

海洋叶绿素 a 浓度动态可视化研究

张信雪¹, 吕晓琪¹, 王月明¹, 夏伟¹, 张继凯²

(1. 内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 燕山大学 河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了实现叶绿素 a 浓度数据的三维动态可视化效果, 针对海洋环境数据多维、多时间及多格式等特点, 在全面分析 NetCDF(network Common Data Form)数据模型的格式、存储的基础上, 结合 GPU(Graphics Processing Unit)与 osgEarth 三维地球虚拟场景, 提出一套海洋环境中叶绿素 a 浓度的动态可视化方法。实验表明, 该方法具有一定的可行性和高效性, 为海洋环境数据的动态可视化与分析提供了强有力的可视化平台。

关键词: 多维; NetCDF(network Common Data Form); osgEarth; 动态可视化

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)03-0075-05

DOI: 10.11759/hyxx20160824001

叶绿素 a 是海洋中浮游植物光合作用的一种色素, 它是海洋中初级生产力的指标, 用以评定海洋中浮游植物的现存量, 对海洋中生态系统的稳定性研究、渔业以及海洋养殖业有着重要意义^[1]。由于海洋面积较大, 数据较多, 叶绿素 a 浓度数据的获取较为困难, 因此, 基于卫星的遥感技术是获取数据的主要手段^[2-4]。由于数据存储和处理方式的不同, 也造就了其数据的多维和多样性, 且与时间信息密切相关的特点。如何实现其统一管理 & 表达, 特别是三维动态的表达是目前数据可视化研究的热点之一^[5]。肖如林等^[6]分析了三维虚拟地球在海洋数据处理方面应用的优势, 并在此基础上, 研发了一套三维海洋信息操作平台系统, 实现了大量海洋环境数据的集成和可视化; 涂超等^[7]采用了插值法连续生成了海洋温度的三维空间数据场, 融合了体视化技术, 提出了海洋温度场的三维可视化方法; 何亚文等^[8]重点介绍了时空可视化的方法, 并提出了中国南海的海洋环境数据的可视化架构原型系统, 突出了面向过程的可视化方法; 李久松等^[9]结合了 VC++ 和 CG 着色语言, 提出了包括探针功能、线模式等面向海洋、大气数据的模式分析法, 实现了海洋大气数据向三维空间图像的动态演变, 在实时动态的可视化图形的基础上得到海洋大气数据的动态变化过程。

本文以 osgEarth 三维虚拟地球为场景, 以叶绿素 a 浓度为研究对象, 提出一套海洋环境中叶绿素 a 浓度的动态可视化方法, 实现了叶绿素 a 浓度的三维动态可视化; 利用 C++ 读取 NetCDF(network

common data form)数据模型进行数据表达, 实现了海洋环境数据的统一管理; 根据海洋环境数据领域的应用特点, 研究三维虚拟地球中叶绿素 a 浓度的动态可视化方法, 揭示了其基于三维虚拟地球的海洋环境数据动态可视化研究与现象的变化规律和实时查询特征。最后, 构建海洋三维可视化系统进行试验, 验证本文理论、技术和方法的可行性与高效性。

1 基于 NetCDF 数据模型的读取

常用的海洋数据中的叶绿素 a 浓度存储格式有 ASCII(文本)文件、二进制文件、NetCDF 及 HDF 格式等^[10]。本文的叶绿素 a 浓度数据格式采用 NetCDF 数据格式, 该数据格式具有平台无关性、高可用性和自描述性等特点。而 NetCDF 存储的数据是一个自变量的单值函数^[11], 如公式(1)所示。

$$f(x, y, z, \dots) = \delta \quad (1)$$

其中函数的自变量 x, y, z 等为维(dimension)或坐标轴(axis), 函数值 δ 为变量(Variables)。常见的海洋

收稿日期: 2016-08-24; 修回日期: 2016-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(81460279); 内蒙古科技大学优秀青年基金项目(2016YQL09)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.81460279; Inner Mongolia University of Science and Technology outstanding youth fund project, No.2016YQL09]

