

基于高斯模型的武汉市区 PM_{2.5} 扩散问题研究^①

李威凌^② 吴怀宇^③ 陈 洋

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081)

摘 要 研究了武汉市区 PM_{2.5} 的扩散情况。首先从时间方面根据历史数据分析了 1、2 月份 PM_{2.5} 浓度的扩散规律。由于 PM_{2.5} 的形成和演变受气压、温度、湿度、风速风向等诸多因素的影响,分别采用高斯模型和空间插值法对 PM_{2.5} 空间方面的扩散情况进行了模拟。其中高斯模型主要是针对高架扩散源的情形对 PM_{2.5} 受风因素影响的扩散情况进行建模,并对 PM_{2.5} 的扩散过程进行仿真。而空间插值法则通过插值计算得到其他区域的 PM_{2.5} 浓度,并模拟了武汉市区 PM_{2.5} 空间分布的情况。结果表明,空间插值法误差大,且要根据数据实时计算,不能很好地预测;高斯模型考虑了风速风向的影响,实时性和预测性好,特别适用于应对突发情况,可为相关部门提供污染评估决策和依据。

关键词 PM_{2.5}, 空气质量分指数, 空间插值法, 高斯模型

0 引言

PM_{2.5} 是指空气环境中直径小于等于 2.5 μm 的细颗粒物 (particulate matter, PM)。研究指出, PM_{2.5} 是对人体健康危害最大的颗粒物,因为它能吸附更多的细菌、病毒和各种对人体健康有害的污染物。雾霾天气对人体和环境造成的危害与空气中 PM_{2.5} 的浓度成正相关^[1]。PM_{2.5} 的形成机理和过程非常复杂。它可产生于植物花粉和孢子、土壤扬尘、森林火灾、火山爆发等自然因素,也可产生于燃料燃烧、工业生产过程排放、交通运输排放等人为因素。人为因素产生的 PM_{2.5} 又可分为一次颗粒物 (即由排放源直接排放到大气中的) 和二次颗粒物 (即通过与大气组成成分发生化学反应后生成的)。PM_{2.5} 主要由水溶性离子、颗粒有机物和微量元素等组成^[2-4]。

目前,对细颗粒物 PM_{2.5} 的成因、相关因素以及对人体、环境的危害还在大量研究中。文献[5]通过空气质量指数来评估空气的污染情况。对于 PM_{2.5} 的扩散问题,文献[6]采用 CALPUFF 拉格朗日烟羽模型研究了一次细颗粒 (PM_{2.5})、SO₂ 和 NO_x 等物质的扩散情况。该模型适用于长距离的传

输模拟,可以处理复杂的三维气象数据并计算 PM_{2.5} 的浓度。但是该模型中的 CALPUFF 参数具有不确定性,原因主要在于数据需实时更新。此外,在地质统计学中常用空间插值法^[7]根据已知点的数据推求其它点的数据,进而模拟出 PM_{2.5} 浓度的空间分布图。但该方法只能根据现有数据推算其他区域,误差大,且不能考虑其他因素的影响,如风、湿度、温度等。本项目基于高斯模型研究了武汉市区 PM_{2.5} 扩散问题。首先根据武汉市区 9 个监测点的数据,模拟并分析了 PM_{2.5} 浓度随时间变化的规律以及它的空间浓度分布图,然后在此基础上建立了 PM_{2.5} 的高斯扩散模型。

1 武汉市区 PM_{2.5} 的概况

1.1 武汉市空气监测概况

武汉地处长江中下游,东经 113.68°—115.08°,北纬 29.97°—31.37°,全境面积为 8494.41 km²,建成区面积 807.54 km²,森林面积 1680 km²,森林覆盖率 26.80%。武汉属亚热带季风性湿润气候区,具有雨量充沛、日照充足、四季分明,夏高温、降水集中,冬季稍凉湿润等特点。武汉市区共有 9 个 PM_{2.5} 监测点,每小时发布 1 次监测数据,每天监测的污染

