

# 基于 MultiPatch 模型的大气污染三维扩散模拟

武锋强<sup>1,2</sup> 杨武年<sup>1</sup> 张文君<sup>2</sup>

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059

2. 西南科技大学环境与资源学院, 绵阳 621010

**摘要** 垂直尺度上的污染浓度分布状况越来越受到关注, 因此三维大气污染模拟具有非常重要的应用价值。结合三维 GIS, 采用多面模型与高斯烟羽数学模型集成的方式, 通过边界值计算、三角条带构建、多面内插与渲染等技术方法, 构建了基于三维的高斯污染扩散系统, 探讨了污染物迁移规律和三维模型生成算法, 并对某工厂含 SO<sub>2</sub> 有害气体连续排放过程进行了二维与三维模拟, 分析了大气污染物质量浓度空间分布特征, 并计算得到该污染源大气污染最大落地点距离为 206 m。实践表明, 采用多面模型表达三维污染物空间分布具有快速、直观的优势, 也利于剖面与三维空间分析运算。

**关键词** 空气质量评价; 高斯污染扩散系统; 三维 GIS

**中图分类号** TP311.52

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.33.012

## Research on 3D Simulation of Air Pollution Diffusion Based on MultiPatch Model

WU Fengqiang<sup>1,2</sup>, YANG Wunian<sup>1</sup>, ZHANG Wenjun<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. College of Resources and Environment, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

**Abstract** The pollution concentration distribution in the vertical scale has been paid more and more attention. So, it is greatly significant to research 3D simulation of atmospheric diffusion in environmental monitoring. With 3D GIS, a Gauss pollution diffusion system, which is based on the Gaussian diffusion model and the multiPatch model, is constructed by boundary value calculation, building triangle strip, multipatch interpolating and rendering. The migration process of air pollution and a 3D diffusion model generation algorithm are also introduced. Moreover, the dynamic diffusion process of SO<sub>2</sub> in a factory is simulated by 2D and 3D schemes, based on which the characteristics of spatial distribution are achieved and the maximum landing distance is obtained as 206 m. The practical application of the system shows that the way of 3D simulation based on the multipatch model is effective and suitable for profile computing and spatial analysis in 3D space.

**Keywords** air quality assessment; Gauss pollution diffusion system; 3D GIS

随着经济的发展, 大气污染(如雾霾)已经成为主要环境问题之一, 严重制约了人类的生产、生活。因此, 监测、模拟、治理大气污染已成为当前一项非常关键的任务。一般来说, 大气污染扩散模拟主要采用两种方法: 一是物理模拟, 即根

据相关原理建立物理模型, 对有害气体的迁移变化过程进行实验研究, 如黄顺祥等<sup>[1]</sup>利用室内水槽模拟大气污染物的扩散; 二是数学模拟, 即在一定的假设条件下, 根据污染物迁移变化规律, 建立数学模型, 对有害气体扩散规律进行数值模

收稿日期 2014-05-04; 修回日期 2014-07-18

基金项目 国家自然科学基金项目(41372340); 四川省教育厅基金项目(12ZB327); 国土资源部地学空间信息技术重点实验室基金项目(KLGST2014-10)

作者简介 武锋强, 讲师, 研究方向为环境地理信息, 电子信箱: gis3s@163.com; 杨武年(通信作者), 教授, 研究方向为地理信息、环境治理, 电子信箱: ywn@cdut.edu.cn

引用格式 武锋强, 杨武年, 张文君. 基于 MultiPatch 模型的大气污染三维扩散模拟[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 87-90.

拟与分析。许多研究者在这一领域做了大量的工作,如 Abdel 等<sup>[2]</sup>研究了大气非稳定条件下,横向大气扩散系数的变化特征;王海燕等<sup>[3]</sup>用等值线的方式表达在不同气象条件下大气污染物空间分布状况;He 等<sup>[4]</sup>利用时间函数为动态转换基点分析了有毒气体的高斯扩散时空特征。这些研究大多以二维污染浓度分布图的形式表达了污染源在平面的空间分布特征,为大气污染与治理提供了理论基础。但随着城市高层建筑的日益增多,垂直尺度上的污染浓度分布状况越来越受到关注,另外,在某些突发事件中,污染物扩散过程及随时间变化特征同样是人们重点关注的内容,因此动态的三维大气扩散模拟具有非常重要的应用价值。

