

学校编码：10384  
学号：200127001

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学  
硕 士 学 位 论 文

粤东和越南沿岸上升流的分布特征  
及形成机制

Study of Distribution and Generating Mechanism of  
Eastern Guangdong and Vietnam Coastal Upwelling

庄 伟

指导教师姓名：胡建宇 教 授

专 业 名 称：物理海洋学

论文提交日期：2004 年 8 月

论文答辩时间：2004 年 8 月

学位授予日期：

答辩委员会主席：李立 研究员

评 阅 人：李立 研究员

陈金泉 教授

2004 年 8 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

本文基于 2000 年夏季的航次资料及相应的卫星遥感海面温度场 (SST) 和海面风场数据, 对粤东沿岸上升流现象进行了综合分析。结果表明: 观测期间, 珠江冲淡水向东扩展的趋势很明显,  $116^{\circ}\text{E}$  以西近岸海域表层为低盐的沿岸水团所控制。东山—汕头沿岸海域的水团具有低温、高盐、高叶绿素的性质, 显示了沿岸上升流的存在。在不同水团的交汇区, 形成了温度和盐度锋面。通过对卫星遥感 SST 和风场的比较可知, 上升流强度和风场的变化密切相关, 海面风场平行岸分量的变化是夏季该上升流强度发生改变的重要原因。

通过 Levitus 气候平均温盐资料和卫星遥感资料的综合分析, 揭示了夏季越南沿岸低温中心在不同深度上的空间差异。越南东部在  $11^{\circ}30'\text{N}$  附近存在陆地岬角地形, 表层的低温中心位于岬角东南部近岸; 在 50m~200m 层, 岬角以北的近岸海域则存在显著的低温高盐中心, 并与此处海面风应力旋度的高值区, 以及海面高度异常 SLA 的低值区相对应。

数值模拟进一步验证了资料分析的结果, 表明夏季越南以东存在显著的低温中心。模式结果表明: 由于越南以东近岸的风场具有很强的正风应力旋度, 导致局地表层海水辐散, 进而驱动下层海水向上补充。这种 Ekman 泵吸效应是此处的上升流形成的重要条件。相比较而言, 南海南部负的风应力旋度对越南冷涡的影响程度弱于越南以东的局地风应力旋度, 但它仍在一定程度上影响了越南沿岸上升流的空间分布。岬角东南部的近岸上升流的形成机制则不同于岬角以北, 西南季风平行于岸的分量驱动的近岸 Ekman 输运很可能是此处上升流形成的主导因素。

**关键词:** 粤东; 越南; 上升流

## Abstract

Based on in situ measurements in July 2000 and satellite remote sensing data of NOAA-derived sea surface temperature and QuikSCAT sea surface wind fields, upwelling phenomena off the Eastern Guangdong coast have been analyzed. It is observed that an eastward Pearl River plume, indicated by the low sea surface salinity off the Eastern Guangdong coast, extended to the west of 116°E. On the other hand, the water mass near Dongshan-Shantou coastal area is characterized by low temperature, high salinity and high chlorophyll, indicating the existence of coastal upwelling. Oceanic fronts are observable at the confluence of different water masses. The variation of alongshore components of sea surface wind field have important influence on the intensity of the coastal upwelling.

The analysis of Levitus climatological temperature and salinity data and remote sensing data reveals that at different depths, the low temperature zones off Vietnam coast have remarkable spatial variance in summer. There is a cape landform near 11°30'N of Vietnam coast. The sea surface low temperature center is observed along the coast southeast of the cape. At the depth from 50 m to 200 m, there exists an obvious low temperature, high salinity zone north of the cape, which is also the location of maximum of sea surface wind curl and minimum of sea level anomaly (SLA).

The numerical modelling further validates the results of data analysis, that is, the existence of a cold eddy east of Vietnam. Several sensitive experiments indicate that the local strong positive wind stress curl leads to the divergence of sea surface water and the upward supplement of lower layer

water. Such an Ekman pumping effect is important for the upwelling off the coast. Compared with the local wind stress curl, the negative wind stress curl in the southern South China Sea has smaller influence on the low temperature area. But it still affects the spatical distribution of the upwelling region to a certain extent. The upwelling southeast of the cape has different generating mechanism from the one north of the cape. The offshore Ekman transport driven by the alongshore component of southeast monsoon may play an important role in the development of this coastal upwelling.