① 国家自然科学基金(61075087, 61203331)资助项目。

② 男,1990 年生,硕士生;研究方向:数据分析与处理,建模与仿真;E-mail: wellinglee@foxmail.com

③ 通讯作者,E-mail: wuhy@wust.edu.cn

(收稿日期:2014-04-28)

物项目有二氧化硫、二氧化氮、可吸入颗粒物(PM10)、一氧化碳、臭氧、细颗粒物(PM2.5),市民可通过市环保局网站及时获得空气质量信息^[8]。这 9 个监测点的位置分别位于:江岸花桥二村花桥小学分校、沌口公共卫生服务中心、汉阳琴台路月湖公园、武昌首义路 198 号(武昌区文体局)、东湖梨园风景区内、青山吉林街中南地勘局、江岸江滩市政广场、东湖开发区华师园北路 11 号(宇虹环保科技有限公司)和东西湖区吴家山中学,如图 1 所示。



图 1 武汉市区 9 个 PM2.5 监测点分布图

空气质量的监测、预报和控制等问题,国家和地方政府都制定了相应政策和管理办法。2012 年 2 月 29 日,环境保护部公布了新修订的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),增设了对 PM2.5 的监测。此外,还同步实施了《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633—2012)。对于污染物项目 P , 它的空气质量分指数(individual air quality index, $IAQI$)计算公式如下:

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(C_p - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \tag{1}$$

式(1)中, $IAQI_p$ 为污染物项目 P 的空气质量分指数; C_p 为污染物项目 P 的质量浓度值; BP_{Hi} 为与 C_p 相近的污染物浓度限值的高位值; BP_{Lo} 为与 C_p 相近的污染物浓度限值的低位值; $IAQI_{Hi}$ 为与 BP_{Hi} 对应的空气质量分指数; $IAQI_{Lo}$ 为与 BP_{Lo} 对应的空气质量分指数。污染物项目的浓度限值可在文献[9]中查得。空气质量指数(air quality index, AQI)为空气质量分指数 $IAQI_p$ 的最大值,且该污染物为首要污染物。由此可见,空气质量指数为无量纲数,指数越大,污染越严重,且空气质量分指数可间接反映

