

分类号：
UDC：

学校代码：10423
学 号：

北大西洋亚极地区域多尺度海洋过程 能量交换

Energy Exchange among Multi-scale Processes in the Subpolar North Atlantic

作 者：某某某

指 导 教 师：某某某 教授

学 位 类 型：学术学位

专 业 名 称：某某某

研 究 方 向：某某某

授予学位单位：中国海洋大学

日期： 2025 年 03 月

学位论文答辩委员会

[illegible]

学位论文独创声明

本人所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得_____（注：如没有其他需要特别声明的，本栏可空）或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解国家有关保留、使用学位论文的法律、法规和学校有关规定，并同意以下事项：

- 1、学校有权保留并向国家有关部门或机构送交本学位论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅；
 - 2、学校可以将本学位论文的全部或部分内容编入学校学位论文数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本学位论文；
 - 3、学校可以基于教学及科研需要合理使用本学位论文。
- 需保密的学位论文在解密后适用本授权书。

学位论文作者签名：

导师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

摘 要

海洋中尺度涡旋是海洋中动能串级的重要枢纽, 占据海洋 70% 以上的海洋动能。关于中尺度涡旋动能来源与耗散问题, 是影响海洋动力学平衡的重要问题。目前研究认为, 中尺度涡旋能够与亚中尺度过程和海洋近惯性内波相互作用, 是解决中尺度涡旋动能来源与耗散的潜在渠道。目前对于三者之间相互作用研究多集中于中纬度地区和南大洋, 尚缺乏对北大西洋亚极地海区的系统研究。

北大西洋亚极地区域由于强烈的混合层深度变化和风暴, 存在丰富的中尺度、亚中尺度过程和近惯性内波, 这些过程之间有着复杂的相互作用关系, 能够调节上层海洋混合、再层化以及深层对流等过程。因此, 对北大西洋中尺度涡旋、亚中尺度过程以及海洋内波之间能量交换过程的研究是十分必要的, 有助于提高……

关键词: 北大西洋亚极地区域; 中尺度; 亚中尺度……

ABSTRACT

Mesoscale eddies in the ocean are an important hub of energy cascade, accounting for over 70% of the oceanic kinetic energy. The issue of the energy source and dissipation of mesoscale eddies is a significant problem that affects the balance of ocean dynamics. Current studies suggest that mesoscale eddies can interact with submesoscale processes and near-inertial internal waves, providing a potential channel to address the energy source and dissipation of mesoscale eddies. However, research on the interactions among the three is mostly concentrated in mid-latitudes and the Southern Ocean, and there is a lack of systematic study on the subpolar North Atlantic region.

The subpolar North Atlantic region, with its strong variations in the depth of the mixed layer and storms, has rich mesoscale and submesoscale processes and near-inertial internal waves. These processes have complex interactions that can regulate upper ocean mixing, restratification, and deep convection. Therefore, it is essential to study the energy exchange processes among mesoscale eddies, submesoscale processes, and internal waves in the North Atlantic region to improve.

...

Key Words: mesoscale; submesoscale; ...

目 录

摘要	I
Abstract	III
图表清单	IX
注释表	XI
1 绪论	1
1.1 北大西洋海洋多尺度能量串级的研究意义	1
1.2 中尺度涡旋与亚中尺度过程之间的能量串级	1
1.2.1 中尺度涡旋	1
1.2.2 亚中尺度过程	1
1.2.3 亚中尺度与中尺度之间的能量串级	1
1.3 本章小结	2
2 数据与主要方法	3
2.1 数据	3
2.1.1 船载 ADCP 数据	3
2.2 分析方法	3
2.2.1 Wave-Vortex 分解	3
3 Iceland Basin 和 Irminger Sea 动能波数谱的季节特征和能量串级法	5
3.1 动能谱的总体特征	5
3.2 动能谱的季节变化	5
4 结论与展望	7
4.1 结论	7
4.2 展望	7
参考文献	9
附录 A 各向同性假设	11
攻读博士学位期间取得的研究成果	13
致谢	15
作者简介	17

