引文格式：黄丙湖, 董永, 王福源, 等. 基于粒子的珠江口海流可视化方法研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6): 68-71. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.06.017

基于粒子的珠江口海流可视化方法研究

黄丙湖[1]，董　永[1*]，王福源[1]，何亚文[1]
（1. 中国石油大学（华东）海洋与空间信息学院，山东 青岛 266580）

摘　要：以珠江口海域为研究区域，设计了一种基于粒子的海流可视化数据预处理方法，即采用改进的点中心缓冲区抽稀算法对海流数据进行抽稀；利用海流数据矢量合成计算方法将海流点数据转换为粒子数据，设计特定JSON数据结构进行数据存储。完成数据预处理后，通过搭建海流粒子动态可视化展示平台读取JSON数据，实现了NetCDF格式的海流数据以粒子形式时空动态可视化效果，解决了海流可视化静态、不直观的问题。

关键词：NetCDF；海流可视化；数据抽稀；粒子系统
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0068-04

Research on Visualization Method of the Pearl River Estuary Ocean Current Based on Particle

HUANG Binghu[1], DONG Yong[1], WANG Fuyuan[1], HE Yawen[1]
(1. College of Oceanography and Space Information, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Taking the Pearl River Estuary as the research area, we designed a data preprocessing method of ocean current visualization based on particle. Firstly, we used a data-thinning algorithm of improved point-center buffer to thinning ocean current data, and used the ocean current data vector synthesis method to convert the current point data into particle data. And then, we designed specific JSON data structures for data storage. After data preprocessing, we read JSON data by building a current particle dynamic visualization display platform, which could realize the spatio-temporal dynamic visualization effect of ocean current data in network common data format(NetCDF) in the form of particles, and solve the problems of static and non-intuitive ocean current visualization.

Key words: NetCDF, ocean current visualization, data thinning, particle system

NetCDF是一种面向数组型并适于网络共享的数据描述和编码标准，最初是用于存储气象科学中的数据，现已成为许多数据采集软件生成文件的格式。目前已有MATLAB、ArcGIS等工具可以对NetCDF文件进行数据的读取及可视化，但是对于海流数据可视化多是以静态箭头形式进行展示，可视化效果不佳[1]。

基于粒子系统的可视化方法是将运动的流体质点看作粒子，借助粒子的产生、流动与消失过程来模拟整个流场变化，从而能够很好地模拟风、火、云等自然景象[2]。目前，基于粒子系统的流场可视化有相关研究工作[3-6]，然而，这些方法均是对于粒子系统的可视化效果进行优化的相关研究，而对于可视化前海流数据预处理方法的相关研究较少。

珠江口海域位于我国南海北部，海域情况复杂，岛屿较多，海水运动同时受径流、地形及气象条件等多方面影响，研究其海流变化情况有利于航海业、渔业等多领域的工作。本文针对NetCDF海流数据可视化静态、不直观问题，以珠江口海域为研究区域，基于粒子的海流可视化数据预处理方法，从而解决海流数据无法在Web端直接读取进行可视化的问题，实现NetCDF格式海流数据在Web端基于粒子形式的动态可视化效果。

1　技术路线

基于粒子的珠江口海流可视化方法在整体技术路线上可划分为海流数据预处理与海流可视化系统两部分，其中海流数据预处理由数据抽稀、矢量合成以及数据存储3个步骤构成，技术路线如图1所示。

收稿日期：2021-12-14；修回日期：2022-02-08。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41976184）。
第一作者简介：黄丙湖（1977—），博士，副教授，主要研究方向为GIS开发、空间分析，E-mail：huangbhu@163.com。
通信作者：董永（1996—），硕士研究生，主要研究方向为海洋数据可视化、GIS开发，E-mail：dy96930@163.com。

