

6-1-2020

Improved Marching Cubes Algorithm and Its Three-dimensional Meteorological Simulation

Shuoben Bi

School of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

Lu Yuan

School of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

Xiaowen Zeng

School of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

Mingyue Lu

School of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Improved Marching Cubes Algorithm and Its Three-dimensional Meteorological Simulation

Abstract

Abstract: *Method of obtaining intersection points of isosurface and voxel by linear interpolation in original Marching Cubes algorithm has been replaced by the method of trisecting element boundaries.* The problem of linear interpolation not suitable for meteorological data simulation is therefore solved and the number of triangular facets in isosurface mapping is effectively reduced. While reducing redundancy and improving mapping speed, the quality of isosurface mapping is further improved. The improved Marching Cubes algorithm is applied to the simulation of meteorological model data, i.e., the isosurface of WRF data, and good results are obtained in both the speed of image rendering and the quality of rendering.

Keywords

marching cubes algorithm, isosurface, three-dimensional simulation, WRF

Authors

Shuoben Bi, Lu Yuan, Xiaowen Zeng, Mingyue Lu, and Yonghua Zhang

Recommended Citation

Bi Shuoben, Lu Yuan, Zeng Xiaowen, Lu Mingyue, Zhang Yonghua. Improved Marching Cubes Algorithm and Its Three-dimensional Meteorological Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7): 1405-1411.

Marching Cubes 改进算法及其气象三维模拟

毕硕本, 陆源, 曾晓文, 路明月, 张永华

(南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044)

摘要: 用三等分体元边界的方法取代了原始 Marching Cubes 算法中通过线性插值获得等值面与体元交点的方法, 该方法不仅解决了线性插值不适用于气象数据模拟的问题, 还有效地减少了等值面绘制过程中生成的三角面片的数量, 在减少冗余提高绘制速度的同时也进一步提高了等值面图像绘制的质量。将改进之后的 Marching Cubes 算法应用在对气象模式数据即 WRF 数据的等值面模拟中, 在图像绘制速度和绘制质量上均取得了不错的实验效果。

关键词: Marching Cubes 算法; 等值面; 三维模拟; WRF

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 07-1405-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201707003

Improved Marching Cubes Algorithm and Its Three-dimensional Meteorological Simulation

Bi Shuoben, Lu Yuan, Zeng Xiaowen, Lu Mingyue, Zhang Yonghua

(School of Geography & Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Method of obtaining intersection points of isosurface and voxel by linear interpolation in original Marching Cubes algorithm has been replaced by the method of trisecting element boundaries. The problem of linear interpolation not suitable for meteorological data simulation is therefore solved and the number of triangular facets in isosurface mapping is effectively reduced. While reducing redundancy and improving mapping speed, the quality of isosurface mapping is further improved. The improved Marching Cubes algorithm is applied to the simulation of meteorological model data, i.e., the isosurface of WRF data, and good results are obtained in both the speed of image rendering and the quality of rendering.

Keywords: marching cubes algorithm; isosurface; three-dimensional simulation; WRF

引言

目前, 针对台风的可视化研究文献很少, 而且进行台风的数值模拟^[1]大多是通过建立台风的温度模型、风场模型、物理模型等。Sharma^[2]和 Amano^[3]基于实际测量研究了台风的风速剖面、阵

风因子、紊流度和积分尺度的关系与规律。Healey 等^[4]采用颜色可视化方法模拟了三维台风, 但是绘制出的台风显得符号化。朱震毅^[5]基于台风风场模型, 结合实时的卫星云图资料, 对台风的轮廓线、强度、中心移动路径以及移动速度进行了模拟, 再现了台风的发展及运动变化。王长波等^[6]从台风的物理特性出发, 建立了台风模型, 进而模拟出台风风场与物体的交互作用。

本文基于 WRF 模式, 利用全球再分析资料 FNL^[7]对台风“卡特里娜”进行模拟再现, 结合 IDL



收稿日期: 2015-08-11

修回日期: 2016-01-04;

基金项目: 国家自然科学基金(41071253, 41271410);

作者简介: 毕硕本(1965-), 男, 山东昌邑, 博士, 博导, 研究方向为三维可视化、数据挖掘; 陆源(1990-), 男, 安徽芜湖, 硕士生, 研究方向为三维可视化。

