

学校编码: 10384

密级\_\_\_\_\_

学号: 22420110153622

廈門大學

博士学位论文

应用 LICOM 模式评估吕宋海峡附近地形  
对黑潮入侵的作用

Using LICOM to estimate roles of topography near the  
Luzon Strait on Kuroshio intrusion

黄志达

指导老师姓名: 胡建宇 教授  
                  刘海龙 研究员

专业名称: 物理海洋学

论文提交日期: 2016年8月

论文答辩时间: 2016年9月

2016年8月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为区域环境海洋学课题组的研究成果,获得区域环境海洋学课题组经费的资助,在区域环境海洋学实验室完成。

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

基于观测资料、卫星高度计资料和 LICOM 2.0 模式一序列的地形敏感性试验，本论文首先划分吕宋海峡附近黑潮入侵方式，然后利用地形敏感性试验评估吕宋海峡附近地形对黑潮入侵的作用。主要研究成果如下：

(1) 基于 1993–2013 年 AVISO 卫星高度计资料，本论文定义了一个双指数 (Double-index) 并划分出吕宋海峡附近 3 种典型的黑潮入侵类型：黑潮暖涡路径、黑潮冷涡路径和黑潮泄漏路径，这展示了吕宋海峡附近黑潮与中尺度涡之间典型的配置关系。因此，双指数可以较好地地区分黑潮入侵路径。

(2) 通过逐步添加岛屿链或岛屿的方法，本论文运行了 4 组 LICOM 2.0 模式的吕宋海峡附近地形敏感性试验。研究结果表明：吕宋海峡南部岛屿链地形具有减少黑潮主轴西向弯曲的作用，而中北部岛屿链和巴布延岛地形则具有增加西向弯曲的作用。中北部岛屿链地形还将黑潮分流成黑潮西分支和黑潮东分支。动力诊断表明黑潮西向弯曲越大，伴随着黑潮进入吕宋海峡的入射角越大，此时黑潮东分支增强。

(3) 利用 2010 年 5 月和 2011 年 9 月份的现场观测资料，并结合卫星高度计观测资料和 Argos 浮标资料。本论文发现当进入吕宋海峡的黑潮增强时，黑潮主轴左侧较强的流速切变可以在加拉鄢浅滩西侧诱生一个气旋涡。此时黑潮次表层出现“双核心”盐度结构(KDCS, Kuroshio Double-Core Structure)。基于 LICOM 2.0 模式，加拉鄢浅滩地形敏感性试验揭示了加拉鄢浅滩地形摩擦效应是 KDCS 结构形成的重要条件。

(4) 采用 ETOPO2 水深资料，本论文重新运行 LICOM 2.0 模式得到了 1993–2007 年的模拟结果，并与先前基于 DBDB5 水深资料的模拟结果对比。分析表明：当吕宋海峡深层水通道被合理打开时，出现了典型的吕宋海峡水通量 (LST) “三明治”垂向结构；而当关闭该通道时，虽然也有一定的 LST “三明治”垂向结构，但此时太平洋深层水未能通过深层水通道进入南海。因此，模式中吕宋海峡深层水通道的表征，是模拟出典型的 LST “三明治”垂向结构的关键因子。

关键词：吕宋海峡；黑潮入侵；吕宋海峡水通量；地形试验；LICOM

## Abstract

Based on observations, satellite altimeter data and series of topographic sensitivity experiments performed by LICOM 2.0, this thesis first classifies three typical Kuroshio intrusion paths in the Luzon Strait (LS), and then uses the experiment results to estimate roles of topography near the LS on Kuroshio intrusion. The main results are listed as follows:

(1) Based on satellite altimeter data from AVISO during 1993 to 2013, we propose a double-index method (DI) and identify three kinds of Kuroshio intrusion types: the Kuroshio warm eddy path, the Kuroshio cold eddy path, and the leaking path. These three types present typical spatial distributions of the Kuroshio intrusion path and the mesoscale eddies in the northeastern South China Sea (SCS). Therefore, DI can better distinguish the paths of the Kuroshio intrusion.

(2) One control and three sensitivity experiments of LICOM 2.0 have been conducted by adding three parts of topography (island chain or island) gradually in the LS. Our study presents that the south island chain decreases the westward bending of the main Kuroshio path, the middle and north island chain increases the westward bending, and the Babuyan Island also increases the westward bending. Moreover, the middle and north island chain can split the Kuroshio into two parts: the Kuroshio west and east branches. Dynamic diagnoses suggest that the westward bending enlarges as the increasing in incidence angle of the Kuroshio and thus intensifies the Kuroshio east branch.