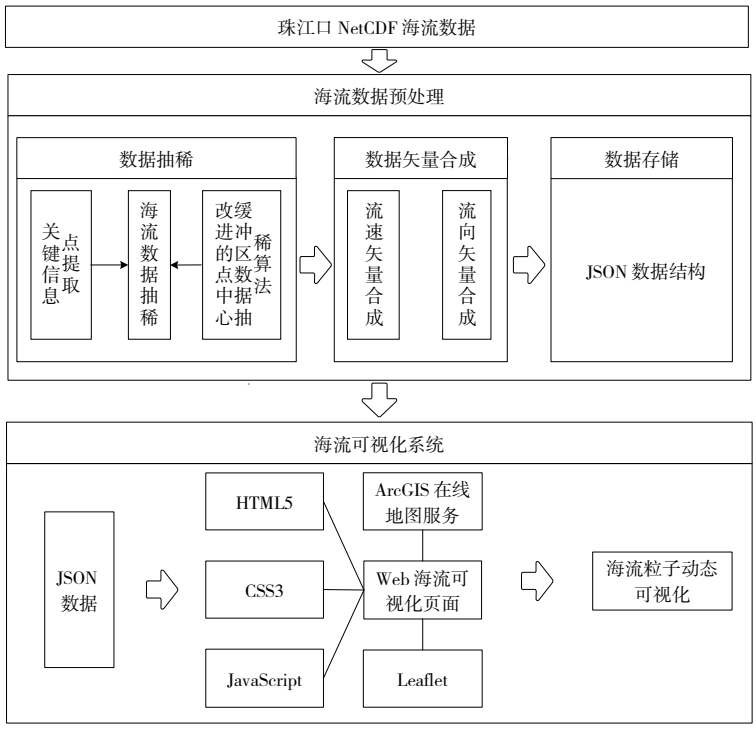


图1　总体技术路线图

2　基于粒子的海流可视化数据预处理方法

2.1　海流数据抽稀

珠江口海流区域内每小时海流点数据量为704 373，在进行可视化时由于数据量较大影响海流可视化速度，并且可能会出现流场符号覆盖问题，从而影响可视化效果。因此，在可视化前需要对海流数据进行抽稀[7]，抽稀主要需要解决采用何种方式将样本从总体中选出。

目前已有的数据抽稀算法可分为两大类：非选择性抽稀算法与选择性抽稀算法[8]。非选择性数据抽稀算法的优势在于抽稀速度，但在抽稀过程中一些数据的关键特征信息会有所丢失。选择性抽稀算法是为解决非选择性抽稀算法的劣势而被提出，主要目的是在数据抽稀过程中保留关键的特征信息点。本文所研究的数据关键信息点主要是在一定区域范围内海流数值大小及流向与周围海流数据存在较大差异的数据奇异值，这些数据对于研究海洋区域变化及航海导航等工作具有一定意义，因此优先予以保留。

2.1.1　海流数据关键信息点提取方法

在整体海流区域范围较广，地理位置相差较远的海流数值偏差较大属于正常情况，因此本文没有采用全局Moran’s I指数，而是采用基于空间自相关的局部Moran’s I指数方法提取海流数据关键信息点。局部Moran’s I指数计算方式为：

$$I_i=\frac{Z_i}{S^2}\sum_{i\neq j}^{n}w_{ij}Z_j \tag{1}$$

式中，$Z_i=y_i-\bar{y},Z_j=y_j-\bar{y},S^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2$；$w_{ij}$ 为空间权重值；n 为研究区域上所有局部区域的总数；I_i 为第 i 个局部区域的莫兰指数。应用到当前研究场景，$y_{i(j)}$ 为第 $i(j)$ 个局部区域的平均流速（或流向），从局部Moran’s I指数计算公式可看出，I_i 的正负取决于 Z_i 和 $\sum_{i\neq j}^{n}w_{ij}Z_j$ 两部分，前者可反映出第 i 个局部区域平均流速（或流向）与整个研究区域平均水平之间的高低情况，后者则反映出第 i 个局部区域周边区域与整个区域水平之间的高低情况。2个式子都有高低2种可能性，两两组合，共有4种情况。

利用GeoDa工具分别对海流流速和流向进行单变量局部Moran’s I分析后所得到的Moran散点图及聚类地图，其中流速Moran’s I指数达到了0.996，流向Moran’s I指数达到了0.932，具有较强的空间相关关系。从聚类地图中也可以看出，二者均存在较为明显的局部空间聚集关系。空间聚集关系共有5种形式，分别为不显著关系、高高聚集、低低聚集、高低聚集以及低高聚集，高高聚集、低低聚集是指流速较大区域的附近区域流速也大，流速较小区域的附近区域流速也小，符合海流基本特征[10]。而高低聚集则是指在低流速区域的局部高流速聚集区域，低高聚