常见的三维模拟与建模方法<sup>[5-7]</sup>主要有:基于面元的数据模型,如格网结构模型、面片结构、小平面表示法和边界表示法等;基于体元的数据模型,根据分割原则分为规则与不规则模型,包括八叉树、规则块体建模法、四面体表示法、三棱柱构模法、不规则块体构模法等。其中基于面元的模型侧重对三维空间实体的表面描述,它们结构简单,便于显示和数据更新;基于体元的建模方法侧重于对三维空间体的表达,如矿体等,虽然易于进行三维空间操作和查询分析,但存储空间大,计算与渲染速度较慢。

本文采用基于 MultiPatch<sup>[8]</sup>(多面)的表面模型建模,既可以表达规则物体,也可以描述不规则三维实体,适用场合较广;对于复杂三维实体的表达,不仅能产生很好的显示效果,而且图形渲染速度较快,对于剖面表达与空间三维分析也具有相当大的优势。

## 1 MultiPatch 三维模型

MultiPatch 模型是由一系列的有序三维点构成三维平面,然后由这些平面构成三维体,它是一系列 3D 表面模型的集合,包括 3 种常用的三维表面类型:三角条带(triangle strip),由集合中的三维点坐标顺序生成的三角条带;三角扇(triangle fan),按照集合中的第一个点作为所有三角形的起点,然后按照点位顺序依次构成三角形的三角扇面;环(rings),由三维点组成的集合,用来描述多边形的表面外边界,用外环代表多边形的外边界,用多个内环表示洞。3 种常用的三维表面类型如图 1 所示。MultiPatch 作为一种多部件表面模型,由一个或多个相邻的表面块组合构成三维体,由以上 3 种类型的三维表面组合可以衍生出很多复杂的三维模型。

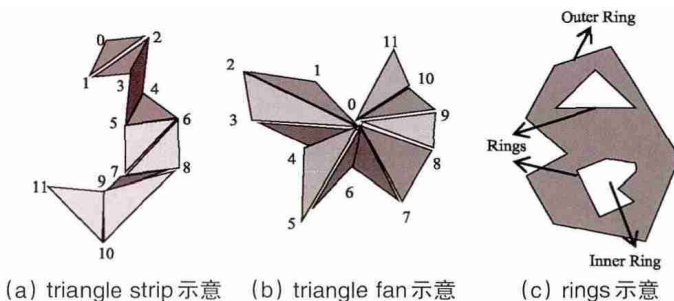


Fig. 1 Details of MultiPatch

本文针对污染气体扩散结构特点、污染分级表达的需求性,提出了基于多面的污染气体三维扩散建模方法,该方法优势为:

1) MultiPatch 模型融合了 TIN 模型与面片模型的优势,在顾及气体高斯扩散特征的同时,能够多层次、高效率地表达目标地物。

2) MultiPatch 模型由三角条带、三角扇、环等组成,便于进行三维空间分析<sup>[9]</sup>,如任意剖面分割、三维叠加、三维相交与三维缓冲区分析等,也非常方便与 GIS 等其他数据交互。

## 2 高斯扩散三维模拟

### 2.1 高斯扩散理论模型

大气扩散模型<sup>[10]</sup>主要有高斯烟羽/烟团模型、Sutton 模型、FEM3 模型、CALPUFF 模型等。高斯模型基本假设是污染物的质量浓度场特征符合正态分布,紊流场与风速在传播空间均匀分布,因此其参数较少,公式形式相对简单,计算量较小,能很好地满足大气污染扩散途径快速预测的需求。参照《环境影响评价技术导则》<sup>[11]</sup>,采用传统的点源烟羽扩散模式,即有风时点源扩散模式、小风和静风时的点源扩散模式来建立大气污染扩散模型。本文以有风模式(点源在距地面 10 m 高平均风速 $\geq 1.5$  m/s)下点源扩散为例,利用高斯模型模拟大气污染空间分布特征。

对于恒定气象条件(即风速、风向、大气稳定度不随时间而变)下的高架点源的连续排放,污染物在空间上的迁移遵循质量守恒,在考虑了烟羽在地面的全反射后,下风向任一点的污染物质量浓度  $C(x, y, z, H)$  计算公式<sup>[10]</sup>为:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u_H \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot D \quad (1)$$