(3) From the analyses of the in-situ data in May 2010 and September 2011 combined with satellite altimeter data and Argos drifter trajectory data in the LS, we find that a cyclonic eddy in the west of the Calayan Bank is triggered by strong velocity shear on the left side of the main Kuroshio when more Kuroshio water flows into the LS. Meanwhile, a Kuroshio double-core salinity structure (KDCS) happens in the subsurface layer. Based on LICOM 2.0 numerical model, two topographic sensitivity experiments indicate that the KDCS should attribute to the bottom friction

effect of the Calayan Bank.

(4) Furthermore, we re-run the LICOM 2.0 from 1990 to 2007 based on ETOPO2 dataset, and compare with the simulations based on DBDB5. When the deep water channel is open in the LS, the Pacific deep water flows into the SCS and the Luzon Strait Transport (LST) has a typical sandwiched structure. When the deep channel is closed, the LST also has a sandwiched structure to a certain extent, but the Pacific water is blocked by incorrect topography. Therefore, well representation of the deep water channel is a key to the typical LST sandwiched structure simulation.

Key words: Luzon Strait; Kuroshio intrusion; Luzon Strait Transport; Topographic experiment; LICOM

## 目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 黑潮入侵南海的观测事实.....	2
1.2.1 黑潮入侵方式.....	2
1.2.2 黑潮入侵的时间变化特征.....	3
1.2.3 吕宋海峡水通量及其垂向结构.....	4
1.3 黑潮入侵的动力机制.....	6
1.3.1 中尺度涡的作用.....	6
1.3.2 局地风场的作用.....	6
1.3.3 太平洋大尺度风场的作用.....	7
1.4 黑潮入侵的数值模拟.....	8
1.4.1 模拟的 LST 及其垂向结构.....	9
1.4.2 地形敏感性试验.....	10
1.5 存在的问题和本文的研究内容.....	11
第 2 章 LICOM 2.0 模式简介.....	13
2.1 模式方程组.....	13
2.1.1 控制方程.....	13
2.1.2 湍流粘性项.....	14
2.1.3 湍流扩散项.....	17
2.1.4 中尺度涡旋的参数化.....	17
2.1.5 穿透加热项.....	19
2.1.6 海水状态方程.....	19

2.2 垂直坐标.....	20
2.3 正压方程组.....	22
2.4 边界条件和初始条件.....	23
2.5 小结.....	25
<b>第 3 章 双指数方法划分吕宋海峡附近黑潮入侵类型.....</b>	<b>26</b>
3.1 资料和方法.....	26
3.2 结果.....	29
3.2.1 DI 指数的基本特征.....	29
3.2.2 KSI 指数的基本特征.....	36
3.2.3 DI 和 KSI 指数的比较.....	38
3.2.3.1 Looping 和 Leaping 路径流型发生概率的月变化.....	38
3.2.3.2 积分区域的影响.....	42
3.2.3.3 计算方式的影响.....	44
3.3 小结.....	48
<b>第 4 章 吕宋海峡附近岛屿链对黑潮入侵的影响.....</b>	<b>50</b>
4.1 资料和方法.....	50
4.1.1 观测资料.....	50
4.1.2 敏感性试验设计.....	50
4.2 上层环流、温度和盐度特征分析.....	54
4.2.1 表层地转流.....	54
4.2.2 海表温度.....	57
4.2.3 AS 断面的经向流.....	58
4.2.4 AS 断面的温度和盐度.....	60
4.3 黑潮特征的诊断量分析.....	64
4.3.1 黑潮入侵类型的发生概率.....	64
4.3.2 黑潮流量在巴林塘海峡附近的分配.....	67
4.3.3 黑潮主轴西向弯曲.....	70
4.4 小结.....	71