<http://www.china-simulation.com>

• 1405 •

与数值天气预报模式,实现台风卡特里娜的三维可视化。在对台风进行三维可视化^[8-9]时,其中最重要的一点就是对台风的等值面进行模拟。本文首先对 MC(Marching Cubes)算法进行改进,并将改进后的 MC 算法应用在对台风的等值面模拟中。

1 实验数据及数据预处理

1.1 数据简介

本文采用的数据为美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的全球再分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL)^[10],从 2005-08-29 T 12:00:00~2005-08-31 T 09:00:00 时共计 58 h 58 个时次。FNL 资料具有分辨率高、资料来源丰富的优点。采用的是世界气象组织推荐的二进制格式 GRIB1 的编码形式。由于观测资料来源的限制,不同时期 FNL 资料获取的同化资料是不同的。资料生成模式分辨率的不断改善,也使不同时期 FNL 资料的时间空间分辨率不同。

当前的 FNL 资料至少收集了过去 58 h 的观测资料,每天 12 次做一个全球性的数据分析。该资料是由 T254L64 谱模式获取的高分辨率资料,同化了地面观测、无线电探空、探空气球、飞机及卫星观测资料。仅参与同化的卫星资料就有热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission satellite, TRMM)、NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)系列卫星、美国国防气象卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)、Earth Probe 卫星和地球静止轨道环境业务卫星(Geostationary Operational Environmental Satellites, GOES)等卫星的成像光谱仪、微波辐射计、臭氧总量测绘光谱仪等不同观测资料。

以文件名为 fnl_2005-08-29_01_00_00 的 FNL 资料为例,该资料为 2005-08-29 T 01:00:00 时的全球性数据分析。该时间段资料有 GRIB1 码和 ON84 码两种格式^[11-12],空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,时间间隔为 1h,累计有 12 个标准等压层(1 000~50 hPa)。

1.2 数据预处理

任何数据都应该是针对不同的研究对象,能够方便、准确,同时能最大限度减少数据失真、反映研究对象的本质特征的描述性的文件。气象数据也不例外,同时气象数据一般分布在等压面上。在气象学中,等压面是高低起伏不平的曲面。本文采用体视化技术中的体绘制要求数据是分布在等高面上的,因此就存在数据由 P (气压)坐标向 Z (高度)坐标的转换。这样的坐标系转换需要遵循气象要素本身的规律,以减少不必要的误差和有效信息为前提,因此并不能随意地选择插值方式^[13-14]。

若知道 N 个等压面上各点的高度分布,需要插值得到等间距的 M 个等高面上的气压,其插值方式的选取如下:在静力平衡的条件下, P 与 Z 的关系为:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial Z} = -\frac{g}{RT} \quad (1)$$

若将该层大气视为等温大气,则式(1)可变为:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial Z} = -\frac{g}{\bar{T}R} \quad (2)$$

式中: P 为干空气的气压; R 为气体常数; g 表示重力加速度; $\bar{T}$ 表示该层的平均温度。由公式(2)可知,气压 P 与高度 Z 成指数关系,所以如果用线性插值方法,结果就不可信了。对于大气中的水汽的分布,由于大气是连续分布的介质,如果已知两个任意高度的水汽值(q_1, q_2),选择拉格朗日插值方法几乎不会造成信息的失真情况。

本文基于中尺度非静力 WRF 模式,对 2005 年台风“卡特里娜”的形成、发展及消散过程(08-29 T 00:00:00~08-31 T 09:00:00 UTC)进行数值模拟。模式采用的是二重嵌套,水平分辨率分别为 12 km, 4 km,对应的嵌套网格分别为 424×325 格点、 202×202 格点,模拟时间从“卡特里娜”发展成为台风(08-29 T 00:00:00 UTC)到其减弱为热带风暴(08-31 T 09:00:00 UTC)。模式垂直方向共分 35 层,模拟时间间隔为 1 h,得出 08-29 T 00:00:00~08-31 T

08:00:00 之间共 58 个时次的模拟结果。模式的内外层嵌套使用 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案; 微物理过程采用简单的冰显水汽方案。行星边界层 (Planetary Boundary Layer, PBL) 方案采用的是高分辨率的 Yonsei University PBL 方案, 同时采用 Non-local-K 机制的 K 廓线, 并将不稳定混合层的流入效应纳入影响因素。

