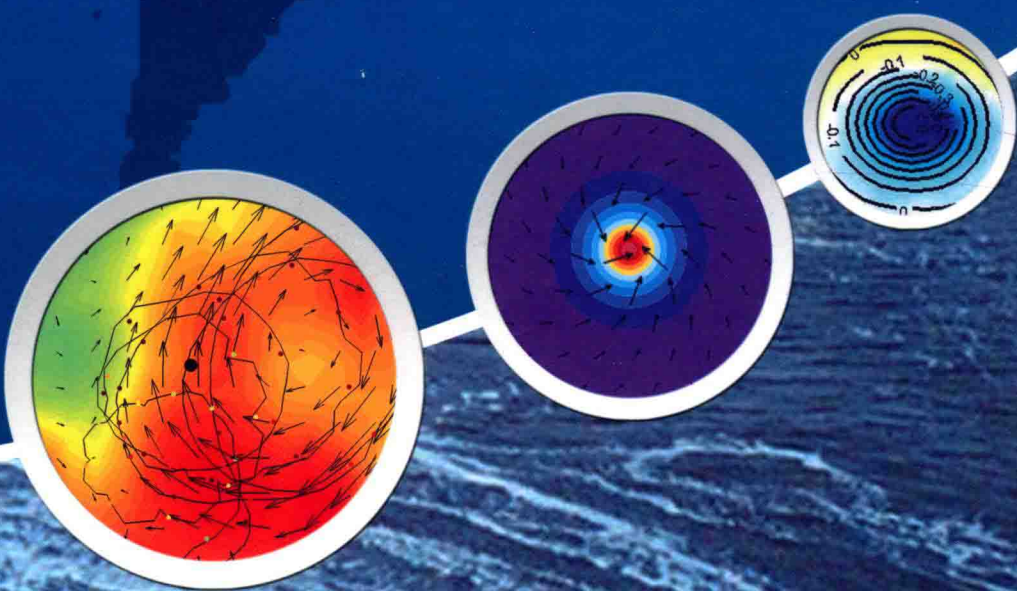


# 海洋涡旋探测与分析

Oceanic Eddy Detection and Analysis

董昌明 编著



科学出版社

# 海洋涡旋探测与分析

董昌明 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

当人们认识到我们这个星球的海洋中充满中尺度涡旋,一个迫切要求就是探测并分析这些涡旋,海洋学家为此做了很大努力,而且取得了显著成果。本书回顾中尺度海洋涡旋的多种探测方法,重点介绍基于流场矢量几何特征的涡旋探测方法,包括从欧拉型观测和数值模拟资料及拉格朗日型数据中探测涡旋。还介绍从合成孔径雷达图片和水色卫星图片中寻找涡旋的方法,探测三维涡旋的方法,基于涡旋数据库的涡旋分析和应用,大气对海洋涡旋的响应,海洋涡旋研究的一些前沿问题。

本书可供物理海洋学、海洋生物化学、地球流体力学、区域海洋动力学、海洋数值模拟、海洋卫星遥感动力学、海气相互作用以及气候变化等相关领域科研人员及相关专业研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

海洋涡旋探测与分析/董昌明编著. —北京:科学出版社,2015.11

ISBN 978-7-03-046078-3

I. ①海… II. ①董… III. ①涡旋(气象)—海洋气象—气象观测  
IV. ①P714

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第251884号

责任编辑:胡 凯 王腾飞/责任校对:钟 洋  
责任印制:张 倩/封面设计:许 瑞 刘小薇

**科学出版社出版**

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年12月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年12月第一次印刷 印张:21 1/2

字数:430 000

**定价:198.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

当人们认识到我们这个星球的海洋中充满了中尺度涡旋，一个迫切的要求就是找到这些涡旋，然后认识涡旋的物理共性、区域差异性以及这些涡旋对于海洋环境的影响。在过去十几年，海洋学家在涡旋探测和分析上做了很大的努力，而且取得了显著的成果。

本书回顾了中尺度海洋涡旋的多种探测方法，重点介绍了本书主编及合作者开发的涡旋自动探测方法，包括从欧拉型观测与数值模拟资料（即速度场、海面高度异常场、海表温度等）和拉格朗日型（即浮标的拉格朗日轨迹）数据中自动探测表面二维涡旋和从三维数值模拟的流场中自动探测三维涡旋。本书还介绍了从合成孔径雷达图片和水色卫星图片中寻找涡旋及基于涡旋数据库的涡旋分析和应用，包括涡旋对大气的影晌、涡旋对全球能量、热量、淡水和质量运输的作用等。