式中,

$$D = \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2)$$

其中,  $C(x, y, z, H)$  为下风向某点  $(x, y, z)$  处的空气中污染物质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $x$  为下风向距离,  $\text{m}$ ;  $y$  为横截风向距离,  $\text{m}$ ;  $z$  为距地面高度,  $\text{m}$ ;  $Q$  为大气污染源强,即释放率,  $\mu\text{g}/\text{s}$ ;  $u_H$  为烟囱出口处环境平均风速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\sigma_y, \sigma_z$  分别为水平方向和垂直方向扩散参数,它是下风向距离  $x$  及大气稳定度的函数;  $H$  为有效排放高度,  $H = H_0 + h$ , 即烟囱出口距地面的几何高度+烟气抬升高度,  $\text{m}$ 。

### 2.2 三维建模流程

有害气体高斯扩散模型由一系列不同计算高度的等值面组成,分为两类:由公式(1)、(2)计算得到的非线性高斯等值面,和不满足精度需求条件下由相关两层等值面内插生成的中间层等值面。由于网格计算点较多,故采用算法简单、运算量小的线性插值方法内插生成中间层数据,等值面与等值面之间通过线性插值后,重新构建三角网。采用多面模型<sup>[8]</sup>生成三维体,算法实现主要步骤分为:边界值计算、离散点构建三角条带、多面内插与渲染等。

### 1) 气体扩散空间边界<sup>[12]</sup>计算:

(1) 根据高斯扩散公式, 设置 $x$ 初始值为一个较大值(如 10000 m), 该值保证气体扩散到该位置质量浓度值很小或几乎可以忽略不计;

(2) 将 $x$ 减去设定的固定间距(如 5 m), 将得到的值带入高斯公式(1), 计算质量浓度 $C$ ;

(3) 比较计算值 $C$ 与污染物质量浓度阈值(根据《导则》确定阈值)的大小, 如计算值小于阈值, 则重复步骤(2), 否则执行步骤(4);

(4) 保存下风向距离 $x$ , 此时该点质量浓度为最大接近阈值的值, 距离 $x$ 为最大落地点距离;

(5)  $y$ 、 $z$ 方向边界值的计算, 同样按照以上步骤执行;

(6) 顺序对获取的 $(x, y, z)$ 生成离散点边界, 如图 2(a)所示。

2) 由离散点构建三角条带<sup>[7,13,14]</sup>。首先从离散点中选择两点构建基准边, 以基准边开始按照一定方向搜索下一个离散点, 如: 以基准边前进方向的左侧搜索下一个点, 使之加入的新点与基准边夹角最大, 生成新的基准边, 重复以上过程, 直至所有点都被遍历, 构建成完整的三角条带, 如图 2(b)所示。

3) 相邻多面模型间内插。根据污染物质量浓度分级标准, 采用以上步骤分别生成不同浓度多面体。由于多面模型是一种表面模型, 如每两层污染物质量浓度精度不满足需求, 则以每两层多面模型为内外空间边界, 按照以上步骤采用线性内插的方式, 再次生成新的多面模型, 直至满足需求。

4) 模型渲染。对分级表示不同浓度的多面体模型<sup>[8]</sup>渲染和填充颜色, 并设置透明度, 结果如图 2(c)所示。

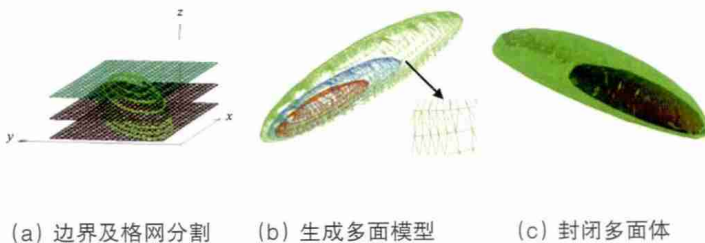


图 2 三维模型生成流程

Fig. 2 Flow chart of 3D model

## 3 系统实现及应用

### 3.1 系统实现

采用面向对象程序设计语言 C# 作为开发语言, GeoDatabase 存储空间数据, 根据工厂烟囱点源污染气体排放特征建立基于 GIS 的三维数学模型, 实现大气污染三维扩散模拟。系统实现空间数据的加载、参数输入、查询、三维模拟、三维切割、三维漫游、最大落地点浓度及离源距离等功能, 结果以三维模拟、二维等值线图等形式表现。

### 3.2 应用实例

以攀枝花市某工厂现有污染源(燃煤锅炉烟囱)为主要污染物为烟尘、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  为例, 模拟  $\text{SO}_2$  质量浓度空间扩散分布趋势, 并计算其最大落地点浓度及落地点离源距离。设该污染源烟囱高度为 40 m, 烟囱出口内径为 1.4 m, 出口速度为 6.5 m/s, 温度 380 K, 源强 12871 mg/s, 大气稳定度按 Pasquill 分级方法取 B 级, 模拟其污染的扩散过程并进行分析。

