

基于大气污染扩散模型的空气污染多维动态可视化表达研究^①

胡 亚^{②*} 朱 军^{*} 林 琚^{**} 徐丙立^{***} 胡明远^{**}

(^{*} 西南交通大学地球科学与环境工程学院遥感信息工程系 成都 610031)

(^{**} 香港中文大学太空与地球信息科学研究所 香港)

(^{***} 装甲兵工程学院信息工程系 北京 100072)

摘 要 针对现有空气污染可视化表达方法不能有效集成地理信息、可视化效果差、信息维度低的问题,基于大气污染扩散模型模拟计算结果进行了三维空间空气污染多维动态可视化表达研究,提出了空气污染的多维动态可视化表达方案,详细论述了空气污染研究区域三维地理场景构建、污染浓度值与颜色的映射、基于切片的空气污染表达、基于立方体的空气污染表达、任意垂直线/面的空气污染表达等 5 种空间污染可视化表达方法与关键技术。最后以珠三角空气污染扩散模拟为例,开发了原型系统,进行了 5 种时空可视化表达与分析试验。试验结果表明,所采用的技术方案能够有效集成高精度大范围地理信息,能实现较好的空气污染可视化表达效果,能有效反映空气污染的时空分布,可以为空气污染管理人员提供有效的决策支持。

关键词 空气污染, 多维动态, 可视化, 大气污染扩散模型

0 引 言

我国城市大气污染严重,113 个重点城市有 1/3 以上空气质量达不到国家二级标准^[1],研究、认识、控制空气污染成为公众普遍关心的问题。计算机支持下的模拟(空气污染模拟)是研究和认识空气污染的主要手段之一,它具有再现过去和预测未来的双重功能。空气污染模拟包括资料准备、污染建模与数值计算、计算结果可视化表达、分析以及决策支持。除了污染建模与数值计算比较成熟外,其他几个步骤在功能上存在很大不足^[2]。空气污染模型模拟计算结果的可视化表达主要表现空气污染的静态分布与动态扩散,目前可视化表达常利用可视化表达工具(GrADS(二维表达)与 Vis5D(高维表达)^[3])和 GIS 工具^[49]。GrADS、Vis5D 这两个工具主要面向从事大气环境研究的科研人员,对于非专业人员,比如政府官员、普通公众,不能提供有效支持,存在以下不足^[2,10]:不能有效集成地理信息;可视化效果不理想;使用不方便,比如 Vis5D 要求运行在 Linux 平台上。基于 GIS 工具进行空气污染可视

化表达,大都采用二维形式,存在信息维度损失。由于存在上述不足,现有的空气污染可视化方法很难为空气污染管理部门提供逼真、直观的决策支持,不利于空气污染的治理。本文以珠三角空气污染为例,基于大气污染扩散模型模拟计算结果研究了三维空间空气污染多维动态可视化表达,为空气污染管理部门提供了逼真、直观的决策支持。文中详细给出了空气污染可视化表达的几个关键技术,包括空气污染研究区域三维地理场景构建、污染浓度值与颜色的映射、基于切片的空气污染表达、基于立方体的空气污染表达、任意垂直线/面的空气污染表达,并结合大气污染扩散模型模拟计算结果,给出了 5 种空气污染可视化表达效果。

1 大气污染扩散模型及模拟计算结果

大气污染扩散模型是描述大气污染物的输送、扩散和稀释作用的一种时空复合的环境模型。城市群模拟的典型尺度在数十公里到数百公里,模式中除考虑污染物的传输、扩散以外,还要考虑污染物的

① 国家自然科学基金(41271389,41271402)和中央高校基本科研业务费专项资金科技创新研究(SWJTU11CX061)资助项目。

② 男,1980 年生,硕士,讲师;研究方向:GIS 与虚拟地理环境;联系人,E-mail: huya@home.swjtu.edu.cn

(收稿日期:2012-07-19)

迁移和转化,常见的有高斯扩散模式、欧拉型模式、拉格朗日型模型和欧拉-拉格朗日混合型模式。这些扩散模式本身存在不同的限制条件,如高斯扩散模式只适应于模拟平坦地形及风速不变情况下污染源排放的浓度分布,因此在应用上存在局限性。