本书第1章为绪论。第2章详细介绍了欧拉型数据的二维涡旋的自动探测与分析，首先利用高分辨率的数值模拟数据详细介绍了基于涡旋流场矢量几何特征的涡旋自动探测算法和追踪算法，并对算法进行客观评估，证实其有效性和准确性。接着介绍该方法在卫星高度计数据和海表温度数据中的应用。第3章详细介绍基于拉格朗日型涡旋的自动探测与分析。第4章将二维欧拉型涡旋探测方法推广至三维涡旋的探测，并详细探讨了南加州湾三维涡旋的主要特征，发现大部分涡旋都不能穿透表层，多数停留在350~400 m，并将能够穿透400 m的三维涡旋分为碗状、腰鼓状和圆台状三类；此外，简要介绍了Williams等（2011）的全球三维涡旋探测的方法以及用该方法得到的全球范围内中尺度涡旋的三维统计特征。第5章介绍利用合成孔径雷达和水色卫星资料探测海洋涡旋的方法。SAR可以穿透云雾直接观测海气作用面，通过海表面粗糙度来反映海洋的水文动力过程，具有很高的分辨率，因此它在海洋涡旋监测方面有一定优势；水色数据的空间分辨率也较高，可通过分析中尺度涡旋及其引起的次中尺度过程对水色空间分布的影响来分析中尺度涡的动力过程。

本书第6章利用自动探测得到的涡旋数据集，分析了包括黑潮延伸体、东中国海涡旋、西北太平洋副热带逆流区涡旋、南海涡旋、西北印度洋涡旋和岛屿尾涡6个地区的涡旋特征，包括涡旋大小、生命期、数量分布、涡度、移速、轨迹和演化过程等。需特别指出的是，基于南海海区涡旋研究的广泛性，6.4节详细介绍了各种涡旋探测方法在该海区的应用。6.5节总结了西北印度洋区域大涡旋



的统计、动力特征和生态与气候效应等。6.6节详细介绍了岛屿尾涡的深水模型试验,分析了涡流的生成、尾迹不稳定性、产生连续的涡旋等物理过程,并通过一系列敏感性试验研究了岛屿尾流对涡旋黏度、层结、旋转速率和网格分辨率等参数的敏感性。

为了使涡旋探测过程更直观,并便于涡旋探测技术的共享,我们利用 MATLAB 平台开发研制了一套涡旋探测的可视化系统,本书第7章从平台构建、技术框架、输入输出等方面介绍了该系统,通过简洁的界面操作,可以方便地针对多种数据源提取涡旋信息,同时实现涡旋参数的计算、统计、查询及分析等功能,有利于涡旋探测算法的推广。

本书第8章研究了黑潮延伸区海洋涡旋对大气的影晌,发现冷涡能够减小海表风速,减弱潜热、感热通量,减小边界层高度,引起云中液态水含量、水汽含量和降水率的减小,暖涡反之。此外,海表风散度异常与下风方向 SST 梯度线性相关,涡度与横风方向 SST 梯度之间也有着较好的对应关系,表明动量垂直混合机制在海洋涡旋影响大气的过程中起着重要作用。基于两个典型中尺度涡旋个例的分析发现,中尺度海洋涡旋能够对大气瞬变扰动强度产生影响,大尺度环流的平流作用和斜压能量转换在其中起了重要作用。8.4节利用 WRF 模式设计了理想的暖涡试验,初步研究了大气对暖涡的响应特征。区域海气耦合模式的相关研究也在进行中,中尺度海洋涡旋与大气的相互作用将是未来海洋、气象科学研究中的重要课题。

海洋涡旋的研究是当今海洋科学的前沿性课题,面临着诸多挑战。本书第9章介绍了涡旋研究的几个前沿性科学问题,包括涡致输运、涡致混合、次中尺度涡旋和中尺度涡旋与内波的相互作用等,以期对涡旋的后续研究起到一定的导向作用。涡致输运主要探讨了中尺度涡旋的保守性裹挟水团引起的水团物质、热量、淡水和沉积物输运。涡致混合主要研究由小尺度湍流引起的跨等密度面混合和由中尺度涡搅拌引起的沿等密度面混合。9.3节详细介绍了次中尺度涡旋的主要形态和产生机制。9.4节简要总结了中尺度涡旋与内波的相互作用。

综上所述,全书涉及了涡旋的探测算法、涡旋数据集的分析、涡旋对大气的影晌、涡旋的可视化、涡旋对大气的影晌涡旋研究的前沿问题等方面,既总结了先前的工作,也对未来研究进行了展望。