第 5 章 吕宋海峡加拉鄢浅滩地形的作用.....	73
5.1 资料和方法.....	73
5.2 结果.....	77
5.2.1 卫星高度计观测结果.....	77
5.2.2 现场观测结果.....	79
5.2.2.1 <i>T-S</i> 特征.....	79
5.2.2.2 断面盐度和温度分布.....	79
5.2.2.3 地转流计算结果.....	82
5.2.3 地形敏感性试验.....	84
5.2.4 Argos 浮标观测结果.....	86
5.3 小结.....	88
第 6 章 LICOM 2.0 模拟吕宋海峡水通量“三明治”垂向结构.....	90
6.1 资料和方法.....	90
6.2 结果.....	92
6.2.1 吕宋海峡水通量时间序列.....	92
6.2.2 LST 垂向结构.....	93
6.2.3 120.75 °E 断面纬向流.....	96
6.2.4 吕宋海峡附近深层环流.....	98
6.2.5 太平洋深层水入侵的动力机制.....	98
6.2.6 南海经圈翻转环流.....	101
6.3 小结.....	101
第 7 章 结论与展望.....	103
7.1 主要结论.....	103
7.2 不足之处与未来展望.....	104
参考文献.....	105
致谢.....	114

## CONTENTS

Abstract (in Chinese).....	I
Abstract (in English).....	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 INTRODUCTION.....	1
1.2 KUROSHIO INTRUSION INTO THE SOUTH CHINA SEA BASED ON OBSERVATIONS.....	2
1.2.1 Kuroshio intrusion types.....	2
1.2.2 Temporal variations of Kuroshio intrusion.....	3
1.2.3 Luzon Strait Transport and its vertical structure.....	4
1.3 DYNAMICS FOR KUROSHIO INTRUSION.....	6
1.3.1 Effects of mesoscale eddy.....	6
1.3.2 Effects of local wind.....	6
1.3.3 Effects of wind stress in Pacific.....	7
1.4 KUROSHIO INTRUSION BASED ON MODELLING RESULTS.....	8
1.4.1 LST and its vertical structure based on numerical models.....	9
1.4.2 Totographic sensitivity experiments.....	10
1.5 PROBLEMS AND PLANS.....	11
Chapter 2 Introduction of LICOM 2.0.....	13
2.1 MODEL EQUATIONS.....	13
2.1.1 Governing equations.....	13
2.1.2 Turbulent viscosity.....	14
2.1.3 Turbulent diffusion.....	17
2.1.4 Mesoscale eddy parameterization.....	17
2.1.5 Heating penetration.....	19

2.1.6 Equation of seawater state.....	19
2.2 VERTICAL COORDINATE.....	20
2.3 BAROTROPIC EQUATIONS.....	22
2.4 BOUNDARY AND INITIAL CONDITIONS.....	23
2.5 SUMMARY.....	25
Chapter 3 A Double-Index method to classify Kuroshio intrusion paths in the Luzon Strait.....	26
3.1 DATA AND METHODS.....	26
3.2 RESULTS.....	29
3.2.1 Characteristics of the DI.....	29
3.2.2 Characteristics of the KSI.....	36
3.2.3 Comparison of the DI with the KSI.....	38
3.2.3.1 Monthly proportions of the looping and leaping paths.....	38
3.2.3.2 Impacts of the integral area.....	42
3.2.3.3 Impacts of the calculation methods.....	44
3.3 SUMMARY.....	48
Chapter 4 Roles of island chains on the Kuroshio intrusion in the Luzon Strait.....	50
4.1 DATA AND METHODS.....	50
4.1.1 Observations.....	50
4.1.2 Experiments.....	50
4.2 ANALYSES FOR THE GEOSTROPHIC CURRENTS, TEMPERATURE AND SALINITY IN UPPER LAYER.....	54
4.2.1 Surface geostrophic currents.....	54
4.2.2 Sea surface temperature.....	57
4.2.3 Meridional flow across the AS section.....	58
4.2.4 Temperature and salinity across the AS section.....	60

4.3 DIAGNOSTIC METRIS FOR KUROSHIO.....	64
4.3.1 Statics of Kuroshio intrusion types.....	64
4.3.2 Kuroshio transport proportions near Luzon Strait.....	67
4.3.3 Westward bending of the main Kuroshio path.....	70
4.4 SUMMARY.....	71
<b>Chapter 5 Topographic effect of the Calayan Bank in the Luzon Strait...</b>	<b>73</b>
5.1 DATA AND METHODS.....	73
5.2 RESULTS.....	77
5.2.1 Results from satellite altimeter observations.....	77
5.2.2 Results from in-situ observations.....	79
5.2.2.1 Characteristics of T-S.....	79
5.2.2.2 Sectional distributions of salinity and temperature .....	79
5.2.2.3 Geostrophic calculations.....	82
5.2.3 Topographic experiments.....	84
5.2.4 Results from Argos.....	86
5.3 SUMMARY.....	88
<b>Chapter 6 Sandwich structure of the LST simulated by LICOM 2.0.....</b>	<b>90</b>
6.1 DATA AND METHODS.....	90
6.2 RESULTS.....	92
6.2.1 Time series of the LST.....	92
6.2.2 Vertical structure of the LST.....	93
6.2.3 Zonal flow across the 120.75 °E section.....	96
6.2.4 Circulation in the deep layer near the Luzon Strait.....	98
6.2.5 Dynamics for the deep Pacific water intrusion.....	98
6.2.6 South China Sea Meridional Overturning Circulation.....	101
6.3 SUMMARY.....	101
<b>Chapter 7 Conclusions and expectations.....</b>	<b>103</b>