Contents

Abstract (In Chinese)	I
Abstract (In English)	III
Figure list & Table list	IX
Abbreviation	XI
1 Introduction	1
1.1 Significance of research on energy cascade in the North Atlantic Ocean. . .	1
1.2 Energy cascade between mesoscale eddies and sub-mesoscale processes. . .	1
1.2.1 Mesoscale eddies	1
1.2.2 Submesoscale processes	1
1.2.3 Energy cascade between mesoscale eddies and sub-mesoscale processes. Energy cascade between mesoscale eddies and sub-mesoscale processes.	1
1.3 Brief Summary	2
2 Data and method	3
2.1 Data	3
2.1.1 Shipborne ADCP data	3
2.2 Method	3
2.2.1 Wave-Vortex hahah	3
3 Section 3	5
3.1 Section 3.1	5
3.2 Section 3.2	5
4 Conclusion and Research Prospects	7
4.1 Conclusion	7
4.2 Prospects for future research	7
Reference	9
Appendix A	11
Published papers and research results while pursuing the degree	13

Acknowledgements	15
Resume	17

图 表 清 单

图 1-1 OOI 项目浮标设置位置	2
图 1-2 OSNAP 项目锚定浮标位置	2
图 A-1 Iceland Basin 的经向流速和纬向流速	11
表 3-1 船载 ADCP 仪器设置	5

注释表

英文缩写	英文全称	中文全称
AMOC	Atlantic Meridional Overturning Circulation	大西洋经向翻转流
OSNAP	Overturning in the Subpolar North Atlantic Program	北大西洋亚极地翻转流计划
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler	声学多普勒流速剖面仪

1 绪论

1.1 北大西洋海洋多尺度能量串级的研究意义

海洋中的环流受到地球自转的影响，动能主要集中在海洋的大尺度环流，如黑潮、湾流和中尺度涡旋等空间尺度大于地转尺度的运动上。根据目前已有的卫星高度计数据，中尺度能量占据了大洋总能量的 70% 以上。中尺度庞大的动能来源与去向问题一直是本世纪海洋动力学研究的热点问题。Wunsch 和 Ferrari 在 2004 年回顾性的工作指出^[1]，.....

.....

.....

1.2 中尺度涡旋与亚中尺度过程之间的能量串级

1.2.1 中尺度涡旋

中尺度涡旋在海洋中广泛存在，其空间尺度通常在 50 公里 – 500 公里，被认为是低阶近似满足地转平衡的最小尺度海洋运动过程，因此其水平运动远远大于垂直运动，具有较小罗斯贝数和较大理查德森数。中尺度涡旋较为稳定，周期从几天到数月。

.....

1.2.2 亚中尺度过程

亚中尺度指从中尺度到耗散尺度之间这一宽阔尺度的粗略划分。在这部分中存在涡旋、锋面以及涡丝等多种运动形式。从 NASA 的 MODIS 卫星观测的表面叶绿素为亚中尺度涡丝和锋面频繁出现提供了证据^[2]。除此之外，部分亚中尺度涡旋被发现存在于上层海洋内部和海底。亚中尺度过程的周期一般为几小时到几天^[3]。其空间尺度一般小于当地的罗斯.....

1.2.3 亚中尺度与中尺度之间的能量串级

由于海洋中尺度和亚中尺度相互作用中存在着大量非线性过程，因此现有研究多引入湍流理论来解释上述过程的物理机制，称为地转湍流理论。本文对地转湍流理论的讨论分为能量注入尺度和能量串级两部分。能量注入尺度指代湍流动力学含能区的观点，即能量从该尺度进入动能谱，本文中对对应不稳定发生势能转化为动能的特征尺度。能量串级概念来源于前苏联科学家 Kolmogorov 在谱方法基础上针对湍流研究的奠基性的工作，指能量跨尺度转移过程.....