本文采用三维多尺度的欧拉型扩散模式,其对美国宾州大学和美国大气科学研究中心研制的MM5中尺度模式进行改进,在气象场模拟的基础上,建立一个三维实时扩散模式(SYSUM)^[10]。与高斯扩散模式等不同,SYSUM利用实时气象资料,是一个多尺度、多过程的全耦合模式系统,能够较好地应用于珠江三角洲城市群区域的空气质量预报。SYSUM模式能够模拟对流层中单一气态污染物的扩散,在模式中,可仅考虑高架点源扩散的单一气态污染物SO₂,并假设在大气中没有任何化学反应过程(不加入化学模式),集中讨论影响污染物的平流扩散过程。SYSUM模式气象场模拟的动力框架是由MM5模式组成,MM5模式提供三维的模拟风场、温度、气压和湿度;而模式的污染物扩散传输部分采用污染物的质量连续方程来计算,包括平流、扩散、干湿沉降等过程,方程的形式为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q - L \quad (1)$$

其中 c 为污染物浓度, u, v, w 为风速的三维分量, K 为湍流扩散系数, Q 为源强, L 为干湿沉降项。本文暂不考虑SO₂的干湿沉降。

大气污染扩散模型模拟计算生成一系列结果文件。每个结果文件记录某一时刻一系列计算点的经度、纬度、行数、列数、层数、绝对高程、SO₂浓度。这些计算点的分布如图1所示,其中Sigma face为平

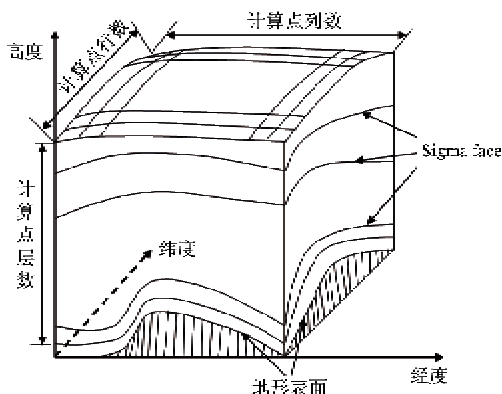


图1 计算点空间分布

行于地形的曲面,每一层计算点分布在一个 Sigma face 上。

2 可视化方法与关键技术

由上一节可知,大气污染扩散模型计算了分布在一个立方体内一系列计算点在不同时刻的SO₂浓度值,计算结果具有明显的时空性。因此,对模拟计算结果进行可视化表达,首先需要探讨如何把污染浓度值映射成颜色值,然后需要探讨研究区域不同时空的空气污染可视化表达问题。同时为了取得较好的空气污染可视化表达效果,还需要逼真、高精度的地理场景表达,所以本节首先会介绍如何构建空气污染研究区域三维地理场景,然后讲述模拟计算结果可视化表达。

2.1 空气污染研究区域三维地理场景构建

这里的地理场景构建包括两方面内容:研究区域地形地貌三维表达;研究区域行政区划及行政标注三维表达。下面分别进行介绍。

(1) 基于GIS数据的研究区域地形地貌三维表达

地形表达采用GIS中的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,分辨率为90m;地貌表达采用GIS中的遥感卫星影像数据,分辨率为15m。在准备好这两部分数据后,采用三维开放场景库(open scene graph, OSG)中的osgDEM.exe工具对DEM数据和遥感卫星影像数据进行预先处理和预先生成,之后在C++开发环境,比如Visual Studio 2008里面利用OSG中的节点读入语句把预先生成的数据文件作为地形节点读入场景并进行浏览,地形地貌场景如图2所示。

(2) 研究区域行政区划及行政标注三维表达

行政区划的二维平面数据来自于GIS中的多边形.shp数据。在该数据中,每一个多边形代表一个行政区划的范围,多边形的边界由多个节点连接构成。本文利用地理空间数据抽象库(geospatial data abstraction library, GDAL)中的OGR库在C++开发环境下读取多边形边界每个节点的X、Y坐标,并利用通过这个节点的垂直线与图2中的地形节点进行求交从而获得该节点的Z坐标。通过这种方式,可以求得每个行政区划所有边界节点的三维坐标,从而实现行政区划的三维表达。