污染物浓度的大小,指数越高说明污染物浓度越大。空气质量指数级别如表 1 所示^[9]。

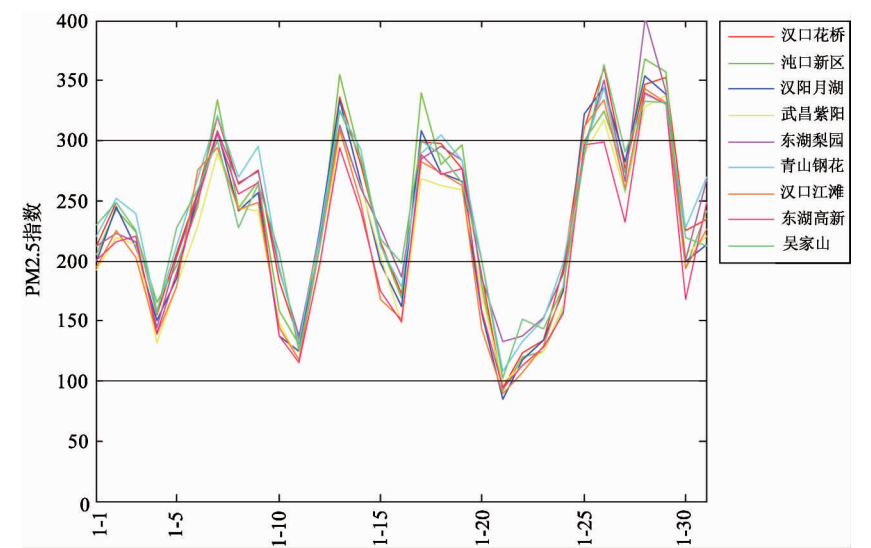
表 1 空气质量指数及相关信息

空气质量指数	空气质量级别	注意事项
0 ~ 50	1 级(优)	各类人群可正常活动
51 ~ 100	2 级(良)	极少数异常敏感人群应减少户外活动
101 ~ 150	3 级(轻度)	易感人群症状有轻度加剧
151 ~ 200	4 级(中度)	一般人群适量减少户外运动
201 ~ 300	5 级(重度)	健康人群普遍出现症状
> 300	6 级(严重)	一般人群应避免户外活动

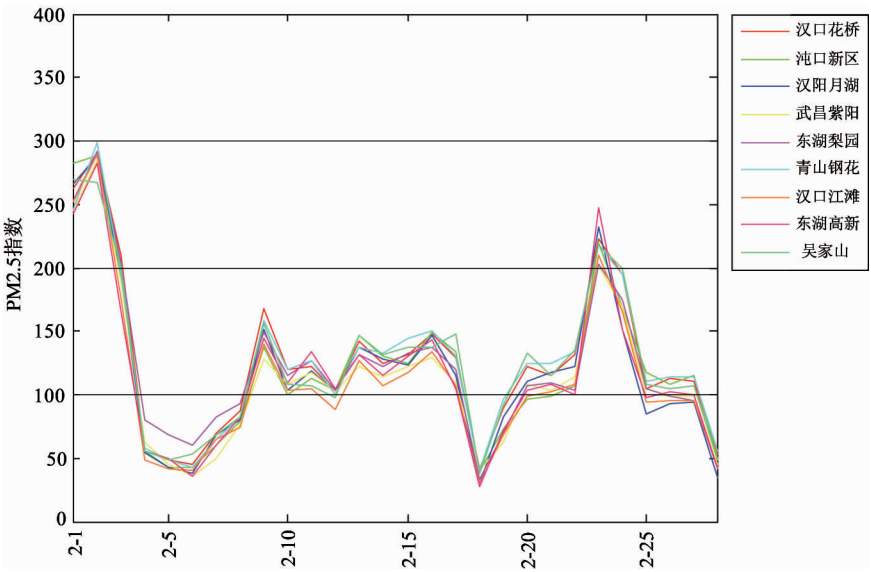
1.2 武汉市区 PM2.5 随时间变化的规律

根据武汉市环保局提供的数据,可以画出 2014 年 1、2 月份武汉市 9 个检测点的所测 PM2.5 浓度变化的走势图分别如图 2(a) 和(b)所示。

对比图 2(a) 和(b)可知,武汉市区 1 月份 PM2.5 指数大多在 200 以上,也就是重度污染。而 2 月份的情况则明显偏好,几乎处于轻度污染状态。这表明 PM2.5 与季节存在一定关系:冬天气温低,气压高,PM2.5 不易扩散;到了 2 月,随着温度的升高,湿度变大,降雨量增多,也促使了 PM2.5 的扩散和沉降^[10]。图 2(a) 和图 2(b)的共同点如下:(1) 每天每个监测点的浓度变化趋势大体相同;(2) 这 9 个监测点中,汉口花桥、青山钢花和吴家山这三个地区最为严重,东湖梨园、东湖高新和汉口江滩相对较好。这表明武汉这个大环境对于每个监测点的浓度影响是相同的。但不同的监测点所测得的 PM2.5 指数的差异性表明监测点与所处的功能区有关,不同的区域污染情况不一样。从所处的地理位置来看,汉口花桥监测点附近多是车道不宽的辅路和狭窄的巷道,老旧社区的住宅楼群密集,导致空气不易流通,通风行差;青山钢花监测点半径 5km 的范围内,涵盖了包括和平大道、友谊大道、建设一路、二七长江大桥引桥等主次干道及重要通道,车流量大,而且青山区工业多,汽车尾气和工业废气是导致 PM2.5 浓度高的最主要原因;位于东西湖区的吴家山监测点附近有大量的物流运输企业,大型货车较多引发空气污染。而汉口江滩、东湖梨园附近都有大片绿地和湿地,四周花木繁茂,地势开阔,车流量小,因此 PM2.5 浓度也偏低。