7.1 MAIN CONCLUSIONS.....	103
7.2 SHORTAGES AND EXPECTATIONS.....	104
Reference.....	105
Acknowledgments.....	114

厦门大学博硕士论文摘要库

## 第 1 章 绪论

**【本章摘要】** 黑潮如何通过吕宋海峡入侵南海，是当前物理海洋学家研究的一个热点，同时也是一个开放性的科学问题。近年来，利用现场观测、卫星高度计观测、数值模拟和理论研究等方法，已开展黑潮入侵方式及其时间变化、吕宋海峡水通量及其垂向结构、黑潮入侵动力机制等的研究，并取得了大量的成果，但仍存在许多争议。本论文首先综述吕宋海峡附近黑潮入侵的研究进展，然后探讨当前研究还存在哪些问题待进一步解决，最后引出本论文的研究内容。

### 1.1 引言

吕宋海峡位于台湾岛和吕宋岛之间(图 1.1)，南北宽度约 380 km，最深处超过 2500 m，是南海连接太平洋的最主要通道。黑潮是西北太平洋的西边界流，其水平尺度约 100 km，垂向尺度约为 1000 m，最大流速约为  $1 \text{ m s}^{-1}$ 。黑潮的次表层盐度最大值超过 35.00，而中层盐度最小值低于 34.25 (Qu et al., 2000; Xie et al., 2011; 刘增宏等, 2011)。在吕宋海峡附近，黑潮失去西边界的支持，其运动学和动力学性质均发生改变。黑潮入侵南海的过程中与南海水混合，其次表层核心盐度值减少(Qu et al., 2000; Liang et al., 2008; Xie et al., 2011)。一般而言，黑潮入侵的判定主要有三个方面：(1)南海东北部表层的流径是否可以识别到黑潮 (Caruso et al., 2006; Nan et al., 2011); (2)吕宋海峡是否具有西向的水通量(Qu et al., 2000; Tian et al., 2006); (3)南海东北部水团是否具有黑潮水特征(Li et al., 1998; 刘增宏等, 2011)。通过现场观测、卫星高度计观测、数值模拟和理论研究，黑潮入侵南海的研究取得了大量的成果，但仍存在许多争议(Hu et al., 2011; Nan et al., 2014)。

基于这样的研究背景，本章先介绍近年来吕宋海峡附近的水文特征的研究进展，再分析这些研究中还存在哪些问题需要进一步解决，最后引出本论文的研究内容。

## 1.2 黑潮入侵南海的观测事实

### 1.2.1 黑潮入侵方式

在表层，Caruso et al. (2006)总结了黑潮在吕宋海峡附近的主要流动形式(图 1.1)，它们分别是跨越状态(A)、黑潮南海分支(B)、黑潮流套(C)、反气旋涡脱落(D)和气旋式入侵(E)。

仇德忠等(1984)分析 1979 年和 1982 年夏季的水文资料，发现南海北部的一支西向海流，垂向尺度可达 1000 m 左右，推测它与吕宋海峡附近的黑潮有关，提出了“黑潮南海分支”的观点。郭忠信等(1985)发现冬季南海暖流右侧也存在向西南流动的黑潮南海分支。根据南海北部多年调查资料的综合分析，黄企洲等(1992)认为黑潮南海分支是一支比较稳定的偏西向海流。船载 ADCP 资料进一步证实黑潮南海分支主要以西北向进入南海东北部(蒲书箴等, 1992)。卫星遥感资料和 Argos 卫星跟踪表层漂流浮标也证实了黑潮南海分支的存在(Yuan et al., 2006; 徐晓华等, 2010)。