每个行政标注的平面位置位于上述对应行政区划的几何中心,其Z坐标求取与上面采用的每个边界

节点的 Z 坐标求取方法相同。当求得标注的三维坐标后,利用 OSG 中的 `osgText::Text` 对象进行三维表

达,同时设置注记始终朝向场景中的照相机。研究区域行政区划及行政标注三维表达效果如图 3 所示。

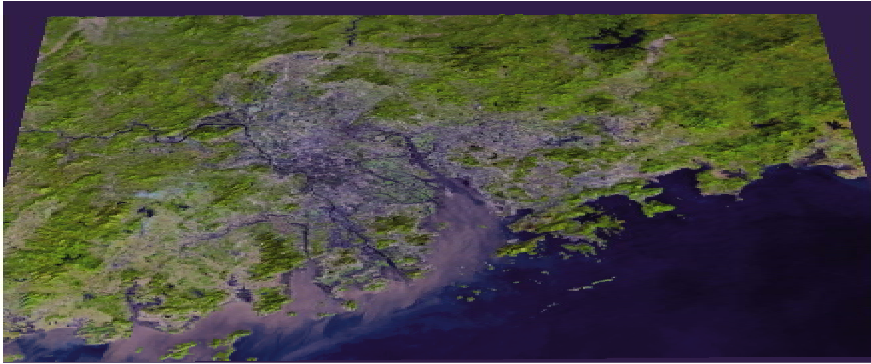


图 2 研究区域三维地形地貌场景显示

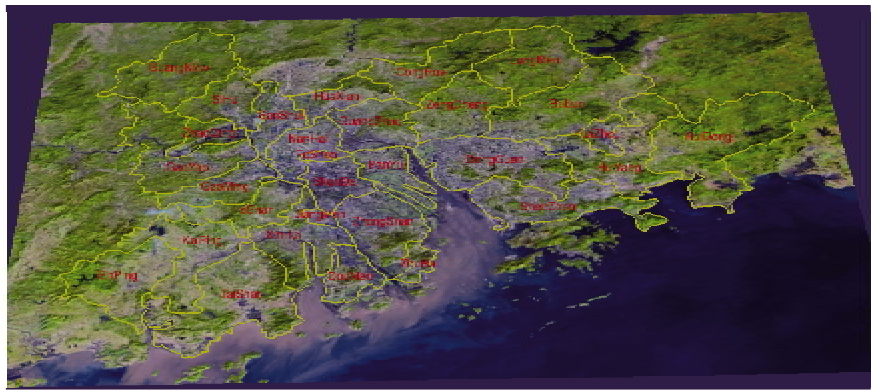


图 3 研究区域行政区划及行政标注三维表达

2.2 污染浓度值与颜色的映射

对空气污染模拟计算结果进行可视化表达,实质上是考虑如何把污染浓度值映射成颜色值。这种映射可以有两种方法。一种是按照浓度限值标准,每一级采用一种颜色设置。比如,根据最新的环境空气质量标准 GB 3095—2012,采用四种颜色分别表示 SO_2 浓度(例如 1 小时平均浓度)的一级标准、二级标准、三级标准以及超过三级标准的浓度。第二种方法就是采用连续着色,即在指定两个不同浓度值对应颜色值之后,采用颜色插值算法,计算处于上述两个不同浓度值之间任意浓度值所对应的颜色,下面是本文采用的一种插值算法。

假设较小的浓度值为 C_1 , 希望对应的颜色值为 $\text{Color}_1(R_1, G_1, B_1)$; 较大浓度值为 C_2 , 希望对应的颜色值为 $\text{Color}_2(R_2, G_2, B_2)$, 则浓度为 C_x ($C_1 \leq C_x \leq C_2$) 时的颜色 $\text{Color}_x(R_x, G_x, B_x)$ (这里所有

颜色值的分量范围都为 $0.0 \sim 1.0$) 计算公式如下:

$$\begin{cases} D = \frac{C_x - C_1}{C_2 - C_1} \\ R_x = R_1 + D \times (R_2 - R_1) \\ G_x = G_1 + D \times (G_2 - G_1) \\ B_x = B_1 + D \times (B_2 - B_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中 R, G, B 分别表示颜色的红、绿、蓝三分量。本文利用上述算法实现污染浓度值与颜色的映射效果如图 4 所示。浓度值为 0.0 对应的颜色为 $(0.0, 0.0, 1.0)$, 即蓝色; 浓度值为 0.2 对应的颜色为 $(0.0, 1.0, 1.0)$, 即青绿色; 浓度值为 0.4 对应的颜色为 $(0.0, 1.0, 0.0)$, 即绿色; 浓度值为 0.8 对应的颜色为 $(1.0, 1.0, 0.0)$, 即黄色; 浓度值为 1.6 对应的颜色为 $(1.0, 0.0, 0.0)$, 即红色; 浓度值为 17.5 对应的颜色为 $(0.0, 0.0, 0.0)$, 即黑色。