2 MC 算法及其基本原理

对于在三维空间规则数据场中构造等值面的方法有很多种, 其中最具有代表性的就是 Marching Cubes 算法^[15]。它是由 W.E.Lorenson 和 H. E. Cline^[16-19]在 1987 年提出来的。MC 算法之所以能得到广泛的应用, 是由于 MC 算法将三角面片作为中间几何元的基本组成要素^[20], 较好地解决了任意非线性数据场、不规则数据场中进行等值面重建的问题^[21-22]。既然 MC 算法是将三角面片作为等值面绘制的中间几何基本图元, 则势必会存在三角面片的数量和绘制的速度之间的矛盾, 图像绘制的质量和三角面片的数量之间的矛盾。本文的重点就是在确保图像绘制质量的同时尽可能地减少三角面片的数量, 提高图像绘制的速度。原始 MC 算法采用的是线性插值的方法来绘制等值面, 由于本文是对气象数据进行绘制, 前文已交代, 气压 P 与高度 Z 成指数关系, 如果再用线性插值方法, 结果就不大可信了。

MC 方法的核心就是找出穿过体元的等值面, 并相对精确地计算出等值面与体元的交点, 通过交点计算出其相关参数从而绘制出等值面。

用图 1 表示一个离散的三维空间数据场中的一个体元, 并为这个体元的 8 个角点赋予对应的坐标 $V_1 \sim V_8$ 。假设给定等值面的值为 C_0 , 若角点的值 $V_0 > C_0$, 则将角点的值赋值为 1, 并定义该角点位于等值面之内, 同理, 若角点的值 $V_0 < C_0$, 则将角点的值赋值为 0, 并定义该角点位于等值面之外。由此可以推断出如果一个体元的一条边的两个角

点, 一个位于等值面之内, 一个位于等值面之外, 则该体元的这条边必然与等值面相交。

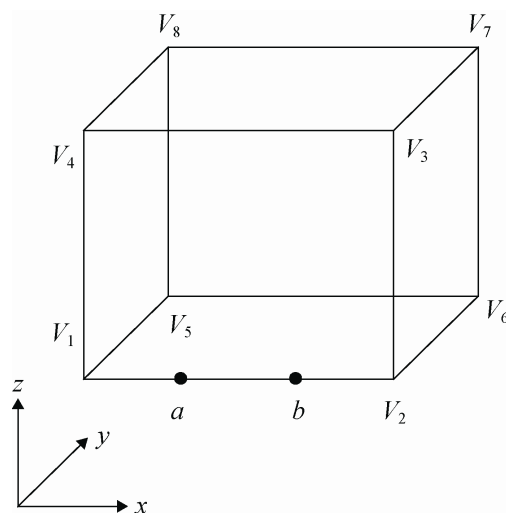


图 1 三维空间规则数据场中的一个体元

Fig. 1 An individual voxel in a three-dimensional spatial regular data field

每个体元有 8 个角点, 每个角点可能有两种状态, 即 0, 1 两种状态, 从而体元就会出现 $2^8=256$ 种状态。尽管判断等值面将与哪些体元相交在原理上很容易理解, 但是要根据这 256 种不同的情况求出每个体元中的等值面却是很繁琐的, 也是很容易出错的。所幸通过体元的旋转对称性和角点的颠倒对称性可以将体元的 256 种状态简化为如图 2 所示的 14 种状态。

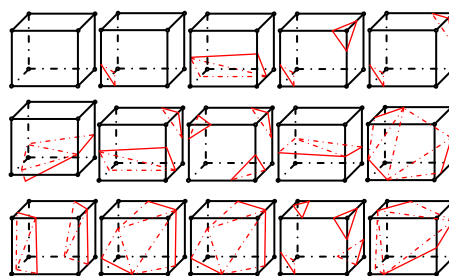


图 2 体元角点函数值分布的不同情况

Fig. 2 Different distributions of angular function values of voxel

通过以上的分析, 如图 3 所示我们刚好可以用一个字节的存储空间构造一个体元的状态链表。将体元角点函数分布的 14 种不同情况列举如图 4 所示。

V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

图 3 体元角点函数分布状态链表(示意)