作者简介: 张信雪 (1991-), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、可视化及可视化分析研究, 手机号: 15947083267, E-mail: 514466933@qq.com; 吕晓琪(1963-), 通信作者, 男, 博士, 二级教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能图像处理、虚拟现实, E-mail: 247899043@qq.com

环境数据的存储均是以一系列二维数组的形式存储^[12],

如图 1 为三维及四维数据的存储。

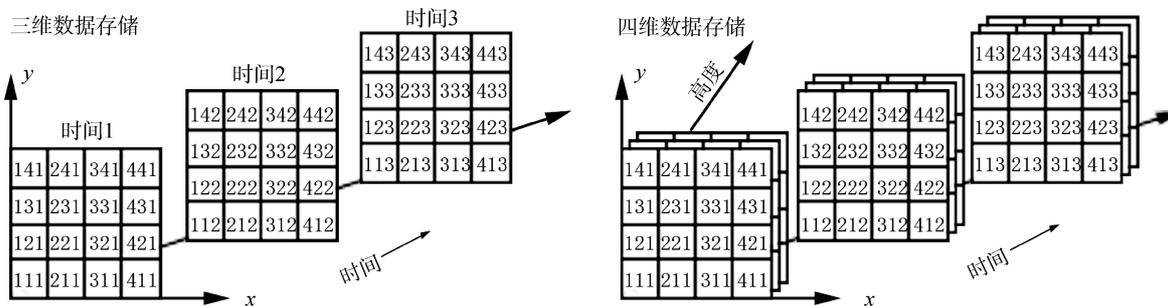


图 1 三维及四维数据的存储

Fig. 1 Storage of three- and four-dimensional data

2 基于 2.5 维面的叶绿素 a 浓度数据可视化

2.5 维面是 R^3 中描述的空间曲面, 它将特殊的三维信息加载到了二维平面上, 使得在整个曲面中, 水平方向上的任一点 (x, y) 都只有唯一一个数值 z 与之对应。其中数值 z 为规定范围内规则网格点的平面二维坐标 (x, y) 所对应的高程值等。文中使用的叶绿素 a 浓度数据可视化即采用 2.5 维面可视化方法, 利用颜色映射、坐标变换以及数据的动态表达在球面上进行叶绿素 a 浓度数据的绘制。将其从二维平面转换到三维球面显示, 并实现连续播放的效果。

2.1 数据的映射

数据映射是将源数据转换为几何数据^[13]。数据可视化最终的变现方式为不透明度以及颜色。本文采用的是彩色映射方式, 选取颜色映射表(图 2), 每个数据值都与一种映射表中的颜色相对应, 根据不同的数据值选取相应的颜色值。其中蓝色表示低值, 红色表示高值, 生成一副可表示数值分布规律的可视化图像。



图 2 颜色映射表

Fig. 2 Color mapping table

首先假设叶绿素 a 浓度的源数据有效阈值范围为 $[T_1, T_2]$, 则相应的归一化处理可表示为:

$$d = \frac{d_0 - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

其中, d_0 为任意源数据。 d 为归一化后数据, 即纹理数据, 将其传入 GPU(graphics processing unit)中进行可视化图片绘制。在绘制过程中, 纹理数据的数值与

映射表中颜色一一对应, 映射表中的颜色具体表示为 RGBA 的形式, 该形式的取值范围是 0~255。具体流程如图 3 所示, 与传统的映射法相比, 彩色映射得到的颜色分布相对均匀, 进而可以更有效地区分出标量参数的强度分布。