集则是指在高流速区域的局部低流速聚集区域，这些便是海流的奇异值数据，因此赋予更高的数据权重，在进行数据抽稀的过程中相比一般海流数据点优先予以保留。

2.1.2 基于改进的点中心缓冲区海流抽稀算法

基于点中心缓冲区的海流抽稀算法是以某海流点为中心，根据设定的半径做圆形缓冲区，对落在缓冲区内所有海流点根据特定的抽稀方法进行数据筛选。然而，该算法是按照固定半径形式进行数据抽稀，在进行缩放查看某区域详细海流情况时就会出现数据分辨率较低而导致数据误差较大的问题。针对这一问题，本文设计了一种对该算法的改进方法，改进的主要思想是针对不同比例尺下抽稀的方式也随之发生改变，实际操作过程中体现在对于缓冲区半径的设定。根据多次实验得出根据当前地图比例尺来获得缓冲区半径的最佳效果计算方式：

$$R=\frac{k}{100\times \text{scale}} \tag{2}$$

式中，R 为缓冲区半径；scale 为当前地图比例尺；k 为参考比例尺；k 值根据海流可视化区域及海流原始数据密度而设定，同时 scale 作为当前地图比例尺也要根据海流可视化区域及海流原始数据密度而限制范围，scale 过小则会出现抽稀过度问题；scale 过大则会出现因原始数据密度原因出现无效抽稀问题。利用改进后的算法，能够避免原始算法无法通过缩放后地图范围提供更精确海流数据的弊端，增强海流可视化效果。

根据当前地图比例尺及参考比例尺计算出缓冲区半径以对海流点做圆形缓冲区，对于落在缓冲区内的点位进行筛选，上一小节所提取出的拥有更高数据权重的海流数据关键信息点优先予以保留，删除权重较低的数据点，从而达到数据抽稀目的，同时又能够保留海流数据关键信息点，并且能够在不同比例尺下展现出较佳的可视化效果。

2.2 海流数据矢量合成计算

表1所示为珠江口海流区域的NetCDF海流数据主要属性。海流数据值在NetCDF当中以 f（time，siglay，nele）的方式进行存储，根据指定时间（time）、流层（siglay）以及网格索引（nele）即可得到由经度（lon）、纬度（lat）、正东方向流速（u）或正北方向流速（v）组成的海流数据。

要进行基于粒子系统的海流可视化，便要将粒子系统与海流建立数据表达关系。通过设计合适的海流数据网格，用于存储海流数据信息，将海流数据通过网格与粒子建立相应的数量关系及位置关系，粒子的密度及粒子运动轨迹便可以通过数据网格来确定，从而达到粒子形态的海流可视化效果。因此，除了要能够直接读取到经纬度数据确定具体位置信息外，需要对流速分量 u、v 进行矢量合成计算从而得到海流的实际流速及流向。

表1 海流数据属性

字段	含义	说明
time	时刻	时间精度为1 h，包含24个时刻
siglay	数据层数	包含5层海流数据
nele	网格索引数	海流数据位置索引0~704 372
units	流速单位	（$m\cdot s^{-1}$）
long_name	描述海流方向	包含正东（u）与正北（v）方向

u 的具体数值为正时表示指向正东方向，为负时表示指向正西方向；v 的具体数值为正时表示指向正北方向，为负时表示指向正南方向。根据 u、v 各自数据的数值来进行真实海流流速大小及流向角度的计算。

矢量合成的过程中，流速及流向的计算方式分别为：

$$\text{speed}=\sqrt{u^2+v^2} \tag{3}$$

$$\text{direction}=\begin{cases}\dfrac{180}{\pi}\times\arctan\dfrac{u}{v}, & u>0,v>0\\ \dfrac{180}{\pi}\times\arctan\dfrac{u}{v}+180, & u>0,v<0\\ \dfrac{180}{\pi}\times\arctan\dfrac{u}{v}+180, & u<0,v<0\\ \dfrac{180}{\pi}\times\arctan\dfrac{u}{v}+360, & u<0,v>0\end{cases} \tag{4}$$

式中，speed 为 u、v 进行矢量合成后的流速真实大小；direction 为 u、v 进行矢量合成后的真实流向值，流向值为以正北方向为0°起，顺时针方向旋转的角度值，取值区间为[0°，360°）。流向值作为判断流向的指标，在实现粒子运动时为粒子的运动轨迹提供数据来源。

在进行海流数据读取与矢量合成计算后，海流数据点位置信息不再由原始海流点数据的位置索引nele来确定，而是由存储数据点的数据网格位置信息lon、lat来进行确定，本文以海洋表层流场数据的可视化为研究对象，因此siglay属性值默认取0。此时设计的海流网格数据便可由 f（time，lon，lat，speed，direction）来进行数据表达，由此便可直接获取到指定时间与位置的粒子运动速度及方向信息。