1) 参数输入。输入模型参数: 污染源选择, 污染源信息添加(主要污染物类型、源强、泄露类型等), 如图 3(a)所示。

2) 模拟结果及分析。系统模拟锅炉烟囱连续排放有害气体(以  $\text{SO}_2$  为例)质量浓度空间分布特征, 以网格间距 5 m 生成三维质量浓度模型, 显示  $\text{SO}_2$  三维分布近似椭球形分布区域, 如图 3(a)所示。红色表示  $\text{SO}_2$  质量浓度  $> 0.057 \text{ mg/m}^3$ , 为重度危害浓度区域; 深蓝色区域表示  $\text{SO}_2$  质量浓度  $> 0.033 \text{ mg/m}^3$  且  $< 0.057 \text{ mg/m}^3$ , 为中度危害浓度区域; 绿色区域表示  $\text{SO}_2$  质量浓度  $< 0.033 \text{ mg/m}^3$ , 为轻度危害浓度区域。水平最大落地点  $\text{SO}_2$  质量浓度为  $0.168 \text{ mg/m}^3$ , 落地点距离为 206 m。图 3(b)为井字形切片与三维模型通过三维求异、三维求交运算后形成三维栅栏图, 可从多角度浏览三维空间污染物浓度分布特征。如: 在水平距离 200 m 左右, 纵向污染浓度为递降趋势, 由垂直距离 58 m 处  $0.168 \text{ mg/m}^3$  下降至 69 m 处  $0.057 \text{ mg/m}^3$ , 下降速率较快, 再缓慢下降至  $0.033 \text{ mg/m}^3$ , 浓度垂直变化趋势明显。图 3(c)、(d)为大气污染二维平面分布与下风向  $x$  轴浓度曲线, 污染物浓度值在 200 m 左右较大, 在下风向 500 m 处浓度逐渐减小, 且浓度曲线分布近似为正态分布。由结果发现, 该工厂污染源主要污染区域为该厂附近散落居民区与无人丘陵区。

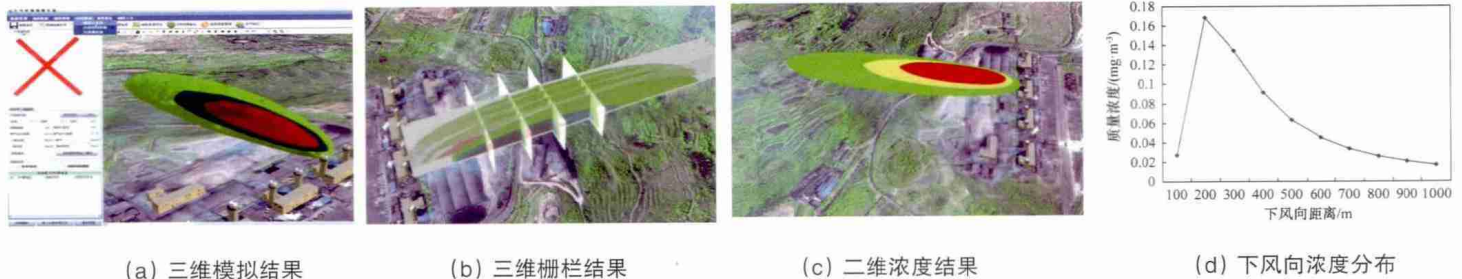


图 3 模拟结果

Fig. 3 Simulation results



#### 4 结论

采用多面模型,结合高斯烟羽数学模型,通过三维GIS集成,从多方位、多角度展示了烟团污染的迁移过程和空间分布形态。将模型应用于某厂锅炉烟囱的排放模拟中,计算得到水平最大落地点距离为206 m,与二维表达相比较,三维模拟表达可以计算任意空间位置处的浓度值,且模型可以较好地应用于空间分析。基于多面的三维高斯模型较好地反映了大气污染物的迁移、扩散与动态变化及相互作用,为事故应急提供了信息辅助决策支持,但由于大气本身变化复杂且频繁<sup>[15]</sup>,尤其受地面温度、地形等影响,需根据实际情况对模型参数不断修正,才能更可靠地提供决策服务。