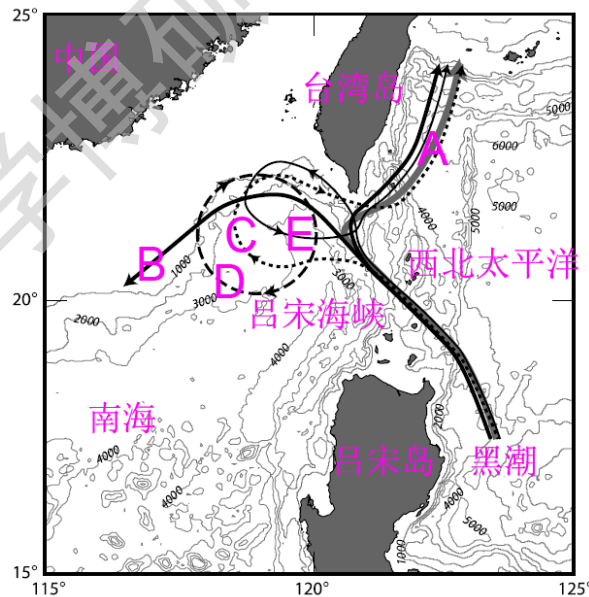


图 1.1 黑潮在吕宋海峡附近的 5 种流动形式[引自 Caruso et al. (2006)]: (A)跨越状态; (B)黑潮南海分支; (C)黑潮流套; (D)反气旋涡脱落; (E)气旋式入侵

Fig. 1.1 Five types of Kuroshio paths near the Luzon Strait (LS) [cited from Caruso et al. (2006)]: (A) the leaping path, (B) the Kuroshio SCS branch, (C) Kuroshio loop, (D) the detached anticyclonic eddy, and (E) the cyclonic intrusion

李立和伍伯瑜(1989)通过分析历史水文资料,发现黑潮反气旋式运动进入吕宋海峡并折回黑潮主轴,明确提出“黑潮流套”的观点,其水平尺度可达 400 km,垂向尺度至少为 800 m。这一观点从不同的观测资料中得到了进一步的证实:历史观测资料体现了年平均的黑潮入侵方式是黑潮流套(Yaremchuk and Qu, 2004); 15 年船载 ADCP 资料表明黑潮流套是黑潮入侵的主要方式(Liang et al., 2008); 卫星遥感资料显示黑潮经常以黑潮流套的方式入侵南海东北部(Caruso et al., 2006)。

Li et al. (1998)利用 1994 年 9 月初的在南海东北部大陆坡外的 CTD 资料捕获到一个反气旋式旋涡,其空间尺度约 150 km,垂向尺度超过 1000 m。根据该反气旋涡核心次表层(中层)盐度高于(低于)周围海水的特征,他们认为该反气旋涡是从黑潮脱落的。后来,分析 1992–2001 年的卫星高度计资料, Jia and Liu (2004) 识别出 33 个反气旋涡从黑潮脱落。结合现场观测和卫星高度计资料, Wang et al. (2008)于 2004 年 1–2 月观测到一个反气旋涡从黑潮脱落。然而, Yuan et al. (2007) 则认为 Li et al. (1998) 捕获的反气旋涡,好像不是从黑潮脱落的,而是从吕宋岛西北海域传过去的。

最近,利用 AVISO 卫星高度计资料,一些学者尝试以客观的方式划分吕宋海峡黑潮入侵方式,并计算这些路径的发生概率(Nan et al., 2011; Tsui et al., 2012)。其中, Nan et al. (2011)提出的 KSI 指数(Kuroshio South China Sea Index)具有较清晰的动力学特征,建立了判定黑潮入侵路径的客观标准。KSI 指数是台湾岛西南海区[19–23 °N, 118–121 °E]地转涡度的面积积分。利用 KSI 指数的 1 倍标准差划分规则,黑潮流套路径、跨越路径和泄漏路径(Leaking)得到了定量的评估,它们的概率分别是 16.4%、68.2%和 15.4%。

### 1.2.2 黑潮入侵的时间变化特征

早在上世纪 60 年代, Wyrki (1961)就指出黑潮入侵具有冬强、夏弱的特征。大量的观测事实都支持该观点,包括:现场观测(Shaw, 1991; 许建平等, 1997), Argo 剖面资料(刘增宏等, 2011), Argos 表层漂流浮标资料(马超等, 2010)和卫星高度计资料(Caruso et al., 2006)。

许多观测事实也表明黑潮入侵具有显著的季节内变化信号。利用卫星高度计



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.