

学校编码: 10384
学号: 22620091151195

密级_____

廈門大學

硕士学位论文

南海北部陆架区夏季冷水向岸输送
地形机制研究

Topographic mechanism for onshore transport during
summertime in the Northern South China Sea

张云翼

指导教师姓名: 江毓武 副教授

专业名称: 环境管理

论文提交日期: 2012年05月

论文答辩时间: 2012年06月

2012年06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()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 张云翥

2012年6月15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。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人(签名)：

张云翥

2012 年 6 月 15 日

摘要

在近岸陆架区,地形是诱导海水跨陆架输送的一个重要因子。本文在前人理论研究基础上,发展并推导出包括非线性对流作用和底摩擦作用在内的较为完整的地形理论公式。公式揭示了近岸陆架区跨陆架输送的地形机制。

地形诱导跨陆架输送的地形公式包括两个部分,分别是零阶涡度对流作用和底摩擦作用。零阶相对涡度的非线性对流过程会产生贯穿整个水体的跨陆架输送,具体包括水深梯度二阶导数的变化、等深线曲率的变化、地形坡度的变化以及在强剪切流速区域等深线的辐散或辐聚的作用。底摩擦力作用产生的跨陆架输送主要存在于底部边界层,包括底部 Ekman 泵吸作用和底部 Ekman 输送,前者受地形诱导的零阶相对涡度的影响,具体为水深梯度二阶导数、曲率以及流速剪切作用;后者在垂直方向上受水深控制,在水平尺度上受零阶流大小的影响,较强的零阶流会产生较强的向岸输送。目前,关于南海北部陆架区向岸输送的地形诱导机制研究较少,本文的研究目标是利用理论公式具体、定量的分析南海北部陆架区向岸输送形成的地形机制。

南海北部陆架区具有复杂的地形和不规则的岸线,其中一个典型特征是珠江口东侧向东延展的变宽的陆架区域(简称宽陆架)。在汕尾外侧近岸 115.0°E 附近, $30.0\text{ m}\sim 100.0\text{ m}$ 等深线向岸凸起,使陆架变窄至 140.0 km 左右。 30.0 m 等深线和 50.0 m 等深线向东延展并分离, 30.0 m 等深线贴岸延伸进入台湾浅滩北侧; 50.0 m 等深线逐渐偏离岸线方向并贴着台湾浅滩外缘延伸,陆架变宽至 200.0 km 左右;在 $30.0\text{ m}\sim 50.0\text{ m}$ 等深线之间形成一个梯形的宽陆架区域。在台湾浅滩西侧 117.0°E 附近等深线向岸凸起,形成类似 115.0°E 附近的地形特征。

本文采用海洋观测数据分析和三维区域海洋模式两种方法研究南海北部跨陆架输送现象,并探讨形成跨陆架输送的可能影响因子。最后本文将地形理论公式应用到南海北部陆架区,提出造成南海北部陆架区向岸输送的地形诱导机制。

海洋观测资料和模型计算结果显示夏季南海北部陆架区向岸输送现象具有如下特点:(1)等深线向岸凸起区域(115.0°E 和 117.0°E 附近),向岸输送贯穿整个水层,与边界层的 Ekman 作用关系不大;(2)等深线平缓向东延展的宽陆架区域,向岸运动主要存在于底部边界层,受底部 Ekman 作用显著。理想实验

结果说明对流作用和底部摩擦力是产生跨陆架输送的两个关键因子。在等深线向岸凸起的 115.0°E 和 117.0°E 附近, 对流作用显著, 受底摩擦作用较小; 在 $115.0^{\circ}\text{E}\sim 117.0^{\circ}\text{E}$ 之间的宽陆架区域, 主要受底部摩擦作用, 包括底部 Ekman 泵吸和底部 Ekman 输送, 且后者贡献更大。

结合理论公式, 最终得到南海北部陆架区向岸输送的地形诱导机制: 在 115.0°E 和 117.0°E 附近, 等深线向岸凸起, 从气旋式弯曲转变为反气旋式弯曲(曲率从正变为负), 诱导产生上升运动和向岸输送, 且这种运动贯穿整个水层; 在 $115.0^{\circ}\text{E}\sim 117.0^{\circ}\text{E}$ 之间的宽陆架区域, 等深线平滑但更加密集, 沿等深线流速变大, 受底部 Ekman 泵吸和底部 Ekman 输送在底边界层产生较强的向岸运动, 且后者贡献更大。

关键词: 地形; 向岸输送; 涡度对流; 底摩擦作用; 南海北部

Abstract

In the continental shelf region, topography is an important factor for cross-shelf transport. Based on the previous studies, a formulation is proposed to evaluate the topographically inducing onshore transport related with the advection and friction effects.