Fig. 3 Sketch status list for distributions of angular functions

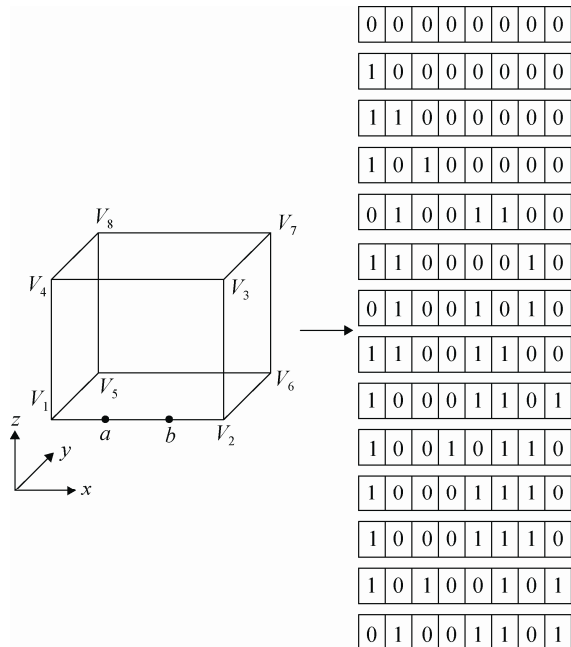


图 4 体元角点函数分布状态链表

Fig. 4 Status list for distributions of angular functions

3 用三等分体元边界产生等值面交点

在原始 MC 算法中,等值面是用大量三角面片来表示的,而三角面片顶点的位置是通过线性插值的方法得到的,之所以能用线性插值的方法,是因为在 MC 方法中,假设了体元边界上与等值面的交点是在体元边界上做线性变化的。当体元较小,数据场密度较高时,通过该假设得出的三角面片与实际的三角面片较为贴近,但反之,若体元较大,数据场密度较高时,则生成的三角面片与实际的三角面片就有较大出入。基于以上和前文的说明,本文提出了将体元各条边进行三等分的方法,即将体元的每条边平均分为 3 段,连 2 个角点在内每条边共 4 个点。前人有提出用体元一条边的中点作为经过该边的等值面的顶点,虽然每个体元都很小,但用中点还是不太精确,用三等分体元边界方法将会比中点更加精确。该方法不仅解决了线性插值不适用于气象数据模拟的问题,而且同样

起到了减少三角面片数降低冗余度,提高算法运行效率的作用。

算法的关键在于如何定位等值面穿过体元边界的位置。

$$\begin{cases} x = x_a + \Delta x \cdot (s_0 - s_a) / (s_b - s_a) \\ y = y_a + \Delta y \cdot (s_0 - s_a) / (s_b - s_a) \\ z = z_a + \Delta z \cdot (s_0 - s_a) / (s_b - s_a) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δx , Δy , Δz 是体元一条边两端点间 x , y , z 坐标距离; x_a , x_b , x_c 是穿过体元边的交点,即等值面的顶点的 x , y , z 坐标; s_a , s_b 是体元一条边上的三分点 a , b 的值(如图 1 所示); s_0 是穿过该等值面的值。若 $s_0 > 1/2\Delta x$, 则取 $s_0 = s_b$ 。若 $s_0 < 1/2\Delta x$, 则取 $s_0 = s_a$ 。

本文提出的三等分边界方法的基础是基于体元内等值面中三角面片的顶点位置的轻微变化对最终图象的生成质量影响很小。这是由于一个体元若有等值面穿过,则最多只会出现 4 个三角面片,而每个三角面片均非常小,有的三角面片甚至比等值面重构图象中的像素点还要小。

4 改进的 MC 算法求等值面流程

改进的 MC 算法求等值面流程可分为以下 7 个步骤:

(1) 将原始数据场的三维离散数据按层依次读入计算机内存中;

(2) 按从上至下,从左至右的顺序逐层对体元进行构造,由相邻两层的体元创建体元的 8 个角点,确保体元创建的规则性;

(3) 标记出每个体元上各个顶点的函数值,并将其与给定等值面的值进行比较,根据比较结果,构造该体元的状态链表;

(4) 根据体元的状态链表,筛选出与等值面有交点的体元边界;

(5) 通过三等分体元边界的方法,确定等值面穿过体元边界的交点;

(6) 根据等值面穿过体元边界的交点以及体元的角点计算等值面中各三角面片的法向量;

(7) 根据各三角面片的法向量以及选择适合的光照模型绘制出三维等值面图像。

改进算法的流程图见图 5 所示。

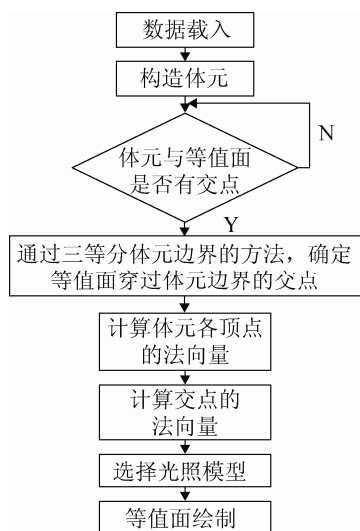


图 5 基于 MC 改进算法的等值面绘制算法流程图

Fig. 5 Flow chart of isosurface rendering algorithm based on MC improved algorithm

