

基于 GIS 技术的城市大气污染物扩散模型研究

吕楠^{1,2}, 赵敬源¹, 张鹏²

(1. 长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安市城市规划设计研究院, 陕西 西安 710082)

摘要: 基于 GIS 强大的数据管理及分析功能, 构建了城市大气污染物的扩散模型, 可为大气污染治理及相关研究提供科学的理论和数据帮助。同时, 将计算结果与城市规划相结合, 为城市用地布局提供理论依据。研究表明: 大气污染物的扩散具有明显的时空变化特征, 这些特征与环境要素的相互作用决定了污染性质的演变、强度变化以及时空上的动态演化路径。大气污染源在静风状态下以烟气抬升高度和烟囱垂直高度之和的 n 倍绘制圆形区域, 然后将该区域与筛选的分析图层叠加, 进而得到圆形所覆盖的目标均为有效的计算点。

关键词: 大气污染物; GIS 技术; 扩散模型

中图分类号: TU984.11⁺5; X823

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0724-05

Study on the diffusion model of urban atmospheric pollutants based on GIS technology

LÜ Nan^{1,2}, ZHAO Jingyuan¹, ZHANG Peng²

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. Xi'an City Planning & Design Institute, Xi'an 710082, China)

Abstract: GIS has superior spatial analytical and data management functions. The article builds a diffusion model of urban atmospheric pollutant based on GIS technology, provides intuitive, scientific and effective data for assisting atmospheric pollution emergency work, and analyzes the atmospheric pollution diffusion simulation in Lanzhou City. At the same time, the calculation results are combined with urban planning to provide a theoretical basis for urban land layout. Results show that GIS has a wide range of applications in research of the atmospheric pollutant, including data preprocessing, secondary development of models, and in displaying the output of computing results. MapObjects is introduced to confirm the feasibility of integrating atmospheric pollution diffusion research with GIS. The simulation study on the expansion of atmospheric pollutant in Lanzhou has found that the characteristics of atmospheric pollution are closely related to the distribution of pollution sources and topographical features.

Key words: atmospheric pollutant; chemical production; GIS technology; diffusion model

大气污染是当今世界各国普遍关注的环境安全问题, 随着城市经济的高速发展, 大气污染物排放率越来越高, 环境风险源类型和数量不断增加^[1], 以臭氧、细颗粒物(PM_{2.5})、酸雨为特征的区域性大气复合污染问题日益突出, 探究大气污染及对其进行控制、减缓的相关研究已经成为当前环境科学领域最受关注的焦点。研究大气污染物在空气中的分布特点、扩散迁移规律, 可为污染的控制和治理、环境空气质量的评价提供科学依据。国内外从二十世纪三十年代起开始了对大气扩散模型的研究, 大气扩散模型已经成为研究大气扩散过程、浓度变化情况的重要工具^[2]。大

气扩散模型又名“大气湍流扩散模型”, 常采用物理模拟和数学模拟进行模拟和数值分析, 已建立起来的模型包括扩散 K 模型、泰勒统计模型和高斯扩散模型等。

已有研究发现地理信息系统(简称 GIS)可以实现大气污染物的演变机理分析和动态模拟过程。地理信息系统可以对空间数据按空间位置进行管理并研究各种空间实体间的相互关系, 在地理信息系统平台上开发事故预警与应用系统, 可以迅速获取所需信息, 以地图和图形的方式表达出来^[3]。这类系统能够很好地弥补传统大气扩散模型输入参数多, 结果表现力不够的缺陷, 可以有效、

收稿日期: 2018-12-07

修改稿日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678058), 国家重点研发计划基金资助(2016YFC0700401)

第一作者: 吕楠(1980—), 女, 博士研究生, 主要研究城乡人居环境。E-mail: 464260732@qq.com

通讯作者: 赵敬源(1972—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事城市环境物理, 城市微气候, 建筑节能, 生态规划等方面的研究。E-mail: zjyqtt@163.com