本书的撰写是由南京信息工程大学“海洋数值模拟与观测实验室”的“海洋涡旋科研组”完成的。在撰写本书时(2015年春),涡旋组由如下科研人员组成:董昌明、刘宇、林夏艳(海洋二所)、马静、储小青(南海所)、徐广珺、季巾淋、夏琼、秦丹迪、单海霞、蒋星亮、李俊德(海洋二所)、孙文金(河海大学)、孙轶、廖光洪(海洋二所)和张军辉。这支涡旋研究小组主要由年轻的海洋学子组成,他们对海洋科学,特别是海洋涡旋,充满了极高的研究热情,这极

大地激励了编著者将其最近几年的涡旋研究工作总结出来。

除了董昌明教授，参加本书撰写的有：刘宇（第2章、第3章和6.3节）、储小青（6.4节和第7章）、马静（第8章）、林夏艳（第4章和9.1节）、季巾淋（第1章，6.1节）、徐广珺（第5章）、孙文金（9.2节）、夏琼（9.3节）、秦丹迪（6.2节）、李俊德（6.5节）、蒋星亮（6.6节）、廖光洪（9.4节）、孙轶（9.3节）、张军辉（9.1节）。另外，南京信息工程大学徐海明教授、国家海洋局海洋二所杨劲松研究员、南京信息工程大学张彪教授、河海大学王如云教授、国家海洋卫星中心邹斌研究员、国家海洋局海洋二所梁楚进研究员、中国科学院南海研究所管玉平研究员、南京信息工程大学何宜军教授和中国海洋大学田纪伟教授在本书撰写过程中给予了支持和帮助。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目（项目编号：41476022，41490643、91128204）、国家973项目（项目编号：2014CB745000）、国家863项目（项目编号：2013AA09A505）、国家自然科学基金创新研究群体项目（项目编号：41321004）、南京信息工程大学引进高层次人才启动资金（2013r121，2014r072）、江苏省创新创业团队项目、国家海洋局国际合作全球变化与海气相互作用项目（项目编号：GASI-02-IPOVAI-05）、江苏高校优势学科建设工程资助项目（PAPD）、渔业科技支撑项目（2013BAD13B01）等的支持。

海洋涡旋的研究方兴未艾，作为国际和国内第一部专门讨论海洋涡旋的学术专著，本书一定存在这样或那样的缺憾，敬请读者批评指正。我们衷心希望本书能够对海洋学，特别是海洋涡旋的研究起到抛砖引玉的作用。

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 什么是海洋涡旋	1
1.2 国内外海洋涡旋研究现状	2
1.3 海洋涡旋自动探测的必要性	3
1.4 海洋涡旋自动探测方法综述	4
第 2 章 欧拉型涡旋自动探测与分析	6
2.1 基于流场几何特征的涡旋自动探测方法	6
2.1.1 引言	6
2.1.2 探测算法	6
2.1.3 探测算法的评估	13
2.1.4 追踪算法	17
2.2 基于卫星高度计资料的涡旋自动探测	19
2.2.1 高度计资料	19
2.2.2 高度计涡旋探测	20
2.3 基于海表温度资料的涡旋自动探测	22
2.3.1 海表温度数据	22
2.3.2 涡旋识别方法	23
第 3 章 拉格朗日型涡旋自动探测与分析	26
3.1 海表漂流浮标	27
3.2 涡旋识别方法	28
3.3 探测结果	31
3.4 总结与讨论	32
第 4 章 三维涡旋自动探测与分析	36
4.1 三维涡旋探测技术介绍	37
4.2 南加州湾三维涡旋	38
4.2.1 涡旋的数量和寿命	41
4.2.2 涡旋的半径和涡度	42
4.2.3 涡旋的演化和运动	47
4.2.4 涡旋的垂向结构	50

4.2.5	涡旋的产生和消亡 .....	52
4.2.6	涡旋的动力平衡机制 .....	55
4.3	全球三维涡旋探测及统计特征 .....	56
4.3.1	Okubo-Weiss 参数方法 .....	56
4.3.2	全球涡旋数量和深度分布 .....	58
4.3.3	小结 .....	60
<b>第 5 章</b>	<b>利用合成孔径雷达和水色卫星资料探测海洋涡旋 .....</b>	<b>61</b>
5.1	合成孔径雷达卫星探测涡旋 .....	61
5.1.1	SAR 海洋遥感基本原理 .....	61
5.1.2	SAR 图像探测涡旋的机制 .....	65
5.1.3	SAR 图像中的涡旋 .....	66
5.1.4	SAR 图像探测吕宋海峡及邻近海域的涡旋 .....	69
5.2	水色卫星探测涡旋 .....	76
5.2.1	叶绿素 a 浓度反演 .....	76
5.2.2	水色卫星数据 .....	77
5.2.3	水色卫星图像中的涡旋 .....	80
5.2.4	涡旋对近表面叶绿素 a 浓度的影响机制 .....	83
5.3	SAR 和水色卫星联合探测涡旋 .....	85
5.3.1	海洋涡旋实例研究一 .....	86
5.3.2	海洋涡旋实例研究二 .....	89
5.3.3	海洋涡旋个例研究三 .....	92
5.3.4	海洋涡旋个例研究四 .....	93
<b>第 6 章</b>	<b>几个区域的涡旋问题 .....</b>	<b>95</b>
6.1	黑潮延伸体 .....	95
6.1.1	漂流浮标轨迹 .....	96
6.1.2	海表面温度 (SST) .....	100
6.1.3	海表面高度异常 (SSHA) .....	102
6.1.4	小结 .....	105
6.2	中国东部沿海涡旋 .....	105
6.2.1	引言 .....	105
6.2.2	涡旋的数目、大小和生命期 .....	108
6.2.3	涡旋的相对涡度 .....	112
6.2.4	涡旋的生成与消亡 .....	113
6.2.5	涡旋的运动 .....	115
6.2.6	涡旋的生成机制 .....	117