图 4 污染浓度值与颜色的映射效果

2.3 基于切片的空气污染表达

这里讨论的切片表达包括水平方向和竖直方向。图 5(a)为相同层的部分计算点(计算点的排列如图 1 所示,下同)在水平方向上的投影排列,呈矩形网格状。由于各个计算点的绝对高程大都不相

同,矩形格网的四个点在空间上基本不处于同一平面,为了保证 OpenGL 的渲染行为是确定的,本文采用三角网来连接各个计算点,连接效果在水平方向上的投影如图 5(b)所示。三角网中每个计算点的颜色值采用 2.2 中介绍的插值算法获得。

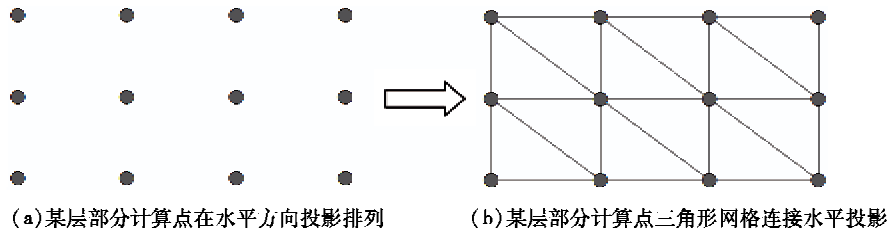


图 5 水平方向切片表达示意

在图 6 的左边为行数或列数相同的部分计算点在竖直方向的投影排列,很明显,同一层上计算点的绝对高程基本不相同。同样,为了保证 OpenGL 的渲染行为是确定的,本文仍然采用三角网来连接各

个计算点,连接效果如图 6 的右图所示。三角网中每个计算点的颜色值仍然采用 2.2 中介绍的插值算法获得。

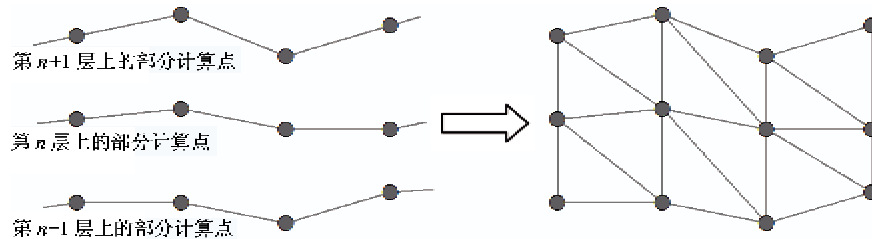


图 6 行数或列数相同的部分计算点在竖直方向投影排列及三角形网格连接示意

2.4 基于立方体的空气污染表达

为了便于了解空气污染整体空间分布,本文采用基于立方体的空气污染表达。这种方法是把相邻的 6 个计算点用 6 个面进行连接。由于同一层上计算点的绝对高程基本不相同,同样为了保证 OpenGL 在立方体的上表面和下表面的渲染行为是确定的,需要把同一平面位置不同高度的计算点内插成等间距的空间点,然后再用立方体进行表达。同时,为了进一步突出空气污染整体空间分布,本文对立方体进行有选择性绘制,即在准备绘制某个立方体时,首先求取该立方体 6 个角点中最大的污染浓度值,然后把最大值与某一阈值(比如环境空气质量一级标准浓度上限值)进行比较,如果大于该阈值,则绘制该立方体,反之则不绘制该立方体。

