

海洋中尺度涡的大数据智能挖掘及可视分析

田丰林^{1,2}, 龙霜^{1,2}, 王帅³

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237; 3. 帝国理工大学 物理系 空间与大气物理组, 英国 伦敦 SW7 2BW)

中尺度涡是海洋中重要的物理过程, 在海洋物质运输和能量交换过程中举足轻重, 对海洋生物地球化学循环、海洋生态系统和海洋热平衡等方面的研究都具有重要意义。

目前, 中尺度涡的识别方法主要分为欧拉方法和拉格朗日方法。欧拉方法根据瞬时的海表面高度或者海流特征来识别涡旋, 其中基于海面高度 (sea surface height, SSH) /海面高度异常 (sea level anomaly, SLA) 的方法表现出了较好的性能, 它能够避免额外的噪声和多余的涡旋检测。以前基于 SSH/SLA 的方法在区域尺度上运行良好, 但是在全球尺度上速度显著减慢。并且随着数据分辨率的提高和 SSH/SLA 等高线数量的增加, 现有硬件难以满足长时间序列的全球涡旋识别。因此, 基于卫星高度计数据, 本项目提出了一种分块并行的高效涡旋识别与追踪算法, 在不降低涡旋识别准确性的基础上, 与之前此类算法相比, 它的计算速度取得了百倍的提升, 并生成了 28 年 (1993 年-2020 年) 的全球中尺度涡数据集, 为后续中尺度涡的研究奠定了数据基础。基于此中尺度涡数据集, 本项目还通过 K-D 树空间分割算法识别了全球中尺度涡偶极子 (在一段时间内, 异性涡

旋在有限的距离内相伴运动), 并分析了具有伴随时间长、传播速度快、纠缠传播特点的偶极子传输模式和传播特性。此外, 基于中尺度涡识别与追踪算法思想, 本项目还发展了一种用于跟踪中尺度涡分裂和合并事件的 *EddyGraph* 算法, 生成了西北太平洋中尺度涡分裂合并数据集, 用于分析典型的中尺度涡分裂和合并事件。

拉格朗日方法不是基于流场的瞬时状态, 而是基于流体在一段时间内的状态累计结果, 其识别出来的涡旋是连续的且保持独立旋转的水体。首先, 基于地转流速度场数据, 本项目使用拉格朗日方法提取了西太平洋中一个典型的黑洞涡旋, 并结合多源卫星遥感数据和现场观测数据分析验证了该涡旋在水平方向上物质运输的连贯性和在垂直方向的物质相干性, 结果证明在较长的时间尺度上, 黑洞涡旋边界较欧拉涡旋边界能更加客观地描述物质运输。接着, 本项目尝试识别并分析了西太平洋的拉格朗日涡, 通过引入尼诺系数发现了拉格朗日涡对厄尔尼诺的滞后响应, 通过归一化叶绿素数据观察到了拉格朗日涡引起的叶绿素聚集和空穴效应。这些发现证明了拉格朗日涡在物质运输中的重要作用。虽然拉格朗日方法识别的涡旋能够对物质运输进行客观地描述, 但是这一方法也存在一些问题, 其中最为突出的就是计算效率低下, 尤其是在进行大尺度高时空分辨率的提取时需要耗费大量的时间。因此, 本项目也将正交并行思想用于全球拉格朗日涡旋识

别，结果证明采用正交并行方法极大地提高了全球拉格朗日涡旋的识别效率，并帮助建立了全球长时间序列的拉格朗日涡旋数据集。

此外，本项目还提出了一个集成的海洋可视化 i4Ocean 系统，该系统利用基于 GPU 的可视化方法对传统算法进行改进，通过传输函数交互提取海洋数据特征，挖掘和分析具有多维和时变特征的海洋信息。该系统实现了三个目标：高感知度、时空连续及可交互。z 坐标校准和球体渲染技术恢复了最真实的海洋环境，为海洋学家提供了良好的反馈。高效的光线采样技术包括预积分传输函数和自适应采样两种方法，提高了海洋数据的渲染效率和精度。通过引入了传输函数来提取系统中的感兴趣区域，并分析各种海洋现象。通过分析标量场及其特性，采用以数据为中心的方法来指导传输函数的设计，获得了传输函数的最佳参数，以最大限度地提高重要特征的可见性，进而分析典型海洋现象中尺度涡。