

海洋中尺度涡的大数据智能挖掘及可视分析

中尺度涡是海洋中最常见的运动形式，通过对物质与能量的输运促使温度、盐度及营养盐等海洋要素再分布，进而对海洋生物地球化学循环、海洋生态系统和海洋热平衡等产生重要影响。海洋中尺度涡多要素的二维/三维结构可视化可以将海洋中尺度涡旋的运动规律以图形图像等直观的方式加以展现，是研究海洋中尺度涡旋强有力的手段。

在欧拉框架下，从涡旋的基本特征出发，研究人员提出了多种中尺度涡提取方法，其中基于海面高度异常（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。基于分块并行思想，本项目对现有的 SLA 识涡方法进行改进，在不降低涡旋识别准确性的基础上，极大地提升了涡旋识别效率，并构建了 1993 年至 2020 年的全球中尺度涡数据集。受多种物理机制调制与复杂海洋环境的影响，涡旋之间还存在着分裂、合并及偶极子等复杂的动力过程。鉴于此，本项目提出了基于涡旋轨迹数据的全球偶极子涡旋自动识别算法以及基于多层次拓扑关系的涡旋分裂合并跟踪算法(*EddyGraph* 算法)，对全球偶极子涡旋的传输模式和传播特性进行了分析，对全球涡旋分裂合并事件进行了特征统计研究。

拉格朗日方法刻画了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且保持独立旋转的水体。本项目提取了西太平洋的拉格朗日涡旋，分析了其变化规律，并通过归一化观察到了拉格朗日涡旋引起的叶绿素聚集和空穴效应。然而，拉格朗日识涡方法存在计算效率低下的问题，尤其是面对长时间跨度的高时空分辨率数据时需要耗费大量的时间。因此，本项目将正交并行思想用于全球拉格朗日涡旋识别，结果表明正交并行方法极大地提高了识别效率，并建立了全球长时间序列的拉格朗日涡旋数据集。

具有杰出的物质连贯性的拉格朗日涡旋被称为黑洞涡旋。本项目使用拉格朗日方法对单个的典型黑洞涡旋进行了提取，并结合多源卫星遥感数据和现场观测数据证实了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。但黑洞涡旋识别算法复杂度高，计算效率低。因此，本项目提出基于 GPU 加速的高效黑洞涡旋识别算法，改进了原有算法的张量场计算和零测地线计算等步骤，实现了黑洞涡旋的快速提取。

基于客观参考框架和 λ_2 准则，本项目通过提取客观流场计算得到的 λ_2 等值区域的山谷线作为涡旋核心线的思想，实现了对海洋三维结构中尺度涡核心线的提取和可视化。同时，搭载集成的 *i4Ocean* 可视化系统，基于三维的海水温度异常、海水盐度异常、压力异常和密度异常标量数据，本项目从特征点数量、特征颜色映射及表现特征的线型三个方面设计了标准形态传输函数，采用高效球面光线投射算法和体绘制技术，在保证绘制质量的情况下直观有效地呈现出清晰完整的海洋涡旋温度、盐度、压力和密度异常三维结构，实现了大规模海洋涡旋三维结构实时交互展示。利用 GPU 的渲染缓冲区特性改进光线投射流程，允许视点深入海洋数据体内部进行近距离观察，实现了高感知度的数据沉浸式可视化。

基于二维及三维流场矢量数据，本项目利用迹线-迹线全时空连续框架，提高了海洋流场可视化的时空连续性。基于几何的迹线流场可视化动画更加流畅稳定，解决了以往可视化海洋流场的走样问题；将基于区域的涡旋提取技术（*ow* 方法、*Q* 方法和 Ω 方法）应用到海洋流场中，提取的中尺度涡旋更加全面；根据 *ow* 准则、*Q* 准则和 Ω 准则构建标准传输函数，优化了海洋中尺度涡旋提取效果，降低了用户交互传输函数分析海洋中尺度涡旋的难度，提高了用户交互分析海洋中尺度涡旋的效率。

基于高分辨率海洋异常数据，本项目采用面向海洋涡旋应用的可视化建模方法，能够快速构建中尺度涡旋的三维几何边界模型，提取出完整的海洋涡旋的三

维结构；运用涡旋三维几何边界实时时面可视化方法，在海洋不稳定场中构建了基于三角面片的时空连续框架，实现了涡旋三维时面可视化效果，揭示了涡旋三维结构在连续时空中的运动特性和变化规律，并对多种异常数据构建的涡旋时面进行可视分析；通过海洋涡旋时面可视化的动态迭代细分反走样策略，解决了海洋涡旋时面在不稳定场中随流场运动导致的走样问题，优化了中尺度涡旋时面可视化效果。