5 实验结果及分析

WRF 模式的输出结果为 NC 格式的数据, 利用 IDL 程序读取数据。实际观测数据显示, 飓风“卡特琳娜”在 2005-08-29 发展至鼎盛阶段。为了更好地了解飓风的内部结构, 绘制出 09-28 日时纬向风分量(U)、经向风分量(V)、垂直风分量(W)的等值面三维效果图(其中 $U=-5$, $V=5$, $W=0.001\ 05$)。并用线性插值法、中点法、三等分体元边界法分别对以 2005-08-29_01 数据为例进行模拟, 模拟效果如图 6~8 所示。

用线性插值的 MC 算法与三等分边界的 MC 算法的绘制等值面实验结果比较如表 1 所示(以 2005-08-09_01 为例)。

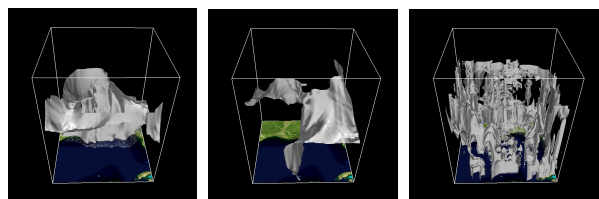


图 6 2005-08-29_01 时次 U, V, W 的等值面(线性插值法)

Fig. 6 The isosurface of U, V and W (linear interpolation)

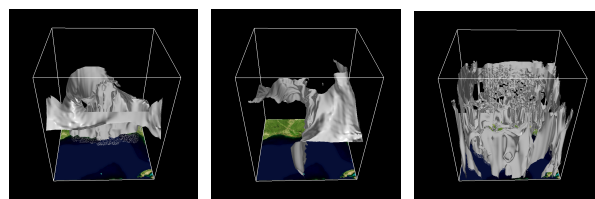


图 7 2005-08-29_01 时次 U, V, W 的等值面(中点法)

Fig. 7 The isosurface of U, V and W (midpoint method)

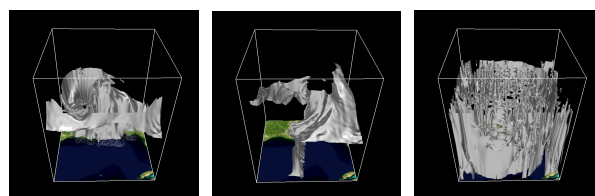


图 8 2005-08-29_01 时次 U、V、W 的等值面
(三等分体元边界法)

Fig. 8 The isosurface of U, V and W (method for three-equal voxel boundaries)

表 1 MC 算法优化前后实验结果比较

Tab. 1 Experimental results before and after optimization of MC algorithm

样本	等值面	三角面片数/个	时间/s
08_09_01	U	线性插值法	249 344
		中点法	248 659
		三等分边界	247 063
	V	线性插值法	208 496
		中点法	206 358
		三等分边界	205 664
	W	线性插值法	932 748
		中点法	930 596
		三等分边界	929 046

由图 6~8 所示, U、V 值较小时用线性插值法还勉强可以模拟, 当 W 值很大的时候, 正如前文所述, 线性插值的方法并不适用于气象数据, 图像会大量丢失。而用中点法和三等分体元边界法就能很好地模拟气象数据。通过实验数据分析可得出用三等分边界的 MC 算法所产生的三角面片数量要比用线性插值的 MC 算法要少, 而且在生成大量三角面片的等值面时, 绘制速度也有明显提升。综上所述, 改进之后的算法在提高绘制质量的同时也提升了绘制速度。

6 结论

本文有两个创新点: 第一是用三等分体元边界

的方法取代了原来算法中通过线性插值的方法获得等值面与体元的交点,解决了线性插值不适用于气象数据的问题。算法改进之后在保证等值面图象绘制质量的同时不仅减少了三角面片的数量,降低了冗余度还提高了绘制速度。第二是将改进之后的 Marching Cubes 算法应用在对气象数据的等值面模拟中,并取得了不错的效果。