最大程度地减少大气污染造成的安全事故和经济损失^[4]。因此, 通过 GIS 技术揭示城市大气污染物的扩散规律, 将为进一步揭示城市空间布局与大气污染物扩散的内在关系, 改善大气污染, 缓解城市雾霾天气起到积极作用。

国内方面, 孙庆珍等^[5]对大气点源扩散模型的 GIS 可视化方法进行研究, 并给出了典型条件下的可视化结果图。陈祖刚等^[6]实现了高斯烟团模型与 GIS 的结合, 能够动态的模拟污染物在空间的扩散过程。

然而, 随着科技的发展, 传统的 GIS 在实际模拟分析中存在一定的局限性。本文在已有研究基础上, 基于 ArcGIS 的二次开发, 利用制图与功能组件 MapObjects 进行平台的顶层搭建。MapObjects 在数据收集、制图及数据分析等方面具有更强的优势。本文在 MapObjects 平台基础上, 提出了构建城市大气污染物扩散的理论模型, 尝试有效模拟大气污染扩散效应, 为大气污染治理提供科学的理论和数据帮助。

1 基于 GIS 的大气污染物扩散设计与实现

1.1 大气扩散模型

城市大气污染物扩散是指大气中的污染物逐渐弥散, 浓度稀释的过程, 主要影响因素包括大气湍流、下垫面、大气污染因子、分层形大气结构、气象因素和大气稳定度等^[7]。污染物的扩散不是一个简单的弥散过程, 在扩散过程中会发生一系列的物理变化^[8]。图 1 为大气扩散模式的一般组成, 将污染物排放状况、自然气象条件和下垫面条件作为数学模型和输入参数进行大气扩散模拟。城市大气污染扩散模式包括点源烟羽扩散模式、线源污染扩散模式、面源污染扩散模式等多种方式^[9]。城市污染物一般是由化工厂排放出, 烟气的抬升高度对污染物的扩散极其重要, 抬升高度越高, 污染物扩散越有利^[10]。抬升高度 ΔH 计算式如式 1 和式 2 所示。

$$\Delta H = n_0 Q_h^{n_1} H n_2 U^{-1} \tag{1}$$

$$Q_h = 0.35 P_a Q_v (\Delta T / T_s) \tag{2}$$

式中: n_0 为气热程度, n_1 为热释放率, n_2 为排放高度, 具体数值参考如表 1 所示; Q_h 为大气污染物放热速率; H 为大气排放烟囱的垂直高度; Q_v 为有效排污率; ΔT 为排污口与室外的温差; T_s 为排污口温度; U 为排污末端风速; Q_v 为有效排污率。

大气扩散模型是空气质量模型中最重要、最基本的一种分析大气扩散的数学模式, 主要描述

污染物在大气中的输送、扩散和稀释作用。大气扩散模型结合风速、风向、温度和混合高度来模拟大气环境并估测污染物在传播过程中的浓度^[11]。根据离污染源的距离, 气象条件(风速等)的变化以及时间的变化等可确定一个污染源对一个区域的影响, 如图 1 所示。把污染物在大气环境中的烟气抬升, 干、湿沉积和化学反应通过某种形式的过程参数来描述, 利用模型计算公式获取大气污染随着时间变化的扩散效应^[12]。

表 1 不同区域环境下的参数选择

Tab. 1 Parameter selection in different regional environment				
Q_h	表面状况	n_0	n_1	n_2
$\geq 20\ 000$	远离郊区	1.427	1/3	2/3
	城郊结合	1.303	1/3	2/3
2 100~21 000	远离郊区	0.332	3/5	2/5
	城郊结合	0.292	3/5	2/5