2.5 任意垂直线/面的空气污染表达

任意垂直线空气污染表达指的是经过用户在场景中指定的任意点的垂直线上的空气污染分布。当用户通过场景拾取功能在场景中指定某一点后,这

条垂直线的空间位置就已确定。为了获得这条线的空气污染分布,需要获取这条线上某些点的空气污染浓度值。在这里,需要获取的点的个数等于计算点的层数,点的位置确定及污染浓度值获取如下:在每一层计算点中寻找平面位置离垂直线的 X 、 Y 坐标最近的计算点,垂直线上 Z 坐标等于该计算点 Z 坐标的点即为要获取的某一点,同时其浓度值就等于该计算点的浓度值。

任意垂直面的空气污染表达指的是经过用户在场景中任意指定的两个空间点(当然这两个空间点不能位于同一条垂直线上)并以这两个空间点为边界的垂直面上的空气污染分布。当用户在场景中指定两个空间点后,这两个空间点的连线在水平方向的投影线段就已确定。然后以这条水平投影线段为基础,在上面确定一系列点,这里的每一点就相当于在场景中指定了一条垂直线,因此就可以利用上面讲的任意垂直线空气污染表达方法在每条垂直线上确定一些空间点,从而实现在垂直面上确定一系列

的空间点,最后再用三角网进行连接,完成垂直面上空气污染分布表达。

3 原型系统及初步试验

根据上述方案,本文利用 Visual Studio 2008 .NET 和 Open Scene Graph 开发了珠三角空气污染可视化表达原型系统。试验硬件环境为 ThinkPad W500 笔记本,其处理器为英特尔双核 2.80GHz,内存 4GB,显卡为 ATI Mobility Radeon HD 3650,操作系统为 Windows 7。试验区域为大珠江三角洲区域,基础地理数据包括 DEM、遥感卫星影像数据和行政区划.shp 数据。在原型系统中,场景数据采用树状结构进行组织;对 DEM 和遥感卫星影像数据采用多细节层次(levels of detail, LOD)进行预先处理和预先生成;场景运行时,采用场景拣选、LOD、状态改动最小化等机制,场景漫游能够达到 60 帧/秒左

右,为空气污染可视化表达提供了逼真、高精度的地理场景表达。

污染源为分布在珠江三角洲地区的 3180 个点污染源,大气污染扩散模型运行在超级计算机上,计算点的水平网格尺度为 $3\text{km} \times 3\text{km}$,计算点共有 75 (列方向上计算点数) $\times 72$ (行方向上计算点数) $\times 10$ (竖直方向计算点数,即层数),模拟起始时间为 2005 年 7 月 18 号 18:00 点,每 1 小时一个时刻,共计 25 个时刻,模拟 SO_2 的分布情况。下面分别对几种空气污染可视化表达效果进行介绍。

3.1 基于切片的空气污染表达

(1) 分层分时刻空气污染表达

这种表达方式实现了特定层特定时刻的空气污染可视化,它可以查看某一层在不同时刻的空气污染分布情况,也可以查看某一时刻不同高度层的空气污染分布情况,具体可视化表达效果如图 7 所示。