6.3 西北太平洋副热带逆流区涡旋 .....	118
6.3.1 涡旋的数量、大小和寿命 .....	121
6.3.2 涡旋的涡度 .....	121
6.3.3 涡旋的产生和消亡 .....	124
6.3.4 涡旋的演变 .....	125
6.3.5 涡旋的移动 .....	126
6.3.6 涡旋与黑潮的相互作用 .....	127
6.3.7 涡旋对温跃层和盐跃层的影响 .....	130
6.3.8 涡旋的产生机制 .....	130
6.3.9 小结 .....	132
6.4 南海涡旋 .....	133
6.4.1 南海中尺度涡旋研究概述 .....	134
6.4.2 南海中尺度涡旋的探测与跟踪技术 .....	135
6.4.3 南海中尺度涡旋的基本特征 .....	141
6.4.4 南海涡旋的观测个例 .....	155
6.4.5 小结 .....	175
6.5 西北印度洋涡旋 .....	175
6.5.1 西北印度洋背景环流 .....	175
6.5.2 西北印度洋大涡旋 .....	175
6.5.3 索科特拉涡旋 .....	183
6.6 岛屿尾涡 .....	183
6.6.1 岛屿尾涡简介 .....	183
6.6.2 深水模型设置 .....	186
6.6.3 深水控制实验 .....	187
6.6.4 深水岛屿尾流参数的敏感性 .....	197
6.6.5 讨论与展望 .....	205
<b>第7章 涡旋探测的可视化技术</b> .....	<b>207</b>
7.1 引言 .....	207
7.2 功能简介 .....	207
7.3 平台构建 .....	207
7.4 技术框架 .....	207
7.5 输入输出 .....	209
7.5.1 输入 .....	209
7.5.2 输出 .....	210
7.6 可视化软件简介 .....	210

7.6.1	运行环境 .....	210
7.6.2	软件界面 .....	211
7.6.3	数据源 .....	211
7.6.4	日期选择 .....	212
7.6.5	统计信息查询 .....	214
7.6.6	执行按钮 .....	217
7.6.7	操作说明 .....	218
<b>第 8 章</b>	<b>大气对海洋涡旋的响应 .....</b>	<b>220</b>
8.1	资料介绍 .....	222
8.1.1	TMI 数据 .....	222
8.1.2	QuikSCAT 卫星及其数据产品 .....	222
8.1.3	AMSR-E 和 AMSR-2 数据 .....	223
8.1.4	J-OFURO 海表热通量资料 .....	224
8.1.5	CFSR 数据 .....	224
8.2	大气对黑潮延伸区海洋涡旋的响应特征 .....	224
8.2.1	分析方法 .....	225
8.2.2	中尺度暖、冷涡旋对海洋大气边界层的影响 .....	226
8.2.3	中尺度暖、冷涡旋对大气瞬变扰动的影响及可能机制 .....	234
8.2.4	小结 .....	239
8.3	大气对黑潮延伸区海洋涡旋的响应特征——大样本合成分析 .....	239
8.3.1	分析方法 .....	240
8.3.2	大气响应特征——观测结果 .....	241
8.3.3	大气响应特征 .....	245
8.3.4	小结 .....	251
8.4	大气对理想涡旋响应的模拟 .....	251
8.4.1	模式简介 .....	251
8.4.2	模式构建与结果分析 .....	253
<b>第 9 章</b>	<b>海洋涡旋研究的前沿性问题 .....</b>	<b>255</b>
9.1	涡致输运 .....	255
9.1.1	涡致热量、盐度输运 .....	255
9.1.2	涡致能量输运 .....	262
9.1.3	涡致水体输运 .....	263
9.1.4	涡致沉积物输运 .....	266
9.2	涡致混合 .....	268
9.2.1	引言 .....	268