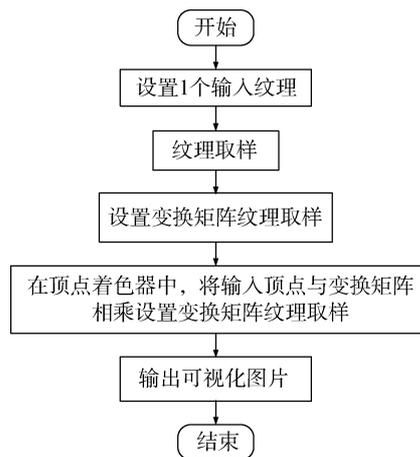


图 3 GPU 渲染流程图

Fig. 3 Flow chart of GPU rendering

2.2 数据的坐标变换

osgEarth 三维地球虚拟场景中, 选取一个密集的矩形网格为可视化结果载体, 将其可视化结果呈现在地球表面上^[14], 具体过程如图 4 所示。其中, 平面网格的横坐标(0~1)转换为地球的经度, 表示范围是 $180^\circ W \sim 180^\circ E$; 纵坐标(0~1)转换为地球的纬度, 范围是 $90^\circ S \sim 90^\circ N$ 。坐标变换之后, 原平面网格便可以贴合于地球表面, 形成球面网格, 完成可视化结果在地球表面上显示, 具体变化过程分为三步:

1) 顶点的平面坐标向纹理坐标转换, 见公式(3)所示,

$$x_t = \frac{x_p}{N_{lon}}, y_t = \frac{y_p}{N_{lat}} \quad (3)$$

公式中 (x_p, y_p) 为顶点的平面网格坐标, N_{lon} 、 N_{lat} 为经、纬度上采样点数, (x_t, y_t) 为转换后点的纹理坐标。

2) 纹理坐标转换为经度、纬度和高度坐标, 如公式(4)所示:

$$\begin{aligned} \theta_{lon} &= \theta_{lon, min} + (\theta_{lon, max} - \theta_{lon, min})x_t, \\ \theta_{lat} &= \theta_{lat, min} + (\theta_{lat, max} - \theta_{lat, min})y_t, \\ H_{alt} &= T\alpha + \beta \end{aligned} \quad (4)$$

其中 θ_{lat} 、 θ_{lon} 、 H_{alt} 分别为要转化成的纬度、经度和高度, T 为数据纹理中坐标 (x_t, y_t) 处的数据, α 、 β 指的是高度缩放系数, 其可任意放大、缩小高度比例, 便于直观查看、分析数据分布规律。

3) 经度、纬度、高度坐标向地球上坐标转换, 如公式(5)所示:

$$\begin{aligned} X &= (N + H_{alt}) \cos \theta_{lat} \cos \theta_{lon}, \\ Y &= (N + H_{alt}) \cos \theta_{lat} \sin \theta_{lon}, \\ Z &= [N(1 - \gamma) + H_{alt}] \sin \theta_{lat} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{r_e - r_p}{r_e}, \gamma = 2\varepsilon - \varepsilon^2, N = \frac{r_e}{\sqrt{1 - \gamma \sin^2 \theta_{lat}}} \quad (6)$$

公式中 X 、 Y 和 Z 是地球表面坐标, r_e 、 r_p 是地球赤道半径、两极半径, γ 、 N 由公式(6)计算所得。

坐标变换后, 地球表面呈现出了原矩形平面网格, 如图 4 右边所示。其中, 平面网格的横坐标对应地球纬度, 纵坐标对应地球经度。

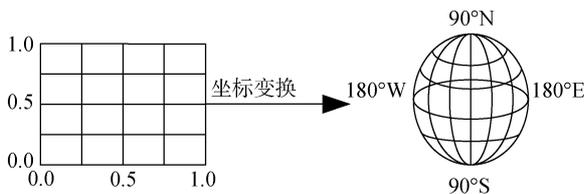


图 4 矩形网格到球面网格坐标变换

Fig. 4 Coordinate transformation from rectangular to spherical grids

2.3 数据的动态表达

海洋数据中标量场的时空过程一般有点过程、线过程、面过程及体过程, 但像温度、水汽和叶绿素 a 浓度等基本海洋标量场要素的时空三维动态可视化^[15]变化过程主要表现在点过程和面过程。文中只针对海洋中叶绿素 a 浓度数据的三维动态可视化进行探讨。

点方式指的是任意固定点位置上要素的时间变化, 并以不同的大小或颜色表述要素值, 同时关联

每个点对象的属性信息, 方便交互以及查询。使用该方式进行要素值可视化表达时需要渲染大量点对象。因此采用 LOD(levels of detail)动态调度技术, 实现了海洋中大量要素数据值的动态调度, 最终有效地提高了可视化表达效率。此外, 点方式的可视化支持任意时间、区域的数据抽取以及渲染, 有利于交互的调整颜色带, 提高可视化效果。图 5 为以点方式表达海洋中叶绿素 a 浓度数据的效果图, 其中, 不同的颜色、分布体现了不同的浓度值。