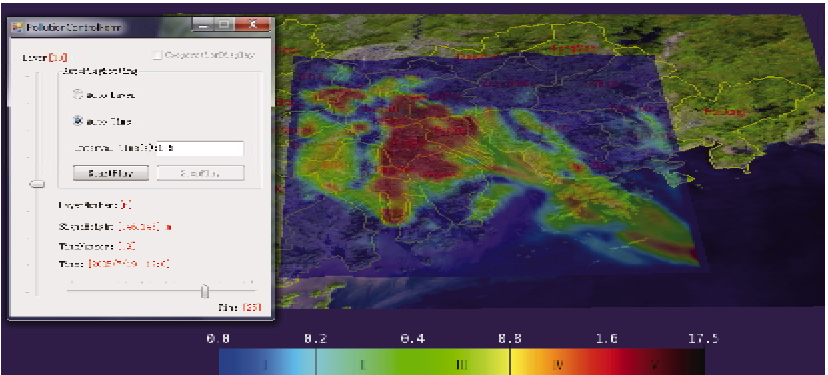


图 7 分层分时刻空气污染表达

(2) 某一时刻三方向空气污染表达

这种表达方式实现了某一时刻由西向东方向某一垂直面、由南向北方向某一垂直面和某一高度层

的空气污染分布表达,具体可视化表达效果如图 8 所示。在图中拖动控制面板某一滑块可以查看某一垂直面或某一高度层的空气污染分布情况。

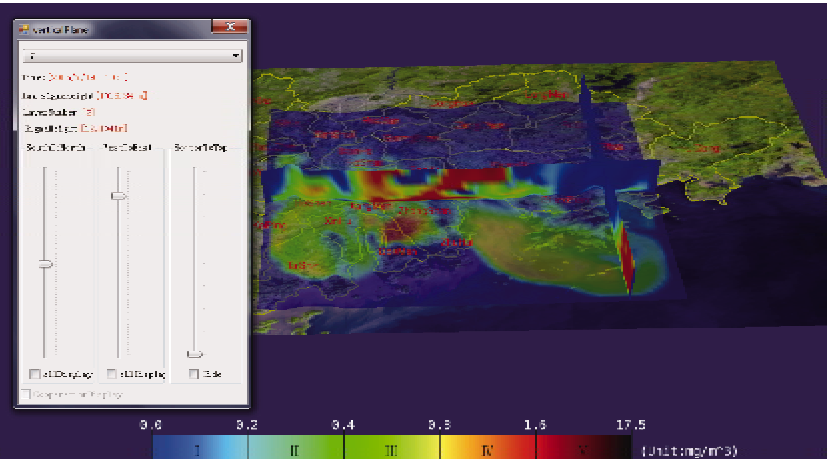


图 8 某一时刻三方向空气污染表达

3.2 基于立方体的空气污染表达

这种表达方式实现了空气污染在某一时刻的整体空间分布表达,具体表达效果如图9所示。从图中可以很容易看出某个时刻的空气污染在各个空间的分布情况,此外通过拖动控制面板中的滑动块可以查看其它时刻的空气污染整体分布情况。

3.3 任意垂直线/面的空气污染表达

这种表达方式实现了研究区域内任意垂直线/

垂直面在某个时刻的空气污染分布表达,具体表达效果如图10所示。图中显示了两个任意垂直面和一条任意垂直线的空气污染分布情况,通过拖动控制面板的滑动块可以查看其它时刻这两个垂直面和这条垂直线的空气污染分布情况;在控制面板中还可以对垂直面和垂直线进行管理,即从场景中掩藏或重新显示垂直面或垂直线。