(a) 1 月份 PM2.5 走势图



(b) 2 月份 PM2.5 走势图

图 2 武汉市区 9 个监测点的 PM2.5 指数随时间变化的走势图

2 PM2.5 的扩散研究

PM2.5 作为大气污染的主要污染物,会不断地产生并扩散。PM2.5 的扩散和衰减受众多因素影响,因其来源和产生机理复杂,扩散方式和程度与多种因素相关,如气压、温度、湿度、风速风向、地理位置和城市发展等。

2.1 高斯扩散模型

在大气环境影响评价的实际工作中,大气扩散的计算通常以高斯大气扩散模型为主。它是一类简单实用的大气扩散模型,在均匀、定常的湍流大气中

污染物浓度满足正态分布假设,由此可推导出一系列高斯模型扩散公式^[11]。连续点源一般指排放大量污染物的烟囱、放散管、通风口等,如图 3 所示。安置在地面的排放口称为地面点源,处于高空位置时称为高架点源。本文主要针对高架连续点源导致的 PM2.5 扩散规律进行研究。在如图 3 所示的空间坐标系中,沿风方向的为 x 轴,垂直于风方向的为 y 轴, z 轴垂直于 xoy 平面。 H 为点源的有效源高,它由两部分构成:一是烟囱所在的有效高度 h ;二是在实际扩散中烟囱排出时,由于受到热力抬升和本身动力抬升,进而产生的一个附加高度 Δh ,因而 $H = h + \Delta h$ 。设点源处的坐标为 (x,y,h) ,则有效源位于

z 轴上 H 高处^[12]。

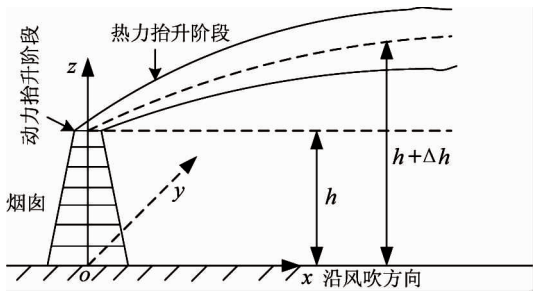


图 3 连续点源扩散过程示意图

对于高架点源,其高斯扩散模型公式为

$$c(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi|\vec{u}|\sigma_y(x)\sigma_z(x)}\exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y(x)}\right] \cdot \left\{\exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z(x)}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z(x)}\right]\right\} \tag{2}$$

$$\sigma_y(x) = ax^c \tag{3}$$

$$\sigma_z(x) = bx^d \tag{4}$$

式(2)~(4)中: c 为空间任一点 (x,y,z) 的PM2.5浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$); Q 为源强,即单位时间PM2.5的排放量($\mu\text{g}/\text{s}$); $|\vec{u}|$ 为平均风速(m/s); $\sigma_y(x)$ 、 $\sigma_z(x)$ 分别为PM2.5沿 y 轴方向和 z 轴方向扩散系数,与大气稳定性和水平距离有关,并随 x 的增大而增加。 a,b,c,d 均为常系数,其具体值参考我国环境评价标准采用的系数值——《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》(GB/T 3840—1991)。

式(2)中,考虑高架点源对地面浓度,则令 $z = 0$,可得

$$c(x,y,0,H) = \frac{Q}{\pi|\vec{u}|\sigma_y(x)\sigma_z(x)} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y(x)} + \frac{H^2}{\sigma_z(x)}\right)\right] \tag{5}$$