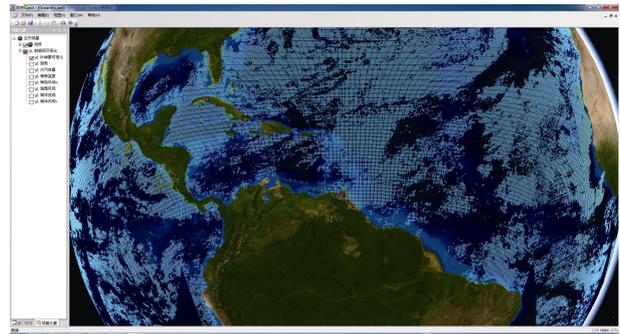


图 5 叶绿素 a 浓度点方式可视化效果图

Fig. 5 Visualization of chlorophyll a concentration with point mode

面方式指的是一定区域内要素的时空变化。它以三维虚拟地球场景的对象渲染机制为基础, 直接构建与时空相关联的表面对象, 结合纹理映射技术达到海洋中标量场数据的多维动态可视化表达, 文中使用的数据包含了全球海洋叶绿素 a 浓度信息, 其中, 空间分辨率为 9 km, 时间分辨率是 1 d, 网格数是 $4\ 320 \times 2\ 160$, 其可视化效果如图 7 所示。

以时间顺序为基础, 通过点、面方式进行海洋中叶绿素 a 浓度数据的三维动态可视化表达, 展示出海洋中叶绿素 a 浓度随着时间的动态变化, 形象而直观地动态表达出叶绿素 a 浓度的变化过程。叶绿素 a 浓度数据可视化流程如图 6 所示。

3 实验与应用

基于以上研究工作, 依托于 Visual Studio C++ 2010 开发语言, 使用 OSG(OpenSceneGraph, 开源的高性能 3D 图形开发工具包)和 MFC(微软基础类库技术), 以 osgEarth 三维虚拟地球为可视化平台, 实现了对海洋中叶绿素 a 浓度的动态可视化表达。

选用 2016 年 1 月全球海洋叶绿素 a 浓度为实验测试数据。实验测试硬件环境: 操作系统为 win7 64 位, 处理器为 CPU-Intel i7, 内存为 32 GB, 显卡为