**Key words:** Eastern Guangdong; Vietnam; upwelling

## 目录

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 引言 .....	1
1.2 南海北部上升流 .....	3
1.2.1 沿岸的风生上升流 .....	3
1.2.2 台湾浅滩上升流 .....	4
1.2.3 雷州半岛以东上升流 .....	5
1.3 越南近岸上升流研究现状 .....	5
1.3.1 历史水文资料揭示的越南近岸上升流现象 .....	5
1.3.2 遥感观测得到的上升流现象 .....	6
1.3.3 数值模拟对上升流区水文特征的研究 .....	7
1.3.4 越南近岸上升流的形成机制 .....	7
1.4 本文拟研究的主要问题 .....	8
<b>第二章 夏季粤东上升流的遥感与航次观测</b> .....	<b>11</b>
2.1 2000 年粤东沿岸上升流的航次观测 .....	11
2.1.1 数据来源 .....	11
2.1.2 沿岸上升流的实测证据 .....	11
2.2 2000 年粤东沿岸上升流的遥感证据 .....	13
2.2.1 数据与处理方法 .....	13
2.2.2 卫星遥感 SST 所揭示的上升流和锋面 .....	14
2.2.3 海面风场对上升流区域 SST 的影响 .....	15

<b>2.3 本章小结与讨论</b> .....	<b>16</b>
2.3.1 讨论.....	16
2.3.2 小结.....	17
<b>第三章 夏季越南近岸上升流的观测研究</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1 资料介绍</b> .....	<b>25</b>
3.1.1 卫星高度计资料.....	25
3.1.2 卫星遥感海面温度数据.....	25
3.1.3 QuikSCAT 海面风场数据.....	25
3.1.4 WOA 2001 温度和盐度资料.....	26
<b>3.2 夏季越南近岸 SST 和 SSH 的时空特征分析</b> .....	<b>26</b>
3.2.1 6~9 月份 SST 和 SLA 的气候平均态.....	26
3.2.2 夏季 SST 和 SSH 空间距平场的经验正交函数 (EOF) 分析.....	27
<b>3.3 WOA2001 温、盐资料分析</b> .....	<b>30</b>
<b>3.4 110°E 断面上遥感与观测资料的比较分析</b> .....	<b>31</b>
<b>3.5 本章小结</b> .....	<b>33</b>
<b>第四章 夏季越南沿岸上升流的数值研究</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1 高分辨率斜压 1.5 层模式</b> .....	<b>41</b>
4.1.1 设计思想.....	41
4.1.2 控制方程.....	41
4.1.3 数值方案与参数选取.....	43
4.1.4 模式设定.....	44
<b>4.2 控制试验(Exp0)结果分析</b> .....	<b>47</b>
4.2.1 上层流场的季节变化.....	47
4.2.2 温跃层平均深度分布特征.....	48

4.2.3 上层温度场季节变化 .....	50
4.2.4 越南冷涡形成机制初析 .....	51
<b>4.3 敏感性试验 (Exp1 - Exp3) .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 越南以东局地风应力无旋化 (Exp1) .....	54
4.3.2 南海南部海区风应力无旋化 (Exp2) .....	56
4.3.3 岸界岬角的影响 (Exp3&Exp3.2) .....	58
<b>4.4 本章小结 .....</b>	<b>59</b>
<b>第五章 结论与讨论 .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1 结论 .....</b>	<b>84</b>
5.1.1 2000 年夏季粤东沿岸的上升流现象 .....	84
5.1.2 越南沿岸上升流的时空分布及形成机制 .....	84
<b>5.2 讨论及进一步的研究展望 .....</b>	<b>86</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>88</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>96</b>