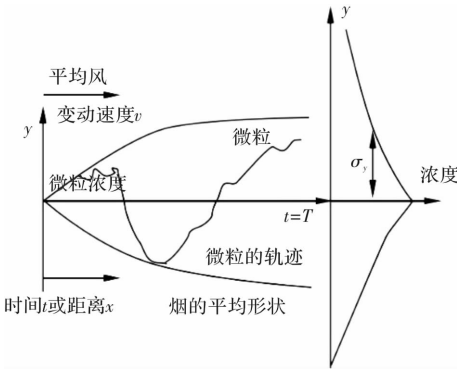


图 1 大气扩散示意图

Fig. 1 Schematic diagram of atmospheric diffusion

1.2 GIS 与大气质量模型的集成

现有研究发现, 利用 GIS 可以实现与大气质量模型的集成, 借助 GIS 数据采集和分析功能, 可有效地用于大气质量评价模型^[13]。GIS 在大气中的应用范畴广阔, 包括数据处理、模型的二次开发、运算成果的可视化及输出等。模型所需数据源包括污染源排放数据、地形图数据、气象条件参数和道路车流线性污染等, 数据采集完成后要先对数据进行网格离散化, 然后分析污染源扩散范围, 并代入数据, 对预测点浓度进一步进行分析计算。

1.3 基于 GIS 的大气污染物扩散系统设计

基于 GIS 技术设计的开发平台包括系统开发和运行的硬件、软件环境, 框架层次包括用户层、功能层、中间层和数据层等。图 2 为基于 GIS 的大气扩散模拟计算流程, 通过用户自定义参数, 然后建立高斯点源坐标并进行坐标转换, 用扇形筛选坐标计算点, 对离散点的浓度值进行计算,

采用普通克里金进行插值计算并用椭圆方法生成近似等值线。等值线的确定方法是根据点集中的最大和最小浓度以及所需要得到的等值线层数计算出每层等值线浓度值。表 2 为横向、垂直大气扩散幂函数指数表结构,表中显示的是环境专业数据库存储的指数表 $yests$ 和 $zests$,分别给出了不同字段名称对应的数据类型和长度。

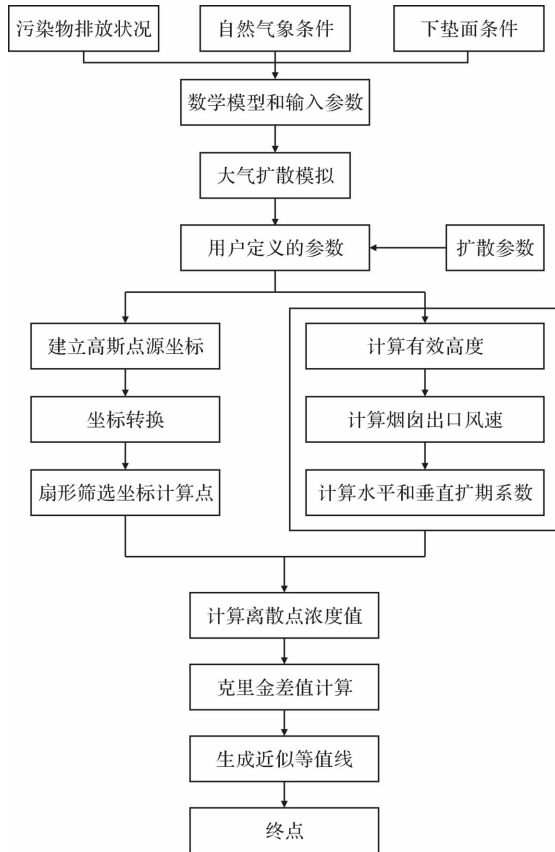


图 2 基于 GIS 的大气扩散模拟计算过程

Fig. 2 GIS-based atmospheric diffusion simulation calculation process

表 2 水平和垂直大气扩散功率函数指标表结构

Tab. 2 Horizontal and vertical atmospheric diffusion power function index table structure

名称	数据类型	长度	是否允许空值	备注
PS	字符型	3	否	大气稳定
a	双线性	7	否	大气扩散回归指数
b	双线性	7	否	大气扩散回归指数
Max	线型	3	否	最大下风向距离
Min	线型	3	否	低风的最小距离