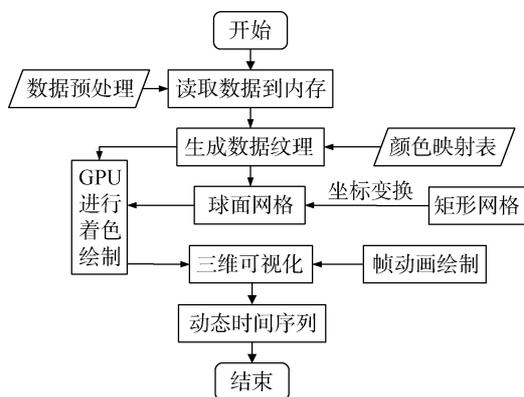


图 6 动态可视化交互式流程图

Fig. 6 Flow chart of dynamic visualization

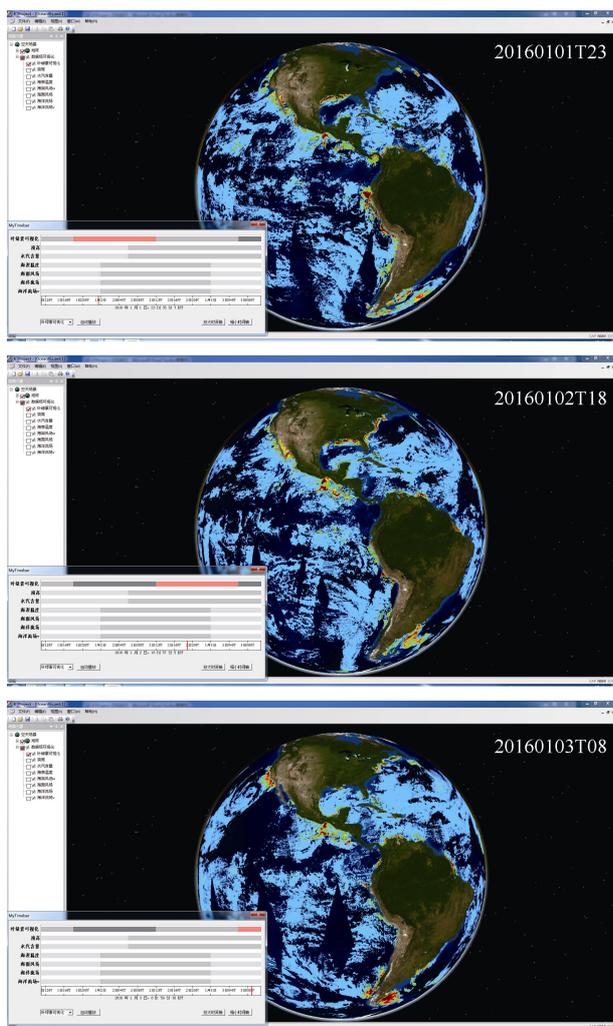


图 7 动态播放过程中不同时间段内叶绿素 a 浓度可视化效果

Fig. 7 Visualization of chlorophyll a concentration during different dynamic player times

NVIDIA GTX 980 Ti。其中图 7 为动态播放过程中不同时间段内叶绿素 a 浓度可视化效果图，图中左下方

为坐标轴。从图中可以明显观察到 3 个不同时间内叶绿素 a 浓度分布情况。

4 结束语

本文在海洋环境数据可视化方面，建立了时间序列动态可视化模型，并且介绍了 NetCDF 数据类型与存储。并结合 GPU 与 osgEarth 三维地球虚拟场景，基于 2.5 维面的颜色映射、坐标变换以及数据的动态表达，提出一套海洋环境中叶绿素 a 浓度的动态可视化方法，实现了叶绿素 a 浓度数据的三维动态可视化效果。

海洋中叶绿素 a 浓度数据管理与可视化以及虚拟地球场景相结合，能够充分展现叶绿素 a 浓度在时间和空间上的动态分布情况，有利于评定海洋生态系统的稳定性及海洋渔业、养殖业的经济效益，具有一定的人文价值与经济价值。

参考文献:

- [1] 王菲菲, 章守宇, 林军. 象山港海洋牧场规划区叶绿素 a 分布特征研究[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(2): 266-273.
Wang Feifei, Zhang Shouyu, Lin Jun. Study on distribution characteristics of chlorophyll a in Xiangshan harbor marine ranch planning area[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(2): 266-273.
- [2] 付东洋, 潘德炉, 丁又专, 等. 台风对海洋叶绿素 a 浓度影响的定量遥感初探[J]. 海洋学报, 2009, 31(3): 46-56.
Fu Dongyang, Pan Delu, Ding Youzhan, et al. Quantitative remote sensing of the influence of typhoon on marine chlorophyll a concentration[J]. Journal of Oceanography, 2009, 31(3): 46-56.
- [3] 高国兴, 王振占, 陈标, 等. 陆架区海洋内波传播特性遥感方法分析[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(5): 790-795.
Gao Guoxing, Wang Zhenzhan, Chen Biao, et al. Remote sensing analysis of marine internal wave propagation characteristics in Shelf Area[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(5): 790-795.
- [4] 徐京萍, 赵建华. 遥感技术在海域使用动态监测中的应用[J]. 卫星应用, 2016(6): 35-39.
Xu Jingping, Zhao Jianhua. Application of remote sensing technology in dynamic monitoring of Sea Area[J]. Satellite applications, 2016(6): 35-39.
- [5] 王想红, 刘纪平, 徐胜华, 等. 基于 NetCDF 数据模型的海洋环境数据三维可视化研究[J]. 测绘科学, 2013, 38(2): 59-61.
Wang Xianghong, Liu Jiping, Xu Shenghua, et al. Research on 3D visualization of marine environment data based on NetCDF data model[J]. Surveying Science,