## TABLE OF CONTENTS

<b>Abstract(Chinese)</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract(English)</b> .....	<b>ii</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Foreword</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Upwelling in northern South China Sea</b> .....	<b>3</b>
1.2.1 Wind-driven coastal upwelling .....	3
1.2.2 Upwelling at Taiwan Shoal .....	4
1.2.3 Upwelling off eastern Leizhou Peninsula .....	5
<b>1.3 Present Studies on upwelling near Vietnam Coast</b> .....	<b>5</b>
1.3.1 The upwelling phenomena revealed by historical hydrographic data	5
1.3.2 The upwelling phenomena detected by remote sensing measurements .....	6
1.3.3 Numerical studies on the hydrographic characteristics of the upwelling region .....	7
1.3.4 Formation mechanisms of the coastal upwelling off Vietnam .....	7
<b>1.4 The main points studied by this work</b> .....	<b>8</b>
<b>Chapter 2 Coastal upwelling off Easter Guangdong in summer detected by remote sensing and shipboard measurements</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 Eastern Guangdong upwelling observed by shipboard measurements in summer 2000</b> .....	<b>11</b>
2.1.1 Data .....	11

2.1.2 In-situ evidence of coastal upwelling .....	11
<b>2.2 Remote sensing evidences of Eastern Guangdong upwelling .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Data and method .....	13
2.2.2 Upwelling and fronts revealed by remote sensing SST .....	14
2.2.3 The influence of sea surface wind on SST at upwelling region .....	15
<b>2.3 Summary and discussion .....</b>	<b>16</b>
2.3.1 Discussion .....	16
2.3.2 Summary .....	17
<b>Chapter 3 The observational studies on upwelling off Vietnam coast in summer .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Data .....</b>	<b>25</b>
3.1.1 Altimeter data .....	25
3.1.2 Remote sensing SST data .....	25
3.1.3 QuikSCAT sea surface wind data .....	25
3.1.4 WOA 2001 climatological temperature and salinity data .....	26
<b>3.2 Analysis on temporal and spatial distribution of SST and SSH off eastern Vietnam in summer .....</b>	<b>26</b>
3.2.1 The climatological spatial distribution of SST and SLA during Jun.~Sep .....	26
3.2.2 Empirical Orthogonal Function(EOF) analysis of SST and SSH spatial anomaly in summer .....	27
<b>3.3 Analysis on WOA2001 climatological temperature and salinity data .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4 Comparison of remote sensing and observational data on section 110°E .....</b>	<b>31</b>

<b>3.5 Summary</b> .....	<b>33</b>
<b>Chapter 4 Numerical study on coastal upwelling off Vietnam</b>	
<b>Coast in summer</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1 High-resolution baroclinic one and a half layer model</b> .....	<b>41</b>
4.1.1 Designing .....	41
4.1.2 Controlling functions .....	41
4.1.3 Numerical scheme and parameters .....	43
4.1.4 Model setting .....	44
<b>4.2 The analysis of controlling experiment(Exp0)</b> .....	<b>47</b>
4.2.1 Seasonal variation of the upper layer circulation .....	47
4.2.2 Spatial distribution of the thermocline mean depth .....	48
4.2.3 Seasonal variation of the upper-layer temperature field .....	50
4.2.4 Preliminary analyses on the cold eddies off Vietnam .....	51
<b>4.3 Sensitive experiments(Exp1~Exp3)</b> .....	<b>53</b>
4.3.1 Elimination of local wind stress curl off eastern Vietnam (Exp1) .....	54
4.3.2 Elimination of half-basin wind stress curl in southern South China Sea (Exp2) .....	56
4.3.3 Influence of the cape landform (Exp3&Exp3.2) .....	58
<b>4.4 Summary</b> .....	<b>59</b>
<b>Chapter 5 Conclusions and discussion</b> .....	<b>84</b>
<b>5.1 Conclusions</b> .....	<b>84</b>
5.1.1 Coastal upwelling off eastern Guangdong in summer 2000 .....	84
5.1.2 Temporal and spatial distribution and formation mechanism of upwelling off Vietnam coast .....	84

<b>5.2 Discussion and view of further study</b> .....	<b>86</b>
<b>References</b> .....	<b>88</b>
<b>Acknowledgement</b> .....	<b>96</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