---

9.2.2 沿等密度面混合 .....	268
9.2.3 跨等密度面混合 .....	270
9.3 次级中尺度过程的研究现状与前景 .....	273
9.3.1 次级中尺度现象 .....	275
9.3.2 次级中尺度过程的产生机制 .....	277
9.4 中尺度涡与内波 .....	283
参考文献 .....	286
后记 .....	327

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 什么是海洋涡旋

当山中的小溪流过一块突起的岩石，在这岩石的下游会产生旋转的水环，这些水环会随着小溪欢快有续地流向远方。在经典流体力学中，这种现象被称为卡门涡街 (kármán vortex street)，这些旋转的水环被称为涡旋。经典流体力学通常是指研究非旋转坐标系下的密度均匀的流体运动。海水运动已经超出经典流体力学的范畴，首先，海水的运动是在地球自转的旋转坐标系中，其次，海洋是一个层化的流体，海水运动的研究属于地球流体力学或者行星流体力学。海上现场观测和卫星遥感图像都显示，在海洋这个旋转层化的流体中，存在着大量涡旋。图 1.1.1 显示的是海面高度计观测的西北印度洋 2012 年 7 月 20 日的海面起伏状况，可以看出，此时海洋表面有多个中尺度涡旋。

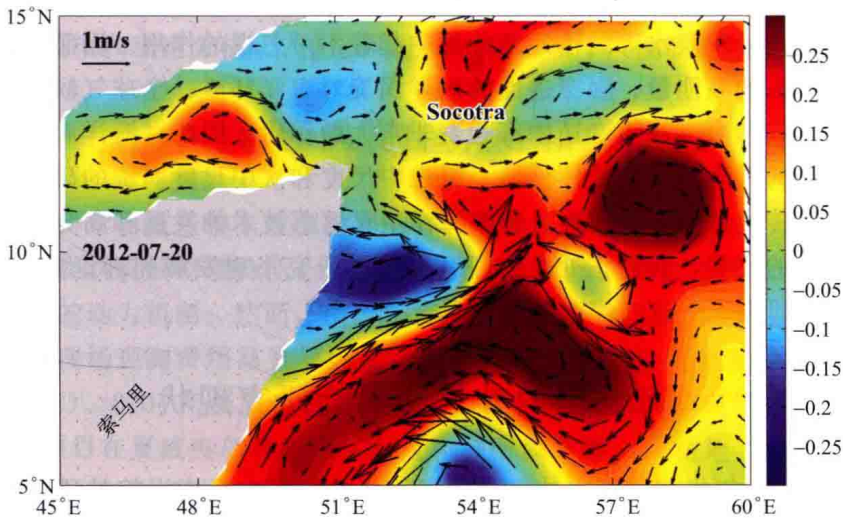


图 1.1.1 2012 年 7 月 20 日卫星高度计海面起伏的异常场快照

注：颜色是海面起伏异常，矢量是由海面起伏异常推导的地转速度场，

资料来源于 <http://www.avis.com/>

在相当长的时间里，海洋涡旋的研究并未得到重视。通常认为海洋环流由缓慢的大洋内部流动和较快的西边界流组成。然而，这只是时间平均下的场景。任何一张海洋表面高分辨率快照图像，比如卫星高度计海面高度、海面温度遥感图



片分辨率的数值模拟结果,无不显示海洋充满了几公里到上百公里的涡旋。其中半径为 10~100 km 量级(即第一斜压罗斯贝半径的量级)的涡旋被称为中尺度涡旋;而半径小于第一斜压罗斯贝半径且大于边界层湍流尺度的涡旋被称为次中尺度涡旋,半径 0.1~10 km 量级。中尺度涡旋的寿命,即从产生到衰亡的时间,通常长达几个星期到几个月,甚至几年的时间。在其生命期中,涡旋会移动几十公里到几百公里的距离。基于其旋转的特征,涡旋又分为气旋涡和反气旋涡。北(南)半球,在气旋涡中,海水呈逆(顺)时针旋转;在反气旋涡中,海水呈顺(逆)时针旋转。无论在南、北半球,由于地球自转诱导的科里奥利力,气旋涡(反气旋涡)伴随着局地的辐聚(辐散),从而导致上升流(下沉流)。一般情况下,局地的上升流(下沉流)会使得涡旋表面的海水温度低(高)于周围的海水温度,因此,气旋涡(反气旋涡)又称为冷(暖)涡。最近有研究发现,气旋涡中也有可能包裹暖水,而反气旋涡包含冷水,我们称之为异常涡旋。