2.3 数据存储结构设计

JSON是一种轻量级的数据交换格式，数据解析简单，数据交互速度快，并且兼容性广泛，能够支持不同浏览器和操作系统的数据读取。本文通过设计特

表2　JSON数据结构

数据变量		详细描述
header	ParameterName	判别海流流速、流向数据
	ParameterUnit	数据单位，此处流速单位为$m.s^{-1}$
	dx/dy	数据网格经/纬跨度，即数据的空间分辨率
	lat1/lat2	定义海流可视化区域的起始/结束纬度值
	lon1/lon2	定义海流可视化区域的起始/结束经度值
	nx/ny	以dx/dy为网格宽度/高度时，在经度/纬度取值范围内的横向/纵向网格数，*nx*、*ny*相乘即为总网格数量
	refTime	当前数据的时间信息，时间分辨率为1 h
data	[data]	以数组方式存储的海流数据值

定JSON数据结构，将处理后的数据存储，在Web端进行读取、渲染与展示。JSON数据设计结构如表2所示。

3　基于粒子的海流可视化系统实现

本文基于开源JavaScript库Leaflet、ArcGIS在线底图服务，结合基于粒子的海流可视化数据预处理方法，设计了海流粒子动态可视化系统。通过数据预处理方法对NetCDF海流数据进行处理后，Web端的可视化系统便可读取到海流JSON数据，根据数据生成经纬度网格以及插值网格，通过双线性插值方法计算出数值空白区域粒子流向和流速大小；随后初始化生成粒子，在屏幕上生成一系列粒子位置，通过查询海流数据以获得其当前位置的粒子数值；根据流向数据定义粒子的下一步运动状态，其下一步运动状态由当前位置与流向来确定；同时根据流速大小映射为粒子的颜色样式，由此根据粒子颜色便可观察出不同位置流速的相对大小，利用canvas对象绘制粒子的流动轨迹，并进行不停地回调以保持动画的效果。当整个页面的可视区域发生变化时，先隐藏流场动画，再根据可视区域重新绘制流场动画。

本文实验数据为2020年6月18日—2020年7月14日NetCDF格式的珠江口海洋流场数据，时间分辨率为1 h。通过时间选择器以及时间轴以展示某时刻海流情况，鼠标在海流区域内进行移动时，左下角区域实时显示当前位置流速大小及流动方向。

在通过对海流数据进行抽稀、矢量合成计算、以及数据存储结构设计，在可视化平台上能够以动态粒子的形态对海流数据进行可视化展示，以动态粒子形式所展现的海流效果能够直观地表达出海流的实时情况以及流动趋势，并且通过粒子颜色及运动速度便可直接地观察出某区域流速大小。与前文所提到的以静态符号所表示的海流可视化效果相比较，利用本文所设计的方法对NetCDF格式海流数据进行可视化不仅整体效果更加直观，能够以动态粒子形式表达海流，而且便于观察海流实时变化情况，达到了一个较为理想的可视化效果。

4　结　语

本文针对NetCDF格式的珠江口海流数据动态可视化问题，通过改进数据抽稀算法、海流数据矢量合成计算以及数据存储结构设计完成基于粒子的海流可视化数据预处理后，借助所搭建的流场可视化系统，实现了基于粒子的NetCDF海流数据动态可视化。从实验结果可知，通过该方法对于NetCDF格式的海流数据达到了一个较为理想的动态可视化效果，解决了之前以静态、不直观等形式进行海流可视化方法的缺陷，提升了海洋流场仿真的真实感。

参考文献

[1] 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

[2] 付帅,艾波. 一种面向全球表层流场可视化的粒子系统数据结构设计[J]. 海洋信息,2019,34(4):19-22

[3] Kruger J,Kipfer P,Konclratieva P,et al . A Particle System for Interactive Visualization of 3D Flows[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics,2005,11(6):744-756

[4] Chandler J,Obermaier H,Joy K I. Interpolation-based Pathline Tracing in Particle-based Flow Visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics,2015,21(1):68-80

[5] 林淑娟,李维庆,杜,等. 流场动态地图符号视觉变量分析与应用[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(3):44-48

[6] 方京. 基于地图载负量的粒子系统流场制图优化方法研究[D]. 青岛:山东科技大学,2019

[7] 严斌,陈能. GIS数据在专题地图可视化表达中的应用[J]. 地理空间信息,2012,10(1):155-157

[8] 马丹,樊妙,闫循,等. 一种改进的基于TIN的多波束测深数据抽稀算法[J]. 海洋技术学报,2019,38(5):49-54

[9] 蔡振君. 海流场矢量数据抽稀与表达[D]. 北京:首都师范大学,2013