上升流是指海水在垂直方向上的一种缓慢向上运动，运动速度一般在  $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ m/s}$  之间，远小于水平流速。海洋上层阳光充足，含氧量丰富，非常适宜浮游植物生长繁殖，但营养盐常不足，限制了浮游植物的生长繁殖，上升流将深层富含营养盐（硝酸盐、磷酸盐等）的海水带至表层，促进了浮游植物的生长繁殖，为浮游动物进而为游泳动物提供丰富的食料，因此，上升流区是海洋中最肥沃的水域，常形成重要的渔场。根据 J. H. Ryther<sup>[1]</sup>在 1969 年的估算，上升流海区的面积只占世界大洋面积的 0.1%，但是渔获量却占世界海洋鱼类总生产量的一半。因此，上升流的作用受到了滨海国家的高度重视，已进行了大量研究。

南海是中国最大的海域，也是西北太平洋最大的热带边缘海，面积约达 350 万平方公里。南海地处著名的东亚季风区，是一个半封闭的深水海盆，有着复杂的地形，海区内岛屿众多（见图 1.1）。南海的环流形式受季风影响显著，其中还有许多中小尺度的海洋现象。在风、太阳辐射、海底地形、岸线形状和惯性效应等诸多因素的共同作用下，南海呈现出复杂多变的动力和热力结构。近年来，围绕南海海域的调查研究包括许多方面，其中的重点之一就是南海上升流的研究。

南海的上升流分布范围较广，总体而言，南海北部、越南以东沿岸和吕宋岛西北海域是南海上升流最显著的区域。早在上世纪五、六十年代就有关于越南沿岸和广东沿岸上升流的报道<sup>[2]~[4]</sup>。迄今为止，有关南海上升流的研究主要集中在与我国大陆毗邻的南海北部和西北部海域。此处是南海上升流最活跃的区域，根据时空分布和消长机制的不同，南海北部主要

的上升流大致可分为：台湾浅滩上升流，粤东沿岸上升流，粤西沿岸上升流，雷州半岛以东上升流和琼东上升流。尽管南海北部分布着众多上升流区，但却不是南海中上升流最强的区域。近年来的一些研究表明，夏季越南以东沿岸和冬季吕宋岛西北外海的上升流强度都超过南海北部<sup>[5]-[8]</sup>。早年关于越南以东沿岸上升流的研究并不多见，但近年来，因其独特的地理位置和复杂的动力过程，该海域的上升流逐渐受到海洋学家们的重视，对其动力学机制的探讨不断深入，但到目前为止尚未形成统一的观点。而针对吕宋岛西北外海上升流所开展的研究则更为有限，其中 Shaw et al.(1996)<sup>[8]</sup>利用南海东北部的调查资料，并结合数值模式，提出吕宋冷涡是局地风场和海盆尺度深层水平环流共同作用的结果，使我们对其可能的形成机制有了初步了解。由于对该上升流的认识很不完善，本文对其不再做深入讨论。

表 1.1 南海上升流的时空分布

名称	存在范围	持续时间
粤东沿岸上升流	珠江口以东至汕头附近沿岸	夏季
粤西沿岸上升流	琼州海峡东口至珠江口以西沿岸	夏季
琼东沿岸上升流	海南岛东部沿岸	4~9月
台湾浅滩上升流	台湾浅滩周围	四季
雷州半岛以东上升流	18° 30'—20° 30'N, 111.5° E 以西	夏季
越南近岸上升流	越南东岸 10°~15° N 之间	夏、秋季
吕宋岛西北外海上升流	吕宋岛西北海域 18.5° N, 119° E 附近	冬、春季

表 1.1 列举了现有研究所报道的南海上升流的时空分布。除了上述这些主要的上升流，南海还存在许多小尺度的上升流。例如：台湾岛南端鹅銮鼻附近水域的上升流<sup>[9]</sup>，冬季巽他陆架坡折处的上升流<sup>[10]</sup>等。关于这些上升流仅有零星的报道，尚未引起广泛重视，其研究有待于进一步的加强。