海洋涡旋携带极大的动能,其海水运动速度比洋流平均流速快几倍甚至一个量级。涡旋的垂向深度会影响到几十米到几百米,甚至上千米,从而将海洋深层的冷水和营养盐带到表面,或将海表暖水压到较深的海洋中,从而影响海洋上混合层、密度跃层甚至更深的海洋。涡旋的高旋转速度和伴随着的强剪切,使其具有很强的非线性,从而具有保持自身特征的记忆性和保守性,使其在全球海洋物质、能量、热量和淡水等的输运和分配中起着不可忽视的作用。因而,这些在海洋中无处不在的高能量、强穿透性的海洋涡旋对海洋环流、全球气候变化、海洋生物化学过程和海洋环境变迁中都起着非常大的作用。因此,海洋涡旋的研究具有重要的科学意义和应用价值。海洋中尺度和次中尺度涡旋的研究改变着人们对海洋的传统认识。随着高分辨率海洋卫星遥感技术的发展和高分辨率海洋数值模拟结果的完善,我们正处在物理海洋科学研究飞速发展和理论突破的时代,而海洋涡旋研究正是这一突破的排头兵。

## 1.2 国内外海洋涡旋研究现状

20 世纪 70 年代初,国内外海洋学家就开始海洋中尺度涡旋的研究工作,包括观测、数值模拟和理论分析,比如早期的 Holland (1978)、McWilliams 和 Flierl (1979)、胡敦欣等 (1980)。近年来有关全球海洋涡旋的研究更是如火如荼地进行着,如程旭华和齐义泉 (2009), Adams 等 (2011), Chelton 等 (2007, 2011a, 2011b), Gruber 等 (2011), Petersen 等 (2013), Frenger 等 (2013), 徐弛等 (2013), Zhang 等 (2014), Dong 等 (2014)。个别涡旋的观测和分析也引起了海洋学家的研究兴趣,比如 Wang 等 (2006), Benitez-Nelson 等 (2007), 乔方利等 (2008), Nencioli 等 (2008), Dong 等 (2009), Hu 等

(2011), Zhang (2013), 林夏艳等 (2013), Liu 等 (2013), Chu 等 (2014)。中国海洋界在涡旋研究中取得的成就有: ①20 世纪 90 年代, 在中日黑潮联合调查项目中, 中国海洋学家开展了许多很有意义的黑潮流经海区海洋涡旋的研究工作, 采集了很多很有价值的涡旋观测资料, 比如郑义芳等 (1992), 郭炳火等 (1995), 更多的东海涡旋研究工作可参见袁耀初和管秉贤 (2007) 的综述文章; ②21 世纪初起, 在大量的南海海洋观测计划推动下, 南海海洋涡旋的研究在中国海洋学界得到了相当的重视, 涌现出大量优秀的科技论文, 涉及涡旋的统计分析 (Wang, et al., 2003; 林鹏飞等, 2007; 刘金芳等, 2006; 兰健等, 2006; Xiu, et al., 2010; Yuan, et al., 2007; 高理等, 2007; Chen, et al., 2011); 涡流相互作用 (Chen, et al., 2011; Li, et al., 1998; Li and Pohlmann, 2002; Wang, et al., 2008; Wang, et al., 2010; 林宏阳等, 2012; 潘丰等, 2012); 涡旋产生机制 (Yang and Liu, 2003; Gan, et al., 2008; Wang, et al., 2008); 涡旋热盐输运 (Wang, et al., 2012; Chen, et al., 2012) 以及其他方面 (Yang, et al., 2013; Chen, et al., 2013)。其中王桂华等 (2005)、管秉贤和袁耀初 (2006) 综述了当时南海涡旋的研究工作。其他海区的涡旋研究也得到很大的发展, 比如李威等 (2011), Liu 等 (2012), Yang 等 (2013), Zhang 等 (2013), 张笑等 (2013)。通过过去几十年的中尺度涡旋观测 (现场和卫星遥感)、数值模拟和理论分析, 人们获得了对中国海域中尺度涡旋的基本认识。

### 1.3 海洋涡旋自动探测的必要性

与其他科学研究依赖于观测数据一样, 海洋涡旋的研究强烈依赖于实际观测提供真实海洋涡旋的物理特征, 以及涡旋产生、发展、消亡过程和水动力条件, 以揭示涡旋的动力机制。然而, 由于涡旋产生地点和时间上的不确定性、尺度较小以及海洋现场观测费用昂贵等因素, 现场涡旋观测至今仍非常稀少 (Dickey, et al., 2008)。2004 年美国自然科学基金资助一项大型涡旋现场探测计划 (E-Flux), 该项目在夏威夷岛屿西侧 (海流和海面风下游) 成功地“捕获”了一个涡旋, 并且对该涡旋进行了物理、化学和生物等多方面的数据采集 (Benitez-Nelson, et al., 2008)。