1.4 系统功能实现

整个系统功能的搭建是基于 ArcGIS 的二次开发进行的,利用制图与功能组件 MapObjects 进行平台的顶层搭建。图 3 为 MapObjects 组件由数据访问对象组、地图显示对象组、几何图形对象组、

投影对象组和实用对象组五部分组成,支持对图层的管理和操作,具有一种地图控件及其若干 ActiveX 类型的 Auto 对象,可用于存取地图数据库^[14]。构建的大气扩散模型系统包括四个模块,包括地图浏览、地图查询、地图编辑和大气扩散,前三者均属为大气扩散模拟模块作基础查询、浏览、定位和数据存储服务。大气扩散模块的参数定义是最核心部分,通过不同参数的输入最终进行扩散模拟,如图 4 所示。

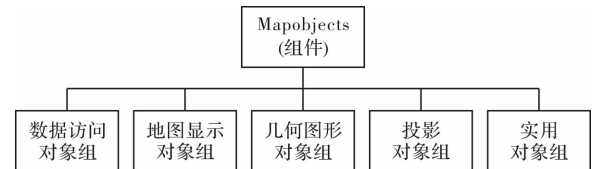


图 3 MapObjects 组件构成

Fig. 3 Composition of MapObjects

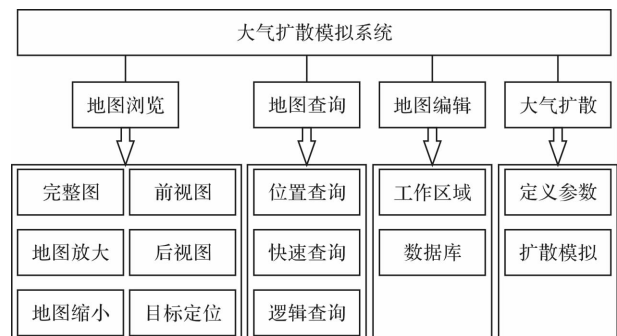


图 4 系统功能展示

Fig. 4 System function library division

2 基于 GIS 的西安市大气污染扩散模拟

2.1 模拟系统的功能

传统城市规划,一般仅依靠经验,通过分析城市主导风向,考虑工业对城市大气污染的影响方向,进行规划用地布局,缺乏合理的科学依据。本研究通过 GIS 技术模拟大气污染扩散,充分发挥 GIS 在计算分析,空间模拟和可视化输出等方面的能力,将计算结果与城市规划相结合,为城市用地布局提供理论依据。

以西安市为例,西安市大气细颗粒物的主要污染物来源包括:燃煤、机动车尾气、建筑扬尘及自然地质尘、生物质燃烧、二次污染物、工业排放等^[15]。工业排放主要来源于电力和造纸行业。图 5 为西安市中心城区范围内的主要工业污染源,主要分布在城市西南侧。烟团污染在静风状态下其扩展模式可视为点源烟羽扩散模式,在静风状态下,确定点源扩散的中心点后设置气象参数,

在图层要素中确定相关源强参数,再从栅格计算点分布图层读取高程值并计算污染物浓度值,并最终作为栅格属性存储。通常,选取静风时点源污染扩散形成的区域进行计算。通过模拟发现,静风条件下,污染物的扩散范围与点源污染抬升高度和烟囱垂直高度有关,污染面半径为点源污染抬升高度和烟囱垂直高度之和的 n 倍,即

$$R=n(H+h)$$

其中: R 为大气污染物扩散半径; H 为烟囱垂直高度; h 点源污染抬升高度。



图5 西安市中心城区主要工业污染分布图

Fig. 5 Distribution of major industrial pollution in central urban area of Xi'an city