## 1.2 南海北部上升流

南海北部上升流的研究起步较早。早在上世纪 60 年代，管秉贤等<sup>[4]</sup>就率先较系统地报道了广东和琼东沿岸的上升流现象，指出在海南岛东岸，汕头沿岸和雷州半岛以东海域都存在上升流现象。从现有的研究结果看，南海北部的上升流按形成机制的不同大致可分为：广东沿岸和琼东沿岸的风生上升流；台湾浅滩上升流和雷州半岛以东上升流。吴日升等<sup>[11]</sup>已经对南海北部陆架区上升流的分布及其形成机制做了较为详尽的概述。因此，本文仅针对它们的特征及消长机制作简要的介绍。

### 1.2.1 沿岸的风生上升流

风生上升流是南海北部最常见的一类上升流。南海冬季盛行东北季风，夏季盛行西南季风，风向大致与南海北部的岸界平行。根据经典的 Ekman 漂流理论，夏季风的作用导致近岸表层海水作离岸运动，外海下层水则向近岸涌升，形成季节性的沿岸上升流。根据地理位置的不同，南海北部沿岸的风生上升流区大致可分为广东沿岸和琼东沿岸两个区域。其中，以珠江口为界，广东沿岸上升流区又可细分为粤东和粤西两部分。

国内的许多学者分别通过不同年份航次资料证实了粤东沿岸夏季普遍存在上升流现象，并认为西南季风以及地形的影响是该上升流发生的重要因素<sup>[12]~[16]</sup>。由于受风和径流等因素的影响，对应于不同年份，其中心位置的时空变异较大。进一步的研究还表明：夏季在上升流海区附近存在温、盐度锋面现象<sup>[17]</sup>。中科院南海海洋研究所根据 1979~1989 年十年水文资料综合分析的结果显示，就多年平均而言，汕头附近海域是粤东沿岸

上升流的中心区<sup>[18]</sup>。粤西沿岸同样存在上升流。伍伯瑜<sup>[19]</sup>和李立<sup>[20]</sup>的研究均表明,夏季在整个珠江口以西陆架区均有低温、高盐、低溶解氧含量的深层海水向岸爬升的现象,其强度和夏季风的强度及其持续时间密切相关。

琼东沿岸风生上升流区是南海北部的另一强上升流区<sup>[21]</sup>。上升流出现于4~9月,夏季最强,中心位置在 $18.5^{\circ}$ — $20.5^{\circ}$ N附近, $111.5^{\circ}$ E以西近岸,并形成了良好的天然渔场<sup>[22]~[24]</sup>。

Li(1993)<sup>[25]</sup>综合以往的历史资料,进一步指出:广东和琼东沿岸夏季上升流均属于风生上升流,它们共同构成了南海北部海盆尺度的季节性上升流系统。

### 1.2.2 台湾浅滩上升流

台湾浅滩位于台湾海峡南部,毗邻南海陆架及陆坡,台湾浅滩水深不足20m。由于水浅且地形复杂,这一海域的上升流较为活跃。陈金泉等(1982)<sup>[12]</sup>通过水文资料的分析指出秋、冬季台湾浅滩西南外斜一带存在上升流。此后的一系列实测和遥感证据都表明:台湾浅滩附近终年都有上升流存在。受到季风、海流和潮汐等因素的影响,台湾浅滩上升流的位置存在明显的季节和年际差异,夏季多位于台湾浅滩东南,而秋、冬季节则多位于台湾浅滩西南<sup>[26]~[30]</sup>。洪华生等(1991)<sup>[31]</sup>对闽南-台湾浅滩生态系统多学科综合调查研究的结果表明,此处是台湾海峡重要的上升流渔场之一。

关于台湾浅滩上升流的形成原因,早期的研究大都认为,黑潮支流和南海水到达台湾海峡南口时,由于该区地形陡然变浅变窄,中、下层冷水顺坡而上,使澎湖列岛西南的台湾浅滩终年都有上升流存在<sup>[26]</sup>。而近期数值实验的结果则表明,除了海峡暖流的影响,潮波的非线性效应是台湾浅滩上升流形成的另一主因,而风的影响是次要的<sup>[32]</sup>。



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库