高分辨率海洋卫星遥感资料的出现和计算机技术的飞速发展, 为海洋中尺度涡旋的研究提供大量的观测资料和数值产品。目前具有全球覆盖率可用于海洋中尺度涡旋研究的观测资料有: ①卫星高度计 (altimetry) 的海面高度异常场 (sea surface height anomaly, SSHA) 网格化资料, 从 1992 年至今, 已经有 23 年全球覆盖的资料; ②海表温度资料 (sea surface temperature, SST) 从 20 世纪 80 年代初至今, 已有接近 35 年的全球覆盖资料; ③水色卫星遥感资料; ④星



载合成孔径雷达数据 (Synthetic Aperture Radar, SAR); ⑤全球海洋浮标资料 (Global Drifter Program, GDP)。用于全球涡旋研究分辨率的数值产品有 Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)、Estimating the Circulation & Climate of the Ocean (ECCO) 等。

通过人工手段中从上述庞大的数据集中逐个寻找涡旋已经是不可能的任务。而且, 人工涡旋探测易受研究人员主观判断差异的影响, 不确定性大, 易出现不可统计的误差。因而, 利用计算机进行海洋涡旋的自动探测是十分必要的。

## 1.4 海洋涡旋自动探测方法综述

1.1 节中, 根据涡旋大小, 涡旋可以分为中尺度和次中尺度涡旋。目前卫星高度计资料的分辨率不能有效地探测尺度较小的次中尺度涡旋。本书重点讨论海洋中尺度涡旋的探测和分析。

Dong 等 (2011) 根据数据的不同类别将涡旋探测方法分为两类: 欧拉 (Eulerian) 方法和拉格朗日 (Lagrangian) 方法。欧拉数据是指一个时刻的快照数据或者空间场的数据, 拉格朗日数据是指水团或者物质颗粒的轨迹数据。1.3 节中提到的 SSHA、SST、水色、SAR 等属于欧拉数据, 而 GDP 数据属于拉格朗日数据。由于覆盖率和技术原因, 至今没有基于水色和 SAR 资料的涡旋自动探测方法。本书将在第 5 章详细介绍 SAR 资料探测涡旋的原理、结果和优缺点。

Nencioli 等 (2010) 将欧拉方法划分为以下三类: ①基于物理参数的方法; ②基于流场几何特征的方法; ③物理参数和几何特征混合法, 同时涉及物理参数和流场的几何特征。

其中, Okubo-Weiss (OW) 参数法 (Okubo, 1970; Weiss, 1991) 在中尺度自动涡旋探测方法中应用最为广泛 ( $W = S_n^2 + S_s^2 - \omega^2$ , 其中  $S_n$ 、 $S_s$  及  $\omega$  分别表示的是剪切形变率、拉伸形变率以及相对涡度)。OW 方法已经得到了非常广泛的应用, 如地中海海域 (Isern-Fontanet, et al., 2003), 秘鲁海域 (Penven, et al., 2005), 阿拉斯加海域 (Henson and Thomas, 2008) 以及全球涡旋的探测 (Chelton, et al., 2007) 等。尽管 OW 方法应用很广, 但它自身仍然存在 3 个缺陷: 第一,  $W$  最优阈值选取很难确定 (Chelton, et al., 2011), Williams 等 (2011) 和 Peterson 等 (2013) 发展了一个新的  $R^2$  算法, 其目的在于消除通过阈值选择的依赖性, 这种判断方法是基于涡旋与给定的理想高斯涡旋类比得到的; 第二, 物理参数的推导过程会带来一些噪声项, 它会增加涡旋的错误检测率 (Sadarjoen and Post, 2000; Chaigneau, et al., 2008; Chelton, et al., 2011; Nencioli, et al., 2010); 第三, 物理标准会导致涡旋探测失败或者低估涡旋尺寸的大小 (Basdevant and Philipovitch, 1994; Doglioli, et al.,

2007; Henson and Thomas, 2008; Isern-Fontanet, et al., 2003)。

基于流场几何特征的方法, Sadarjoen 和 Post 在 2000 年首次提出缠绕角法 (Winding-Angle, WA), 它是通过闭合曲线识别涡旋 (Sadarjoen and Post, 2000)。Francesco Nencioli 在加州大学攻读博士期间, 考虑到涡旋显著的几何特征, 并且在本书主编的指导下发展了一种新的纯粹基于涡旋流场矢量几何特征探测涡旋的方法 (Vector Geometry, VG)。本书的第 2 章将详细介绍该方法。