- 2013, 38(2): 59-61.
- [6] 肖如林, 苏奋振, 杜云艳, 等. 三维虚拟地球的海洋信息适用性分析及原型研究[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(4): 555-561.
Xiao Rulin, Su Fenzhen, Du Yunyan, et al. Applicability analysis and prototype study on marine information of 3D virtual earth[J]. Journal of Earth Information Science, 2010, 12(4): 555-561.
- [7] 涂超. 海洋温度场的三维可视化[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(6): 126-128.
Tu Chao. 3D visualization of marine temperature field[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science), 2007, 40(6): 126-128.
- [8] He Yawen, Su Fenzhen, Du Yunyan, et al. Web-based spatiotemporal visualization of marine environment data[J]. Chinese Journal of Oceanology & Limnology, 2010, 28(5): 1086-1094.
- [9] 李久松, 常晓峰, 田丰林, 等. 海洋和大气数据多模式动态可视化系统的设计和实现[J]. 海洋科学, 2014, 38(1): 10-14.
Li Jiusong, Chang Xiaofeng, Tian Fenglin, et al. Design and implementation of multi-mode dynamic visualization system for ocean and atmospheric data[J]. Marine Sciences, 2014, 38(1): 10-14.
- [10] 马伟霞. 基于 i4Ocean 平台的多源海洋数据同一化与可视化技术的研究与实现[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Ma Weixia. Research and implementation of multi-source marine data homogeneity and visualization technology based on i4Ocean platform[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [11] 孙建伟, 孙昭晨, 陈轩, 等. NetCDF 格式数据的创建及应用[J]. 交通标准化, 2010, 15: 31-34.
Sun Jianwei, Sun Zhaochen, Chen Xuan, et al. Creation and application of NetCDF format data[J]. Traffic Standardization, 2010, 15: 31-34.
- [12] ArcGIS Resource Center. 地理数据类型[EB/OL]. [2011-11-8]. <http://help.arcgis.com/zh-cn/arcgisdesk-top/10.0/help/index.html>.
ArcGIS Resource Center. Geographic data type[EB/OL]. [2011-11-8]. <http://help.arcgis.com/zh-cn/arcgisdesk-top/10.0/help/index.html>.
- [13] 刘芳. 信息可视化技术及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Liu Fang. Information visualization technology and application research[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [14] 董文, 张新, 江毓武, 等. 基于球体的海洋标量场要素的三维可视化技术研究[J]. 应用海洋学学报, 2010, 29(4): 571-577.
Dong Wen, Zhang Xin, Jiang Yuwu, et al. Research on 3D visualization technology of marine scalar field based on sphere[J]. Journal of Applied Oceanography, 2010, 29(4): 571-577.
- [15] 刘文亮, 苏奋振, 杜云艳. 海洋标量场时空过程远程动态可视化服务研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(4): 513-519.
Liu Wenliang, Su Fenzhen, Du Yunyan. Research on remote dynamic visualization of spatio-temporal process of marine scalar field[J]. Journal of Earth Information Science, 2009, 11(4): 513-519.

Dynamic visualization of marine chlorophyll a concentration

ZHANG Xin-xue¹, LÜ Xiao-qi¹, WANG Yue-ming¹, XIA Wei¹, ZHANG Ji-kai²

(1. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Received: Aug. 24, 2016

Key words: multi-dimensional; NetCDF (network common data form); osgEarth; dynamic visualization

Abstract: In this study, we realize three-dimensional dynamic visualizations of chlorophyll a concentration data. Marine environmental data are characteristically multi-dimensional, multi-time, and multi-format. Based on a comprehensive analysis of the format and storage used in the network common data form (NetCDF) data model, combined with GPU(a graphics processing unit) and osgEarth 3D earth virtual scenes, we propose a marine dynamic visualization method for representing chlorophyll a concentrations. Our results show this method to be feasible and efficient in providing a powerful platform for dynamic visualization and the analysis of marine environmental data.

(本文编辑: 刘珊珊)