenzhen-Hongkong Institution of Industry Education & Research Environmental Technique Center², Shenzhen 518057, P. R. China;

National Key Laboratory of Atmospheric Pollution Control³, Beijing 100871, P. R. China)

[Abstract] Shenzhen Mawan Power Plant is located in the boundary between the sea and the land, facing the ocean and backed by undulating hills and terraces. In order to accurately assess the desulfurisation result of the Mawan power plant, also the improvement level of environmental quality of the surroundings, it is very important to choose the appropriate model. Considering the actual situation of both the power plant and Shenzhen Nanshan District, model that combines wind field diagnosis mode and plum track mode was used. This model can detailed reflect distribution features of the pollutant concentration during land-sea breeze conversion, flow field divergence and flow convergence, and ideal model to forecast pollutant concentration of elevated continuous point sources in small and medium scale. The research shows that the forecast accuracy of this model is better under complex flow field and variable weather conditions. The analysis reveals that after taking the flue gas desulphurization project in Mawan power plant, the SO₂ concentration at the atmosphere in Shenzhen Nanshan and Baoan District has been significantly improved.

[Key words] plum track mode wind field diagnosis mode power plant SO₂