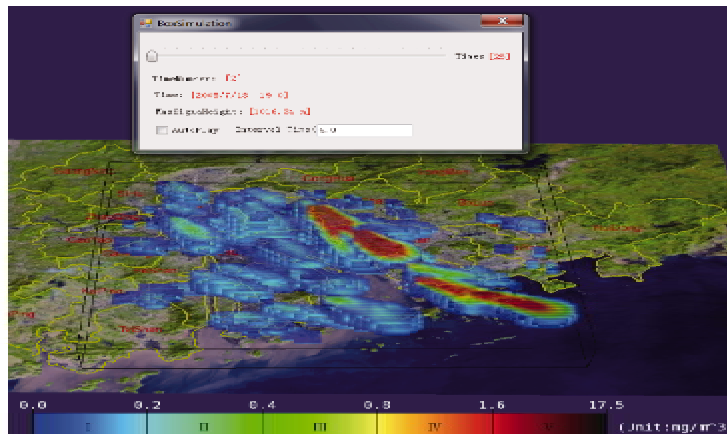


图9 基于立方体的空气污染表达

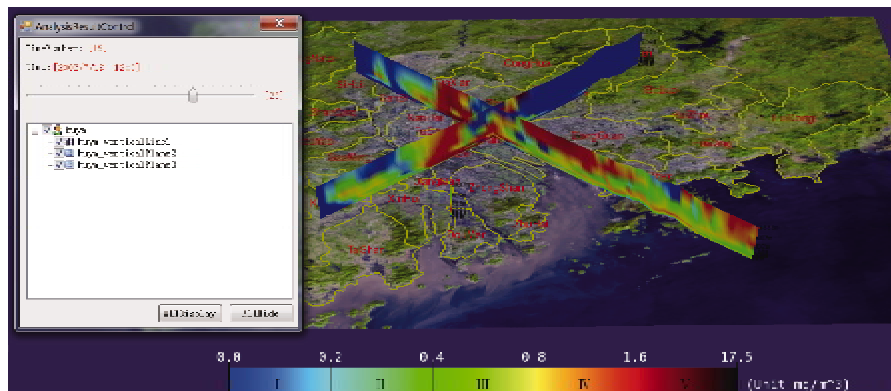


图10 任意垂直线/面的空气污染表达效果

4 结 论

本文针对大气污染扩散模型模拟计算结果在三维场景里进行了空气污染多维(垂直线、切片/垂直面、立方体)动态可视化表达研究。详细讲述了空气污染可视化表达的几个关键技术,即空气污染研究区域大范围高精度三维地理场景构建、污染浓度值与颜色的映射、基于切片的空气污染表达、基于立方体的空气污染表达及任意垂直线/面的空气污染表达。开发了珠三角空气污染可视化表达原型系统,并基于大气污染扩散模型模拟计算结果,进行了空气污染时空可视化表达模拟。原型系统操作简

单,可以任意变换三维场景视点,使用方便,能有效集成高精度大范围地理信息,其空气污染可视化表达效果好,能从多方向动态反映空气污染局部或整体的空间分布,克服了现有空气污染可视化表达方法存在的诸多不足,可以为空气污染管理人员、公众提供逼真、直观的空气污染表达效果,有利于空气污染的治理。下一步希望能结合某一环保部门,根据具体需求,提供更多的可视化和分析方法。

参考文献

- [1] 刘志全. 环保部:全国1/5城市大气污染严重. 生命与灾害, 2010, 10: 43

- [2] Xu B L. A Prototype of Collaborative Virtual Geographic Environments to Facilitate Air Pollution Simulation: [Ph. D dissertation]. HongKong: CUHK, 2009. 1-260
- [3] Xu B L, Lin H, Long S C, et al. VGE-CUGrid: An integrated platform for efficient configuration, computation, and visualization of MM5. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25: 1894-1896
- [4] 王义祥,孙振海,张攀攀等. 基于 GIS 空气质量模拟结果的表达方法研究. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(2): 46-50
- [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. *测绘科学*, 2011, 36(1): 24-26
- [6] 陈文君,陈锁忠,都娥娥等. 突发性大气污染事故应急监测系统的设计与开发. *地球信息科学学报*, 2011, 13(2): 65-72
- [7] 张攀攀,王义祥,邬群勇等. GIS 与大气环境模型的集成及其应用. *环境科学研究*, 2010, 23(5): 575-580
- [8] Vienneau D, Hoogh K, Briggs D. A GIS-based method for modelling air pollution exposures across Europe. *Science of the Total Environment*, 2009, 408(2): 255-266
- [9] Theophanides M, Anastassopoulou J. Air pollution simulation and geographical information systems (GIS) applied to Athens International Airport. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2009, 44(8): 758-766
- [10] 朱军,林琚,林文实等. 用于大气污染扩散模拟的虚拟地理环境构建研究. *系统仿真学报*, 2008, 20: 176-179

A study on multi-dimensional dynamic visualization of air pollution based on atmospheric pollution dispersion model

Hu Ya^{*}, Zhu Jun^{*}, Lin Hui^{**}, Xu Bingli^{***}, Hu Mingyuan^{**}

(^{*} Department of Remote Sensing and Information Engineering, Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

(^{**} Institute of Space and Earth Information Science, The Chinese University of Hong Kong, Shatin Hong Kong)

(^{***} Department of Information Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract

To solve the problems that the existing methods for visualizing air pollution can not effectively integrate geographic information and can not achieve good visual effects and high-dimension information, a research on multi-dimensional dynamic visualization of air pollution in a three-dimensional space was done, based on the simulation results of the atmospheric pollution dispersion model, and a scheme for multi-dimensional dynamic visualization of air pollution was proposed. Five key technologies for visualization of air pollution, named as three-dimensional geographic scene construction for studying of air pollution, color mapping of pollution concentrations, slices-based visualization of air pollution, cubes-based visualization of air pollution and visualization of air pollution based on any vertical line or vertical plane, were described in detail. A prototype system was developed to implement five spatial and temporal visualization approaches for air pollution in the Pearl River Delta. The results prove that with the technologies addressed in this paper, high-precision and large-scale geographic information can be effectively integrated, a good visualization of air pollution can be achieved, the spatial and temporal distribution of air pollution can be effectively reflected and effective decision supports for air pollution management can be provided.

Key words: air pollution, multi-dimensional dynamic, visualization, atmospheric pollution dispersion model