The theoretical equation explains the relationship between topography and the vertical/cross-shelf transports. When the flow in zero order is along the favorable isobaths, the nonlinear advection can generate the vertical and cross-shelf transport through the whole water column. The favorable isobaths are characterized by the variations of some parameters along isobaths, e.g., depth second derivation, curvature, of the isobaths, slope and sheared velocity multiplied by the variation of slope. When the curvature of an isobath changes from cyclonic to anti-cyclonic, or in the strong anti-cyclonic sheared region, the isobath converges in the downstream direction can cause upwelling and onshore transport. The friction function has two parts, those are, the bottom Ekman pumping and the bottom Ekman effect, and the former is controlled by the relative vorticity in the zero order induced by the second derivative of depth, curvature of isobaths and the slope, while the latter is affected by the along-isobath velocities and the slope. The divergent or convergent isobaths can cause smaller or larger onshore transports under the Ekman effect. This paper focuses on the topographic mechanism to study the cross-shelf transport over the variable topography in the Northern South China Sea (NSCS).

NSCS is a marginal sea with complex bottom geography and irregular coastlines. One of its typical topography feature is the widened shelf in east of Pearl River Estuary. In the shelf off Shanwei near 115.0°E, 30.0 m, 40.0 m and 50.0 m isobaths convex on shore, and the width of shelf is narrowed to 140.0 km. Then isobaths extend northeastward, with separating 30.0 m and 50.0 m isobaths. The 30.0 m isobath parallels to the coast and extends into the Taiwan Strait, while 50.0 m isobath extends offshore until encounters the Taiwan Bank (TB), forming the width of 200.0

km. Then a widened shelf is formed between the 30.0 m and 50.0 m isobath. On the west of the shallow bank, 40.0 m isobath veers onshore and converges with 50.0 m, 60.0 m, 70.0 m isobaths to the south boundary of TB, of which topography is similar with the topography near 115.0°E.

The observed data and three-dimensional model are used here to study the onshore transport in the NSCS. Then the theoretical model is applied in the continental shelf of NSCS to study the topographic mechanism for cross-shelf transport.

Both the observed data and numerical model showed the cross-shelf transport during summertime in 2009 in the NSCS had two feathers. First, the onshore transports over two regions with convex onshore isobaths near 115.0°E and 117.0°E occurred at all the water column, which was quite different from the general circulation in the boundary surface and bottom layers. Another onshore transport over a distinctly eastward widened shelf with smoother isobaths, between 115.0°E and 117.0°E, showed a cross-shelf transport located in the 20.0 m bottom layer.

Three numerical experiments are carried out and the results suggest the advection function is the key factor for generating the onshore transport over the regions near 115.0°E and 117.0°E, and the friction function gives a smaller contribution to onshore transport in the bottom layer. However, the transport over the widened shelf is mainly caused by the bottom friction function and bottom Ekman effect.

Combining the model and theoretical methods, the topography mechanism of cross-shelf transport in the NSCS is concluded as below.

The cross-shelf transports in the two regions near 115.0°E and 117.0°E with convex isobaths onshore are mainly caused by the curvature of isobath from cyclonical to anti-cyclonical, which generate the relative vorticity in zero order from positive to negative and thus upwelling and onshore transport. Moreover, in the anti-cyclonical sheared region, the convergent isobath downstream can cause onshore velocity near 115.0°E. The bottom friction gives a smaller contribution to these two regions in the bottom layer.