物理参数和几何特征混合法是将特殊的物理参数方法和几何方法混合形成, 比如 Chaigneau 等 (2008)、Chelton 等 (2010) 和 Faghmous 等 (2015) 利用 SSHa 局部极值作为潜在涡旋中心, 结合围绕潜在涡旋的封闭流场的几何特征探测涡旋。本书的 6.4, 结合南海涡旋的分析, 对上述方法做了更加详细的讨论。

Dong 等 (2011) 将基于海表浮标轨迹数据探测涡旋的拉格朗日方法分为四类: ①旋转方法 (VG) (Veneziani, et al., 2005; Griffa, et al., 2008); ②拉格朗日随机模型法 (Lankhorst, et al., 2006; Beronvera, 2008); ③利用小波变换脊分析粒子位置的椭圆重构法 (Lilly and Gascard, 2006); ④根据轨迹的几何特征的螺旋轨迹搜索法 (Dong, et al., 2011)。本书将在第 3 章, 详细讨论这些方法。

基于数值模拟产品, Dong 等 (2012)、Petersen 等 (2013) 和 Lin 等 (2015) 将二维的涡旋探测方法推广到三维涡旋的识别上, 得到大样本的三维涡旋数据库。本书第 4 章将对三维涡旋的大样本做详细讨论。

利用涡旋自动探测方法, 可以得到涡旋数据库。涡旋数据库应该包括涡旋的位置、时间、大小、极性 (气旋型或反气旋型)、强度、边界等涡旋特征。应用涡旋数据库进行涡旋相关研究, 是海洋涡旋研究的重要且极具挑战的研究方向。本书第 6 章利用涡旋数据库讨论几个区域涡旋的特征; 第 7 章介绍一套基于第 2、3 章的方法开发的涡旋自动探测软件系统; 第 8 章讨论涡旋对大气的影晌; 第 9 章讨论涡致输运 (热量、淡水、质量和能量)、涡致混合、次中尺度涡旋, 以及涡旋和内波相互作用等前沿性研究问题。



## 第 2 章 欧拉型涡旋自动探测与分析

### 2.1 基于流场几何特征的涡旋自动探测方法

#### 2.1.1 引言

研究涡旋活动的最基本问题是恰当定义涡旋并实现对中尺度、次中尺度涡旋的自动识别和追踪。本节介绍一种自动探测和追踪海洋涡旋的方法。此方法基于流场的几何特征来定义涡旋。该算法是由对南加州湾 (Southern California Bight, SCB) 中尺度和次中尺度涡旋活动的探测算法发展而来, 所使用的数据是区域海洋数值模式 (Regional Ocean Modeling System, ROMS) 的高分辨率数值模拟产品, 分辨率 1 km。由于有群岛的存在, SCB 区域内有活跃的涡旋活动, 因此该海域很适合用来研究和测试涡旋探测方法。

本算法尤其适用于对高分辨率的数值模式结果进行涡旋活动分析。高分辨率数值模拟实验中的速度场比卫星高度计和低分辨率数值模拟的速度场更为“复杂”, 这是因为高分辨率模式能够再现次中尺度涡旋等小尺度过程。在 SCB 区域, 群岛的存在对相对涡度场有很大的影响。接近群岛和岛屿尾流的区域受到侧应力和流剪切的影响, 相对涡度增加 (Dong and McWilliams, 2007)。初步结果显示, 在很强的锋面区域及岛屿尾流剪切区域, Okubo-Weiss 算法中的参数  $W$  值 (见 6.4.2 节) 一般接近或低于涡旋的特征值 (涡旋的  $W$  为负值), 很难通过选择阈值来区分出涡旋。此外, 本节使用的速度场不是直接由 SSHa 场直接推算得出, 因此, 本节算法所提取的涡旋并不是都可以用 SSHa 的极值来表征。综合这些原因, 本节介绍的涡旋识别算法完全不依赖于速度导数相关的物理参数或 SSHa 场。

本节对这一探测和追踪算法进行详细介绍, 并对探测的算法进行评估。成功探测涡旋之后, 可以计算一些物理参数, 并做相应的空间和时间统计分析。该算法可以对任意速度场中的中尺度和次中尺度涡旋进行自动探测, 是分析近岸区域涡旋活动一个重要工具, 本节中的探测算法 (Matlab 的开源程序代码包) 可以提供给有需求的读者。

#### 2.1.2 探测算法

涡旋直观上可定义为速度矢量绕着一个中心点顺时针或逆时针旋转区域。这个定义与 Okubo-Weiss 及涡旋自动探测方法的假定是一致的 (McWilliams,