当然三等分体元边界的 M C 算法也有其局限性,在模拟一般等值面(非气象数据)时,线性插值法在图像绘制质量上还是略优于三等分体元边界法,因为线性插值法所定位的等值面与体元边界的交点更加贴近于真实情况。若不考虑图像质量上这微小的区别,那三等分体元边界法在图象绘制速率上相比于其他方法还是很有优势的。

参考文献:

- [1] 廖丽恒,周岱,马晋,等. 台风风场研究及其数值模拟 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(11): 1541-1551, 1561. (Liao Liheng, Zhou Dai, Ma Jin, et al. Typhoon Wind-field Research and Its Simulation [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(11): 1541-1551, 1561.)
- [2] Sharma R N, Richards P J. A re-examination of the characteristics of tropical cyclone winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (S0167-6105), 1999, 83(1/3): 21-33.
- [3] Amano T, Fukushima H, Ohkuma T, et al. The observation of typhoon winds in Okinawa by doppler solar [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (S0167-6105), 1999, 83(1/3): 11-20.
- [4] Healey C G, Enns J T. Large datasets at a glance: combining textures and colors in scientific visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 1999, 5(2): 145-167.
- [5] 朱震毅. 台风 3 维建模与视景仿真研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008. (Zhu Zhenyi. 3D Modeling and Scene Simulation Typhoon. Shanghai [D]. Shanghai, China: Tongji University, 2008.)
- [6] 王长波,朱振毅,高岩,等. 基于物理的台风建模与绘制 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 513-517. (Wang Changbo, Zhu Zhenyi, Gao Yan, et al. Physically Based Modeling and Rendering of Typhoon [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 513-517.)
- [7] 邓伟,陈海波,马振升,等. NCEP FNL 全球分析资料的解码及其图形显示 [J]. 气象与环境科学, 2009, 32(3): 78-82. (Deng Wei, Chen Haibo, Ma Zhensheng, et al. Decoding and Graphic Display of the NCEP FNL Global Analysis Data [J]. Meteorological and Environment Sciences, 2009, 32(3): 78-82.)
- [8] 秦绪佳,张勤锋,陈坚,等. GPU 加速的台风可视化方法 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 293-300. (Qin Xujia, Zhang Qinfeng, Chen Jian, et al. GPU Accelerated Typhoon Visualization Method [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(2): 293-300.)
- [9] 李俊山,王蕊,李建军. 三维视景仿真可视化建模技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. (Li Junshan, Wang Rui, Li Jianjun. Visual Modeling Technology for 3D Visual Simulation [M]. Beijing, China: Science Press, 2011.)
- [10] 邓伟,陈海波,马振升,等. NCEP FNL 全球分析资料的解码及其图形显示 [J]. 气象与环境科学, 2009, 32(3): 78-82. (Deng Wei, Chen Haibo, Ma Zhensheng, et al. Decoding and Graphic Display of the NCEP FNL Global Analysis Data [J]. Meteorological and Environment Sciences, 2009, 32(3): 78-82.)
- [11] 李蔚. NECP FNL 资料解码及数据格式转换 [J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(1): 63-68. (Li Wei. Decoding and Convert of NECP-FNL Data [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(1): 63-68.)
- [12] 柏枫,湛孙荣,陈邦怀,等. NCEP FNL 分析资料本地化应用系统设计与实现 [J]. 计算机与自动化, 2013, 32(3): 141-144. (Bai Feng, Zhan Sunrong, Chen Banghuai, et al. How to Design and Implement the Localized Application System of NCEP FNL Data Analysis [J]. Computing Technology and Automation, 2013, 32(3): 141-144.)
- [13] 李培军,张维峰,郭洪涛,等. 气象资料三维技术中的插值问题 [J]. 气象科学, 2005, 25(6): 617-623. (Li Peijun, Zhang Weifeng, Guo Hongtao, et al. The Algorithms of Interpolation in the three-dimension of the Meteorological Data [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005, 25(6): 617-623.)
- [14] 周婷婷,陈文惠. 基于 MODIS 数据和气象观测数据的气温空间插值方法比较 [J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1143-1151. (Zhou Tingting, Chen Wenhui. Comparison of the Temperature Spatial Interpolation Methods Based on MODIS Data and Meteorological Observation Data [J]. Progress in Geography, 2011, 30(9): 1143-1151.)

(下转第 1418 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 1410 •