进一步考虑沿 x 轴线方向(即沿风方向)的浓度,则再令 $y = 0$,可进一步简化:

$$c(x,0,0,H) = \frac{Q}{\pi|\vec{u}|\sigma_y(x)\sigma_z(x)}\exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z(x)}\right] \tag{6}$$

PM2.5在地面(即 $z = 0$ 平面)受风影响的扩散示意图如图4所示。由式(6)画出的点源在 xOy 平面的高斯扩散仿真图如图5所示。

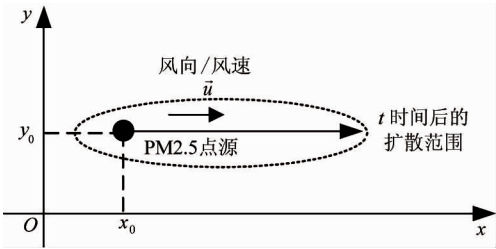


图 4 PM2.5 受风影响的扩散示意图

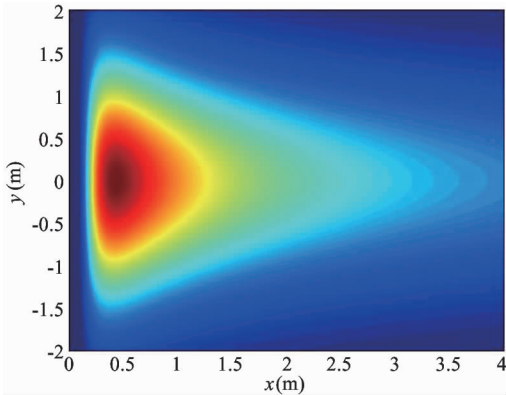


图 5 点源高斯扩散仿真图

图5中,深红色部分的区域表示点源,此处浓度最高,并受风影响向四周扩散,沿风方向浓度逐渐降低,伴随颜色的变化。

2.2 空间插值法

空间插值法是一种通过已知点的数据,外推求解未知区域数据的方法。它基于“地理学第一定律”的基本假设:在空间位置上越靠近的点具有相同特征值的可能性越大;而距离越远的点,其具有相似特征值的可能性越小^[13]。空间插值法减少了野外测量的工作量,加快了数据从获取和处理,提升了作图和建模的效率。在气象学上,常用的插值法有反距离加权(inverse distance weighted, IDW)插值法、克里格(Kriging)插值法和样条(Spline)函数插值法。本文采用常用的样条函数插值法,其表达式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(\gamma_i) + a + bx + cy \tag{7}$$

式中:

- x 和 y 为插值点的坐标;
- Z 为待推算点的值;
- n 为插值点的个数;
- γ_i 为插值点到第 i 点 (x_i,y_i) 的距离,见式 $\gamma_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$ (8)
- 系数 λ_i,a,b,c 为一系列线性方程解所确定;

$R(\gamma_i)$ 的表达式见式

$$R(\gamma_i) = \frac{\frac{\gamma_i}{4} \left\{ \ln\left(\frac{\gamma}{2\pi} + d - 1\right) + \tau^2 \left[k_0\left(\frac{\gamma}{\tau}\right) + c + \ln\left(\frac{\gamma}{2\pi}\right) \right] \right\}}{2\pi} \tag{9}$$

式中 τ 为权重系数, γ 为插值点与推算点之间的距离, k_0 为改正后的贝赛尔函数, d 为常数。

3 仿真研究

考虑到这 9 个监测点可以分别代表所处区域的平均水平,通过获取每个监测点的地理坐标(经纬度)模拟 PM2.5 在武汉市区的扩散情况。对于高斯模型,以青山钢花为例。在突发情况下,如 PM2.5 浓度增高至 600 时,通过浓度由高向低扩散,其他点的浓度相对不变,来模拟武汉市区 PM2.5 浓度扩散的空间分布状况。考虑受东北风和东风的影响,微风平均风速为 4m/s,PM2.5 向西南方向扩散,浓度逐渐减小。根据式(5)可算得在平面的扩散范围。图 6 反映了 PM2.5 受风影响的扩散示意图,对应其空间分布仿真图如图 7 所示。图 7 中右侧色卡带(colorbar)上的数字表示 PM2.5 的指数,从上到下