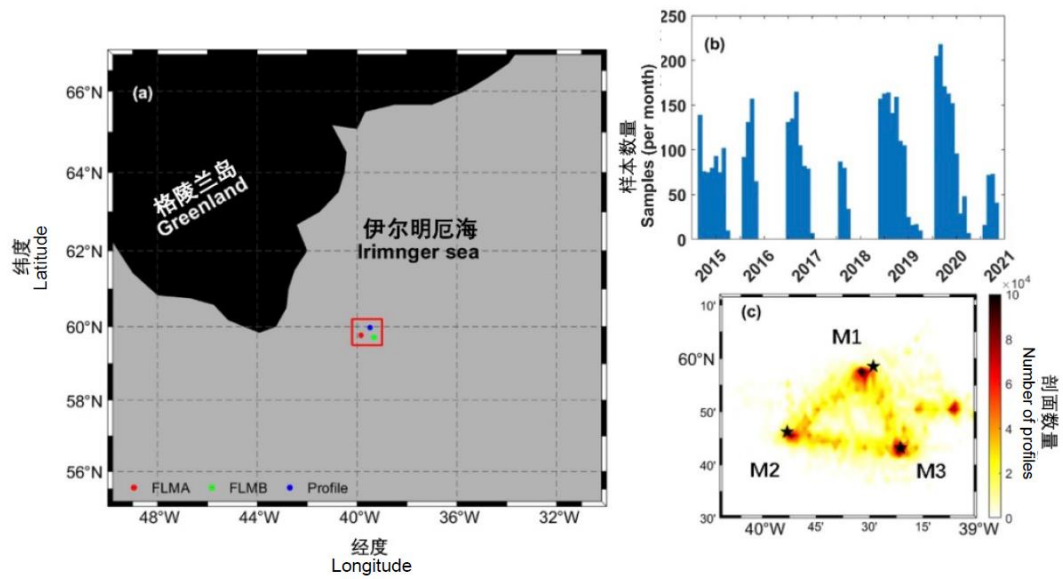


图 1-1: (a) OOI 项目位置，红框表示研究区域，彩色的点表示系泊。(b) 抽样概况的时间分布。(c) 采样点的空间分布，黑色的星星表示 (a) 中的系泊浮标

Fig. 1-1 (a) Position of OOI program, red box represents the study region, colored points indicate moorings. (b) Time distribution of sampling profiles. (c) Spatial distribution of sampling points, the blacks stars indicate the moorings in (a)

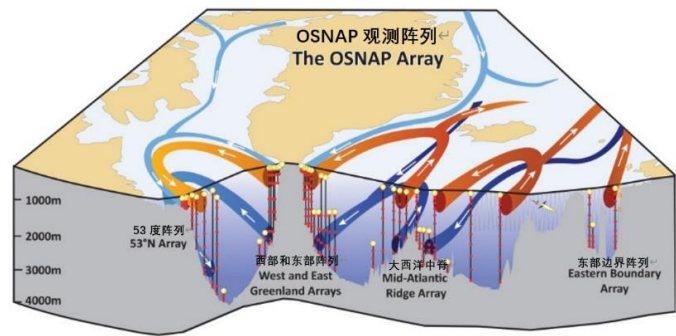


图 1-2: 北大西洋副极地翻转环流观测项目 (OSNAP) 阵列观测点 (黄色点) 空间分布^[4]

Fig. 1-2 Spatial distributions of OSNAP array observations (yellow dots)^[4]

1.3 本章小结

前文中，我们回顾了中尺度涡旋、亚中尺度运动和近惯性内波以及它们之间的相互作用关系，然而前任工作对上述物理过程的研究往往是分散的，主要集中于讨论两两之间的相互作用，且具有时间或空间上的依赖性的，导致不同物理过程之间的相互作用的研究工作很难整合到一起……

2 数据与主要方法

2.1 数据

2.1.1 船载 ADCP 数据

本文使用了 Nuka Arctica 邮轮船载声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 测量的上层海洋高空间分辨率流速资料。

.....