2.2 定点位置污染物浓度值的计算

在环境监测过程中,定点位置污染物浓度的计算和模拟应用非常广泛。本研究采用统计学方法筛选出附近的污染点源,根据污染电源的大气环境污染浓度值,结合GIS手段,利用内插法估算生成连续区域内的污染浓度分布栅格格网,然后将连续地理空间离散化,绘制浓度等值线并从中获取到污染浓度初步信息,计算定点位置的污染物浓度值,最后利用ArcGIS Engine 组建技术将污染扩散分布情况在GIS可视化功能的支撑下真实模拟出来,见图6。该模拟方法使结果表达更直观,便于后期针对城市大气污染的治理与预防提出管控要求。

图7为浓度等值线绘制流程,利用编制的模拟系统,调用StreamWriter生成三参数文本文件,循环遍历栅格格网,将栅格中心点 X 、 Y 坐标及浓

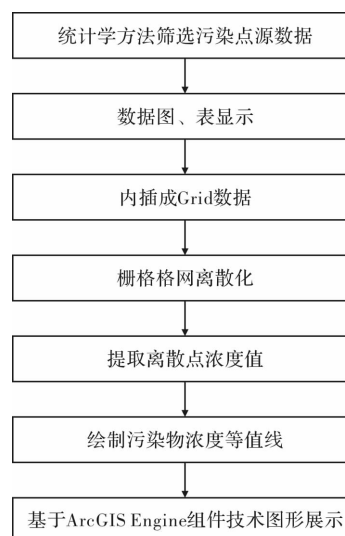


图6 污染物浓度模拟过程

Fig. 6 Pollutant concentration simulation process

度值存入文本文件,然后调用Surfer的GridData将文本文件转化为Grid数据,导出DXF格式平滑等值线,设置绘图参数和标注参数,最后利用MapObjects调用DXF文件,图形化显示等浓度线。大气污染扩散浓度曲线的计算流程主要包括:在图形上选择起始点和终点,根据风力和风向条件筛选有效污染源计算点,设置下垫面特征参数,选择污染物类型,确定单位间距,然后利用各个参数计算浓度值,累加计算结果浓度值,利用每个有效计算点保存的浓度值绘制浓度曲线。

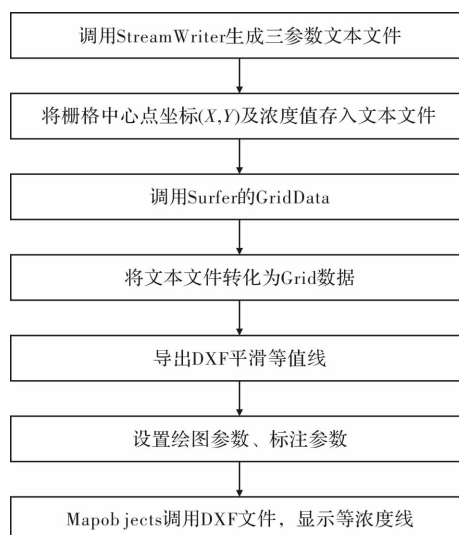


图7 浓度等高线绘制过程

Fig. 7 Drawing process of concentration contour

3 结论

本研究对大气污染扩散理论和模式进行了梳理,基于GIS技术提出了构建城市大气污染物扩散的理论模型,设计了一套整体的大气扩散模拟

系统的体系框架, 尝试科学、客观地模拟出不同大气污染的扩散模式, 对大气污染扩散的相关研究和实际大气污染治理工作能够提供一定的理论和技术支撑, 同时研究得出以下结论:

(1) 大气污染物的扩散具有明显的时空变化特征, 这些特征与环境要素的相互作用决定了污染性质的演变、强度变化以及时空上的动态演化路径。

(2) 大气污染源在静风状态下以烟气抬升高度和烟囱垂直高度之和的 n 倍绘制圆形区域, 然后将该区域与筛选的分析点层叠加, 进而得到圆形所覆盖的目标均为有效的计算点。