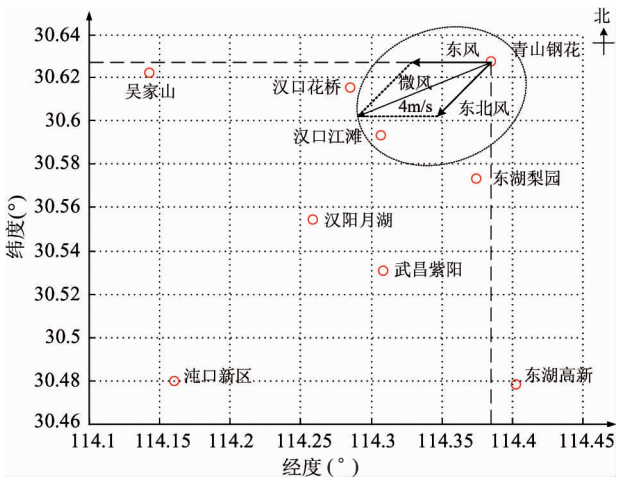


图 6 青山钢花 PM2.5 的扩散示意图

数值逐渐降低,并对应颜色的变化。PM2.5 指数低于 100 即安全区域,为图中蓝色部分。

由图 7 可知,青山钢花附近的 PM2.5 浓度最高。主要受影响区域为青山钢花监测点,且在风的影响下,沿风方向上分层次逐渐降低。

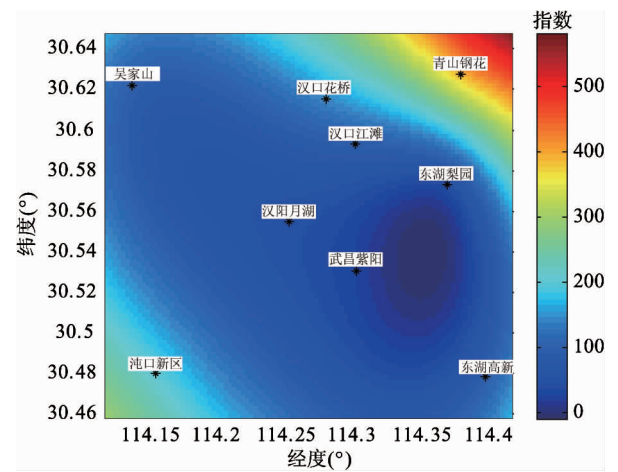


图 7 由高斯模型模拟的青山钢花 PM2.5 向扩散仿真图

对于空间插值法,分别求取这 9 个监测点 1、2 月份 PM2.5 指数的月平均值如表 2 所示,再利用样条函数插值法得到这两个月 PM2.5 平均指数在空间的分布情况,如图 8 所示。

由图 8(a)、(b)的两幅图可知 PM2.5 浓度与所处的功能区有关,不论是 1 月份还是 2 月份,沌口新区、吴家山、青山钢花和汉口花桥附近的 PM2.5 浓度较高,而武昌紫阳、汉口江滩和东湖高新的 PM2.5 浓度偏低。此外,1、2 月份 PM2.5 浓度的平均水平也显然不同。1 月份武汉市 PM2.5 浓度值基本都超过 200,而 2 月份的普遍在 150 左右,这说明 PM2.5 与季节存在相关性,同时印证了 1.2 节的说法。

对比这两种方法可发现,空间插值法是根据已知点数据推求未知点数据的方法,没有考虑环境因素,且插值计算得到的数据误差较大。而用高斯模型模拟的武汉市区情况,分析点源受风影响下的扩散情况,可应对突发情况,实时性、预测性更好。