2.2 分析方法

2.2.1 Wave-Vortex 分解

本文使用了 Wave-Vortex 分解方法对船载 ADCP 测量结果进行了分析, 参照 Bühler 提出的波-涡分解方法^[5], 采用一维动能谱的 Wave-Vortex 动能谱分解办法。这种方法能够解决由空间尺度上波动和涡动的尺度重叠导致二者在空间谱上信号混杂的问题。但分解方法和其他湍流分析一样有严格的假设: (1) 数据测量稳定均匀, (2) 各向同性, (3) 数据在观测空间尺度上具有周期性。首先, 我们将跨航迹流速和沿航迹动能谱通过 Helmholtz 分解, 转化为旋转和辐散两部分, 将其写成谱函数的形式:

$$k \frac{d\hat{F}^\phi}{dk} - d\hat{F}^\psi = -\frac{\hat{c}^v}{2}, \quad (2-1)$$

$$k \frac{d\hat{F}^\psi}{dk} - d\hat{F}^\phi = -\frac{\hat{c}^u}{2}, \quad (2-2)$$

式中, $(\hat{F}^\phi, \hat{F}^\psi)$ 为计算过程谱函数, (\hat{c}^u, \hat{c}^v) 分别为沿航迹函数和跨航迹函数, k 为水平波数

3 Iceland Basin 和 Irminger Sea 动能波数谱季节特征和能量串级

本文首先使用船载 SADC 数据, 对 Iceland Basin 和 Irminger Sea 两个海盆的动能谱特征进行了分析。论文的主要研究对象是中尺度过程、亚中尺度过程和近惯性内波之间的相互作用, 而亚中尺度过程和中尺度过程的定义是依据地转关系在空间上对海洋物理过程的划分, 因此对他们的研究将从空间特征着手……

3.1 动能谱的总体特征

在具体分析动能谱的季节变化之前, 本文对所有可用船载航迹的动能谱进行垂向平均后取他们的均值, 得到 Iceland Basin 和 Irminger Sea 具有代表性的动能谱。Iceland Basin 的动能谱在……

3.2 动能谱的季节变化

为了更详细的讨论动能谱的季节变化规律, 本文进一步将观测数据分为四个季节进行统计和比较……

表 3-1: 船载 ADCP 仪器设置
Tab. 3-1 Setup of shipborne ADCP instruments

观测时期 (年)	空间分辨率 (km)	时间分辨率 (min)	观测深度 (m)	仪器频率 (kHz)
1998-2002	3	7	400	150
2008-2012	1.5	5	800	75

4 结论与展望

4.1 结论

北大西洋作为大西洋深层水的发源地，对全球气候变化有着重要影响^[6]。本文围绕中尺度过程、亚中尺度过程和近惯性内波之间的能量交换过程展开了一系列研究。首先，利用船载 ADCP 对 Iceland Basin 和 Irminger Sea 的中尺度—亚中尺度运动和海洋内波的动能波数谱进行研究。讨论了中尺度过程、亚中尺度过程之间的转换尺度影响因素，季节变化特征和深度依赖性。其次，本文结合平衡流波数谱和三阶结构函数深入分析了两个海盆的能量串级和能量注入问题。进一步，由于亚中尺度能量注入问题和海洋斜压不稳定密切相关，本文利用 Irminger Sea 阵列观测周围的水下滑翔机数据分析了亚中尺度锋面的季节特征和变化规律，并进一步分析了海洋多种类型的不稳定。最后，利用 Iceland Basin 和 Irminger Sea 锚定浮标观测序列分析了中尺度、亚中尺度和近惯性内波之间的能量交换特征。本文得到以下结论：

北大西洋中尺度—亚中尺度运动与海洋内波，存在明显的季节变化特征。中尺度—亚中尺度运动在冬季动能谱斜率更接近于 $-5/3$ ，在其他季节接近 -3 ，说明除冬季外，上层海洋主要由准地转湍流过程调控。海洋内波在冬季最强，在夏季最弱。二者之间的转换尺度在夏季最小为 28 千米，在冬季海洋内波在各个尺度上超过中尺度—亚中尺度运动。这种转换尺度的巨大变化主要由海洋内波过程引……