The onshore transport in the widened shelf region with smoother isobaths between 115.0°E and 117.0°E is mainly induced by the bottom friction in the bottom layer. The

high along-isobath velocities lead the strong onshore transport under the bottom Ekman effect in the boundary layer. However, the bottom Ekman pumping effect generates smaller onshore current over this region.

Key Words: Topography; Onshore transport; Vorticity advection function; Friction function; Northern South China Sea

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	VI
Contents.....	VIII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题意义.....	1
1.2 陆架地形诱导机制研究进展.....	2
1.3 研究目标与内容.....	5
第 2 章 跨陆架输送地形理论公式推导.....	6
2.1 零阶相对涡度公式推导.....	6
2.2 垂直流速公式推导.....	9
第 3 章 南海北部背景综述.....	13
3.1 南海北部地形特点.....	13
3.2 南海北部夏季上升流系统.....	14
3.3 南海北部地形诱导机制研究现状.....	16
第 4 章 南海北部跨陆架输送海洋调查分析.....	17
4.1 资料来源.....	17
4.2 夏季南海北部陆架区底层温盐分布.....	19
4.3 潜标数据分析.....	20
4.4 本章小结.....	22
第 5 章 南海北部跨陆架输送数值模拟研究.....	24
5.1 研究方法.....	24
5.1.1 模型介绍.....	24
5.1.2 控制方程组.....	25
5.1.3 模型配置.....	26

5.1.4 计算方法.....	27
5.1.5 模型验证.....	28
5.2 南海北部跨陆架输送水平分布特征.....	31
5.3 南海北部跨陆架输送垂向分布特征.....	33
5.4 本章小结.....	36
第 6 章 南海北部跨陆架输送形成机制数值分析.....	37
6.1 跨陆架输送的动力分析.....	37
6.2 数值理想实验.....	40
6.2.1 理想实验设计.....	40
6.2.2 流函数分析.....	41
6.2.3 垂直流速分析.....	43
6.3 本章小结.....	45
第 7 章 南海北部跨陆架输送形成机制理论分析.....	46
7.1 零阶相对涡度分析.....	46
7.2 涡度对流机制.....	47
7.3 底部摩擦力机制.....	50
7.3.1 底部 Ekman 泵吸机制.....	50
7.3.2 底部 Ekman 输送.....	52
7.3.3 底摩擦作用.....	53
7.4 地形诱导机制.....	54
第 8 章 结论.....	56
8.1 夏季南海北部跨陆架输送特点.....	56
8.2 南海北部跨陆架输送机制.....	56
8.3 存在问题和展望.....	57
附录 A: 地形拉普拉斯算子公式推导.....	59
附录 B: 垂直流速公式推导.....	61
参考文献.....	64
致 谢.....	68

Contents

Abstract in Chinese	错误! 未定义书签。
Abstract in English.....	错误! 未定义书签。
Contents in Chinese	错误! 未定义书签。
Contents in English.....	错误! 未定义书签。
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research significance.....	1
1.2 Background of topographic mechanism for onshore transport	2
1.3 Research goals and contents.....	5
Chapter 2 Theoretical model study	6
2.1 Relative vorticity in the zero order.....	6
2.2 Vertical velocity over variable topography	9
Chapter 3 Reviewed and background of Northern South China Sea.....	错误! 未定义书签。
3.1 Feather of topography	错误! 未定义书签。
3.2 Research background of upwelling system.....	14
3.3 Research background of cross-shelf transport	16
Chapter 4 Observational study.....	17
4.1 Data	17
4.2 Bottom temperature and salinity distribution.....	19
4.3 Mooring data analysis	错误! 未定义书签。
4.4 Chapter conclusion.....	错误! 未定义书签。
Chapter 5 Numerical model study	24
5.1 Method	24
5.1.1 Model introduction.....	24
5.1.2 Equations.....	25
5.1.3 Model setting and boundary conditions	26