表 2 9 个监测点 1、2 月份 PM2.5 的平均指数

	汉口花桥	沌口新区	汉阳月湖	武昌紫阳	东湖梨园	青山钢花	汉口江滩	东湖高新	吴家山
1 月	239.55	235.39	228.06	217.419	239.39	242.90	219.81	217.90	237.81
2 月	127.11	120.86	118.14	113.64	121.93	127.32	111.54	115.93	125.61

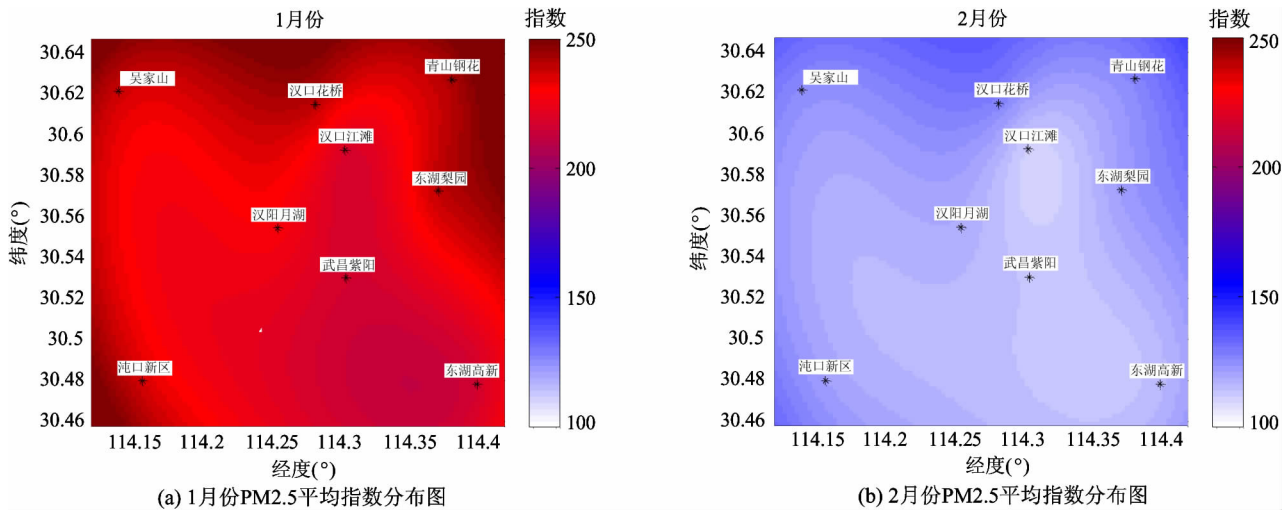


图 8 武汉市区 PM2.5 指数分布图

4 结 论

本文研究了武汉市区 PM2.5 的扩散情况,首先从时间角度根据历史数据对 1、2 月份 PM2.5 的变化规律作了分析,然后采用高斯模型和空间插值法分别对武汉市区的 PM2.5 扩散进行了模拟,得到以下结论:(1)每个监测点的浓度变化趋势大体相同,不同的监测点的浓度每天略有差别,具体来说汉口花桥、青山钢花和吴家山这三个点偏高,而东湖高新、东湖梨园和汉口江滩的相对较低。(2)2 月份 PM2.5 平均浓度明显低于 1 月份的,这表明 PM2.5 的浓度与季节气候存在某些联系,温度高、湿度大、雨季、风向等因素可导致 PM2.5 浓度的降低。(3)本文采用的简易高斯扩散模型模拟了受风影响下 PM2.5 扩散的区域,有助于帮助人们远离重度污染区。而空间插值法通过插值得到的其他区域的浓度误差小,更具有预测性。本文的主要工作是考虑了风因素影响下的点源扩散情况,并对比说明采用高斯模型的优势所在,虽然从温度、湿度、气压等方面给出了一些定性分析,但是具体模型还需深入研究。大气是人类共存的环境,应大力减少建筑粉尘、汽车尾气、工业废气等人为因素产生的 PM2.5。减少 PM2.5 的排放可减少雾霾天气的形成,提升空气的能见度,让每个市民能呼吸到新鲜空气,降低 PM2.5 对人体产生的危害。预测 PM2.5 的变化趋势固然重要,但归根结底还是得靠大家共同的努力,降低人为因素造成的空气污染。