4.2 展望

……

参考文献

- [1] C. Wunsch and R. Ferrari. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36(1): 281–314.
- [2] Z. Zhang, B. Qiu, P. Klein, and et al. The influence of geostrophic strain on oceanic ageostrophic motion and surface chlorophyll [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2838.
- [3] J. C. McWilliams. Submesoscale currents in the ocean [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, 472(2189): 20160117.
- [4] M. S. Lozier, S. Bacon, A. S. Bower, and et al. Overturning in the Subpolar North Atlantic Program: A new international ocean observing system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(4): 737–752.
- [5] J. Callies, O. Buhler, and R. M. Ferrari. Wave-vortex decomposition of one-dimensional shiptrack data [C]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2014, OS33E-08.
- [6] 李娟, 左军成, 谭伟, 等. 21 世纪格陵兰冰川融化速率对海平面变化的影响 [J]. *海洋学报*, 2015, 27(7): 22–32.
- [7] S. M. Soares, S. T. Gille, T. K. Chereskin, and et al. Transition from balanced to unbalanced motion in the eastern tropical Pacific [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2022, 52(8): 1775–1795.

附录 A 各向同性假设

各向同性作为本文第三章和第四章作为关键的假设之一，我们使用 Soares^[7] 提出的指标对其进行了检验。首先我们对流速结果进行了直接的检验。对于流速大于 0.5m/s 的经向纬向流速存在弱的不对称现象。但是对于流速小于 0.5m/s (一般为亚中尺度过程流速量级) 红色区域表现为正圆形，因此满足各向同性假设。……

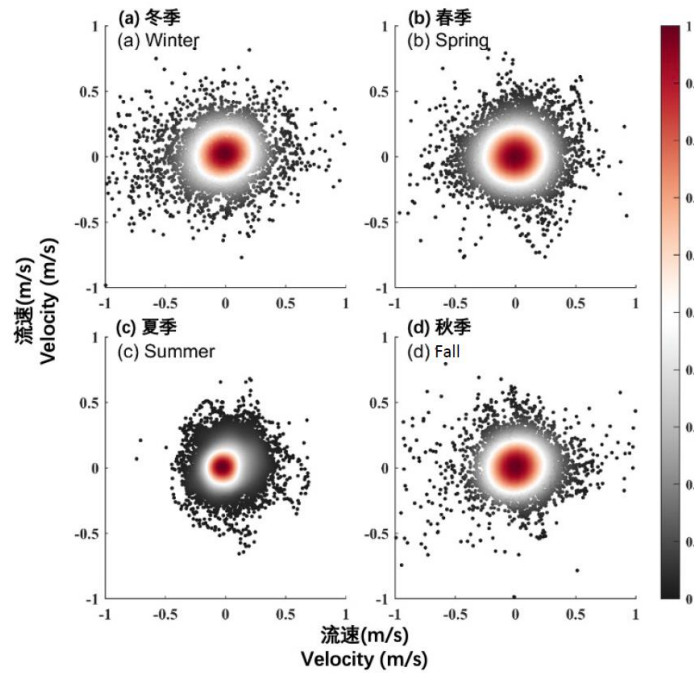


图 A-1: Iceland Basin 的经向流速 (X 轴) 和纬向流速 (Y 轴)

Fig. A-1 Meridional velocity and zonal velocity in Iceland Basin

攻读博士学位期间取得的研究成果

一、发表的学术论文

[1] hahah

[2] hahah

二、申请及已获得的专利

1. hahah

2. hahah

三、参与的科研项目及获奖情况

1. hahah

2. hahah

致 谢

致谢中主要感谢导师和对论文工作有直接贡献或帮助的人士和单位。

一般致谢的内容有：

- (1) 对国家自然科学基金、资助研究工作的奖学金基金、合同单位、资助或支持的企业、组织或个人；
- (2) 对协助完成研究工作和提供便利条件的组织或个人；
- (3) 对在研究工作中提出建议和提供帮助的人；
- (4) 对给予转载和引用权的资料、图片、文献、研究思想和设想的所有者；
- (5) 对其他应感谢的组织和个人；
- (6) 致谢言语应谦虚诚恳，实事求是，建议字数不超过1000字。

作者简介

××××年×月×日出生于××省××市。

××××年×月考入××大学××院（系）××专业,××××年×月本科毕业并获得×学学士学位。

××××年×月——××××年×月,在××大学××院（系）××学科学习并获得×学硕士学位。

××××年×月——××××年×月,在××大学××院（系）××学科攻读博士学位。

获奖情况: 如获三好学生、优秀团干部、×奖学金等（不含科研学术获奖）。

工作经历:

.....