后期可进一步加强与实际案例的结合, 深入完善模型的理论价值和实用价值。

参考文献 References

- [1] VIZCAINO P, PISTOCCHI A. Use of a simple GIS-based model in mapping the atmospheric concentration of γ -hch in europe [J]. *Atmosphere*, 2014, 5(4): 720-736.
- [2] 迟妍妍, 张惠远. 大气污染物扩散模式的应用研究综述[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(5): 376-381.
CHI Yanyan, ZHANG Huiyuan. A review of applied research on diffusion models of air pollutants[J]. *Environmental pollution and prevention*, 2007, 29(5): 376-381.
- [3] RIGHINI G, CAPPELLETTI A, CREMONA G, et al. GIS based assessment of the spatial representativeness of air quality monitoring stations using pollutant emissions data [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 97: 121-129.
- [4] PINTO D, BLANDE J, SOUZA S, et al. Plant volatile organic compounds (voc_s) in ozone polluted atmosphere: the ecological effects [J]. *Chemical Ecology*, 2010, 36(1): 22-34.
- [5] 孙庆珍, 董晓马, 任忠斌. 大气点源扩散模型的 GIS 可视化研究[J]. *测绘科学*, 2011, 36(1): 24-25.
SUN Qingzhen, DONG Xiaoma, REN Zhongbin. GIS visualization of atmospheric point source diffusion model[J]. *Science of surveying and mapping*, 2011, 36(1): 24-25.
- [6] 陈祖刚, 王玉龙, 李艳桦, 等. 基于 Arc Engine 高斯烟团气体扩散模型的模拟实现[J]. *测绘信息与工程*, 2011, 36(2): 10-12.
CHEN Zugang, WANG Yulong, LI Yanhua. Simulation of gas diffusion model based on Arc Engine[J]. *Surveying and mapping information and engineering*, 2011, 36(2): 10-12.
- [7] YURDAKUL S, CIVAN M, ÖZNUR K, et al. Temporal variations of vocs concentrations in atmosphere [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 9(2): 189-206.
- [8] MARTINS D, FUENTES J. An overview of results of processes impacting near-surface atmospheric pollutants from the mid-atlantic united states [J]. *Atmospheric Chemistry*, 2015, 72(3/4): 183-195.
- [9] CIVAN M, ELBIR T, SEYFIOGLU R, et al. Spatial and temporal variations in atmospheric voc_s, no₂, so₂, and o₃, concentrations at a heavily industrialized region in western turkey, and assessment of the carcinogenic risk levels of benzene [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 103: 102-113.
- [10] KUMAR U, PRAKASH A, JAIN V. A multivariate time series approach to study the interdependence among o₃, n_x, and voc_s in ambient urban atmosphere [J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2009, 14(5): 631-643.
- [11] 杜世明. AERMOD 和 CALPUFF 模型用于济南地区空气污染模拟效果的对比研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.
DU Shiming. AERMOD and CALPUFF models are used for comparative study of air pollution simulation effects in Jinan area [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2010.
- [12] 李杰, 张仲成. AERMOD 模型在复杂地形大气预测中的应用 [J]. *科技资讯 (能源与环境版)*, 2011(19): 166-168.
LI Jie, ZHANG Zhongcheng. Application of AERMOD model in atmospheric prediction of complex terrain [J]. *Information on technology (Energy and Environment)*, 2011(19): 166-168.
- [13] FUJITA E, CAMPBELL D, ARNOTT W, et al. Concentrations of mobile source air pollutants in urban microenvironments [J]. *Air & Waste Management Association*, 2014, 64(7): 743-758.
- [14] 牟文君. 基于 GIS 的兰州市大气污染扩散模拟研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
MOU Wenjun. Simulating air pollution dispersion based on GIS in Lanzhou [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [15] 林启才, 张振文, 卢立栋, 等. 2013 年西安市大气污染物变化特征及成因分析研究 [J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(10): 52-55.
LIN Qicai, ZHANG Zhenwen, LU Lidong, et al. The change characteristics and causes of air pollutants in Xi'an in 2013 [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(10): 52-55.

(编辑 沈 波)