参考文献

[1] 吴兑. 灰霾天气的形成与演化. 环境科学与技术, 2011,34(3):157-161

[2] Yang L X, Cheng S H, Wang X F, et al. Source identification and health impact of PM2.5 in a heavily polluted urban atmosphere in China. *Atmospheric Environment*, 2013, 75: 265-269

[3] He K B, Yang F M, Ma Y L, et al. The characteristics of PM2.5 in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 4959-4970

[4] Wang J, Hu Z M, Chen Y Y, et al. Contamination characteristics and possible sources of PM10 and PM2.5 in different functional areas of Shanghai, China. *Atmospheric Environment*, 2013, 68: 221-229

[5] Kassomenos P A, Kelessis A, Petrakakis M, et al. Air quality assessment in a heavily polluted urban Mediterranean environment through air quality indices. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 259-268

[6] 李继,郝吉明,叶雪梅等. 湖南省大气污染物排放与人体暴露水平研究. 环境科学,2003,24(3):16-20

[7] 刘光孟,汪云甲,张海荣等. 空间分析中几种插值方法的比较研究. 地理信息世界,2011,9(3):41-45

[8] 武汉市环境保护局网站:<http://www.whpepb.gov.cn/viewAirDailyForestWaterInfo.jspx>

[9] 中华人民共和国环境保护部. HJ 633—2012 中华人民共和国国家环境保护标准. 北京:中国环境科学出版社,2012

[10] 周家斌,王磊,钱佳等. 武汉市冬夏季大气 PM2.5 浓度及其烃类化合物的变化特征. 环境污染与防治, 2013,35(1):1-5

[11] 黄金杰,杨桂花,马骏驰. 基于高斯的大气污染评价模型. 计算机仿真,2011,28(2):101-104

- [12] 平措. 大气污染扩散长期模型的应用研究:[硕士学位论文]. 天津:天津大学环境科学与工程学院,2006. 12-19
- [13] 杨永川,杨轲,王志浩等. 空间插值法在热环境流动观测中的应用. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3741-3748

PM2.5 diffusion problem research based on Gaussian model in Wuhan city

Li Weiling, Wu Huaiyu, Chen Yang

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract

The study was conducted to investigate the diffusion of PM2.5 in Wuhan city. Firstly, the concentration diffusion rule of PM2.5 during the months of January and February was analyzed based on historical data. Considering that the formation and evolution of PM2.5 are affected by many factors such as pressure, temperature, humidity, wind speed, wind direction, etc., the case of spatial diffusion was simulated by using the Gaussian model and the spatial interpolation method, respectively. Among which, the Gaussian model was mainly aimed at the elevated diffusion source. The diffusion situation of PM2.5 influenced by wind factors was modeled, and the diffusion process of PM2.5 was simulated. The spatial distribution of PM2.5 in Wuhan city was simulated by using the spatial interpolation method, and the concentration of other areas was obtained by using the interpolation. The results showed that the spatial interpolation method had the bigger error and needed real-time computing according to the data, so it had certain difficulty in prediction. Having taken account of the influence of wind speed and direction, this Gaussian model had a good real-time performance and predictability. It is helpful to dealing with emergencies, and decision-making on contamination assessment for relevant departments.

Key words: PM2.5, individual air quality index, spatial interpolation method, Gaussian model