5.1.4 Model calculation.....	错误！未定义书签。
5.1.5 Model verification.....	28
5.2 Horizontal Variability.....	错误！未定义书签。
5.3 Current vertical Structure.....	错误！未定义书签。
5.4 Chapter conclusion.....	36
Chapter 6 Numerical analysis of cross-shelf transport.....	37
6.1 Dynamic analysis.....	37
6.2 Numerical sensitive experiments.....	错误！未定义书签。
6.2.1 Design of experiments.....	错误！未定义书签。
6.2.2 Stream-function analysis.....	错误！未定义书签。
6.2.3 Vertical velocity analysis.....	错误！未定义书签。
6.3 Chapter conclusion.....	45
Chapter 7 Topographic mechanism of cross-shelf transport.....	错误！未定义书签。
7.1 Relative vorticity in zero order.....	46
7.2 Advection function.....	47
7.3 Bottom friction function.....	错误！未定义书签。
7.3.1 Bottom Ekman pumping.....	错误！未定义书签。
7.3.2 Bottom Ekman effect.....	错误！未定义书签。
7.3.3 Bottom friction effect.....	错误！未定义书签。
7.4 Topographic mechanism.....	54
Chapter 8 Conclusion.....	56
8.1 Feathers of cross-shelf transport.....	56
8.2 Topographic mechanism of cross-shelf transport.....	56
8.3 Questions and future plans.....	57
Appendix A: Formula of topographic laplacian.....	59
Appendix B: Formula of vertical velocities.....	错误！未定义书签。
References.....	64
Acknowledgment.....	68

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第1章 绪论

1.1 选题意义

南海是西北太平洋最大的边缘海之一,平均水深在 1000.0 m 以上^[1]。南海海域辽阔,海底是呈东北—西南方向长轴的菱形海盆。盆地地处西、中沙群岛和南沙群岛之间,是个深度达 4000.0 m 以上的深海平原,在东部及东南部的大陆坡麓附近,分别有水深 3000.0 m 和 4000.0 m 左右的海槽和海沟。在西北部的坡麓附近,有一个深达 5559.0 m 狭窄洼地,为南海最深处。大陆坡下为水深大于 3500.0 m 的中央盆地。从东沙群岛向南水深增大到 1000.0 m~2000.0 m,东沙群岛与中沙、西沙群岛之间,水深为 1000.0 m~3000.0 m。

南海通过多个海峡与太平洋、印度洋存在水交换,东北部分别以台湾海峡和巴布延、巴林塘、巴士等海峡与东海和西北太平洋相沟通,东南部通过名都洛海峡、巴拉巴克海峡与苏禄海相连,南北通过卡里马塔和邦加等海峡与爪哇海相通,西南部通过马六甲海峡与安达曼海相通。南北 20 个纬度的跨度使南海这个半封闭海盆有很多和大洋相同的动力学特征,而复杂的岸线、地形则影响了南海内部的环流动力学特点,使南海在海洋内部的温度和盐度分布、潮汐混合、中小尺度涡旋、径向环流等方面具有明显的半封闭边缘海特征。

一直以来,南海环流都是海洋科学界研究的热点和难点。南海暖流、南海中尺度涡、黑潮水在南海内部的交换以及南海夏季上升流系统都集中了大量的研究。早在 1961 年 Wyrski 就指出南海平均环流的分布结构是由南海较宽的地形以及风应力旋度造成^[2]。杜岩^[3]等人指出南海中小尺度涡旋的形成来源于季风强迫、侧边界驱动以及地形制约。Metzger^[4]等通过数值分析发现风应力、风应力旋度以及地形都会影响吕宋海峡水交换。南海陆架区的上升流现象具有显著的季节性变化特点,多数研究认为夏季西南季风是产生上升流的主要动力,而地形在其中起着重要的调整作用^[5,6]。

综合大量的研究,发现复杂的地形始终是影响、制约、控制南海局地环流的重要因子,然而目前对于南海地形诱导机制的深入、具体、定量的研究非常少。对地形机制进行深入研究有利于加强对南海陆架区环流动力过程的理解和应用,

并且能够为海洋生物、海洋化学等学科研究提供物理基础和动力依据。

1.2 陆架地形诱导机制研究进展

理论上, 线性、均一、非摩擦的水体会沿着等深线运动, 然而当流在变化的地形下同时受到对流/非线性作用和底摩擦作用时, 流会穿过等深线向岸或离岸运动^[7]。在陆架区域, 地形对陆架环流具有重要影响, 因为水深的变大或变小会直接影响水体的动量、能量以及热量的吸收, 从而影响近岸环流^[8]。许多研究尝试从观测、模型角度寻找地形对近岸区水体跨陆架输送的影响, 但都未从本质上提出地形的动力机制^[9, 10]。