#### 参考文献(References)

- [1] 黄顺祥, 陈海平, 刘峰, 等. 大气污染化学事故危害预测数值模拟(CDM)与验证[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(4): 664-670.  
Huang Shunxiang, Chen Haiping, Liu Feng, et al. Numerical simulation and experimental comparison on atmospheric pollution chemical accident hazard predicting (CDM) [J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(4): 664-670.
- [2] Abdel-wahab M, Essa K, Embaby M, et al. Derivation the schemes of lateral and vertical dispersion parameters: Application in Gaussian plume model[J]. Open Journal of Air Pollution, 2013, 2(1): 19-24.
- [3] 王海燕, 张岐山. 基于改进高斯烟羽模型的废弃物处理设施负效应测度[J]. 中国管理科学, 2012, 20(2): 102-106.  
Wang Haiyan, Zhang Qishan. A model for obnoxious effect of waste disposal facilities measurement based on improved Gaussian plume model[J]. Chinese Journal of Management Science, 2012, 20(2): 102-106.
- [4] He N, Wu Z Z, Zheng W. Simulation of animproved gaussian nmodel for hazardous gas in diffussion[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4): 571-580.
- [5] 刘光伟, 白润才, 赵浩. 露天矿数字开采过程仿真及其应用[J]. 科技导报, 2011, 29(34): 41-44.  
Liu Guangwei, Bai Runcai, Zhao Hao. Simulation of digital exploration process and its application in simulation of digital exploration process and its application in surface mine[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(34): 41-44.
- [6] 吴德华, 毛先成, 刘雨. 三维空间数据模型综述[J]. 测绘工程, 2005, 14(3): 70-73, 78.  
Wu Dehua, Mao Xiancheng, Liu Yu. The summary of 3D spatial data models[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(3): 70-73, 78.
- [7] Ross M, Martel R, Lefebvre R, et al. Assessing rock aquifer

- vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: A case study from the St. Lawrence Lowlands, Canada [J]. Geofisica Internacional, 2004, 43(4): 591-596.
- [8] 肖如林, 苏奋振, 万庆, 等. 基于 Multipatch 模型的冰凌三维可视化分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(2): 196-201.  
Xiao Rulin, Su Fenzhen, Wan Qing, et al. 3D visualization of ice-jam based on MultiPatch[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(2): 196-201.
- [9] 王继周, 李成名, 林宗坚. 三维GIS的基本问题与研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2003(24): 40-44.  
Wang Jizhou, Li Chengming, Lin Zongjian. A survey on the basic issues and developments of Three-dimensional GIS[J]. Computer Engineering and Applications, 2003(24): 40-44.
- [10] 徐效波, 吴华玲, 刘波, 等. GIS支持下的突发性大气污染扩散模拟[J]. 金属矿山, 2011(5): 146-148.  
Xu Xiaobo, Wu Hualing, Liu Bo, et al. The sudden air pollution dispersion simulation based on GIS[J]. Metal Mine, 2011(5): 146-148.
- [11] 中华人民共和国环境保护部. HJ 2.2—2008 环境影响评价技术导则—大气环境[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 2.2—2008 Guidelines for environmental impact assessment of atmospheric environment[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.
- [12] 陈义胜, 庞赟杰, 李琛, 等. 建筑物对高架点源大气污染物扩散影响的模拟研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 147-150.  
Chen Yisheng, Pang Yunji, Li Chen, et al. Simulation study on effects of building on diffusion of air pollutants from high elevation point sources[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2010, 4(1): 147-150.
- [13] 张敏, 杨武年, 罗智勇, 等. 复杂地质体建模与可视化新技术[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(6): 2390-2392, 2395.  
Zhang Min, Yang Wunian, Luo Zhiyong, et al. New technique of modeling and 3D visualization for complicated geologic body[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(6): 2390-2392, 2395.
- [14] 胡亚, 林琛, 徐丙立, 等. 基于PC机群的多点源高斯大气污染扩散模型的并行计算研究[J]. 高技术通讯, 2010, 20(4): 436-440.  
Hu Ya, Lin Hui, Xu Bingli, et al. A study on PC cluster based parallel computation of Gauss plume model for multi-point sources[J]. High Technology Letters, 2010, 20(4): 436-440.
- [15] 邹强, 张文君, 武锋强. 基于ArcObjects的区域环境污染源分析评价系统[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 186-190.  
Zou Qiang, Zhang Wenjun, Wu Fengqiang. Environmental pollution source analysis and assessment system based on ArcObjects[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 34(10): 186-190.

(责任编辑 王媛媛)



#### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。