Arthur 在 1965 年从理论公式的角度论证了地形变化对加利福尼亚沿岸上升流的作用^[11]。他提出了经典的地形理论, 阐释了相对涡度对流与垂直流速之间的关系:

$$f \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{D\zeta}{Dt} \quad (1-1)$$

$$\zeta = \frac{V}{R_g} - \frac{\partial V}{\partial n} \quad (1-2)$$

公式中 ζ 代表相对涡度, f 代表科氏力参数, R_g 和 V 分别是流线的曲率半径和流速大小, $\partial V/\partial n$ 代表流速的切变涡度。公式证实沿着流线方向相对涡度从正值变为负值会产生上升流和向岸运动, 反之相对涡度从负变为正则产生下降流和离岸运动。之后 Arthur^[11]利用上述公式估算出向南运动的加利福尼亚东边界流会在岬角的背风处产生上升流, 并论证了 $D\zeta/Dt$ 的重要性。然而, 该研究只考虑了对流作用对垂直运动的影响, 忽略了底摩擦以及侧摩擦对陆架环流的作用。2001 年, Rodrigues^[12]等人通过设计关于地形与岸线的三维数值实验证实位于巴西东南岸的上升流受到地形变化与岸线形状的显著影响。之后他采用 Arthur 的简易公式, 估算出由于相对涡度对流产生的垂直流速对局地上升流的贡献达 40.0%, 说明了涡度对流的重要性。

智利沿岸是世界著名的上升流区, 具有丰富的海洋生产力, 1980 年 Johnson^[13]等人借鉴 Arthur 的方法, 将其进一步发展为一个两层的模型, 并应用到智利沿

岸上升流区域。垂直流速与对流、行星涡度和风应力之间的关系表达式为：

$$w_{-h} = \frac{H}{2|f|} (\bar{v} \cdot \nabla \zeta + \beta v) + \frac{h}{2|f|} \left(\frac{\tau_0^y}{h} \right) \quad (1-3)$$

公式(1-3)中， h 代表上层水层厚度， H 是总水深， τ_0^y 代表风应力。之后他们对上述公式中的变量进行尺度参数化处理，得到了涡度对流与风应力两种作用诱导产生上升流的对比关系式：

$$\frac{\text{Vorticity}}{\text{Wind}} \frac{\text{acceleration}}{\text{effect}} = \frac{HV^2 \lambda}{R^2 \tau} \quad (1-4)$$

其中 R 是曲率半径， τ 是风应力， λ 是离岸距离， V 是水体流速。对智利沿岸上升流区域进行估算，发现涡度对流作用是风应力作用的两倍，说明了涡度对流对近岸地区跨陆架运动的重要性。2000年 Figuera and Moffat^[14]以 Johnson 等人的理论公式为基础，将智利沿岸地形进行纬向简化，相对涡度对流用地形来表示，得到变化的地形和风应力对垂直流速的贡献：

$$w_t = \frac{Hv^2}{fS^2} \tan \beta \quad (1-5)$$

$$w_c = \frac{1}{2\rho f} \frac{\partial \tau^y}{\partial x} \quad (1-6)$$

公式(1-5)、(1-6)中， w_t ， w_c 分别表示地形与风应力产生的垂直流速， H 是总水深， v 是沿岸流速， S 代表沿岸流的宽度， β 代表沿岸流的纬向宽度变化率。结合上述两个公式对智利沿岸上升流进行计算，发现在智利沿岸某些区域上升流是由风应力产生的，而某些区域则受地形控制。

1982年，Janowitz^[15]等人发展了更加严格的基于扰动理论并且忽略摩擦作用和密度变化的二维正压地形理论。研究假设一个稳定、无散、均一的水体流过变化的地形，由于对流作用的存在产生跨等深线运动，并展示了由于地形作用产生的垂直流速，具体包括：水深的拉普拉斯算子沿等深线变化以及等深线的辐聚或

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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 for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库