

学校编码: 10384
学号: 22320141151284

密级__

廈門大學

硕士学位论文

台湾海峡北部春季中层冷水异常数值模拟
研究

Cold water anomalies in the middle layer of the
northern Taiwan Strait in spring: a numerical approach

傅军

指导教师姓名: 江毓武 教授
专业名称: 物理海洋学
论文提交日期: 2017 年 05 月
论文答辩时间: 2017 年 05 月

2017年5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）：

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。

（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）：

年 月 日

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 台湾海峡背景介绍.....	1
1.2 数值模式于台湾海峡的应用.....	2
1.3 模式热通量校正相关研究.....	4
1.4 中层冷水研究进展.....	5
1.5 研究内容及目标.....	6
第二章 台湾海峡业务化预报系统.....	7
2.1 数值模型简介.....	7
2.1.1 控制方程.....	8
2.1.2 边界条件.....	9
2.1.3 随地形坐标系.....	11
2.1.4 稳定性条件.....	12
2.2 模型配置.....	12
2.2.1 模型网格与区域.....	12
2.2.2 模型参数设置以及控制条件.....	13
2.3 本章小结.....	14
第三章 模型验证.....	15
3.1 模型盐度验证.....	16
3.2 模型温度验证.....	20
3.3 本章小结.....	22
第四章 模型校正.....	23
4.1 海表热通量校正简介.....	23
4.2 海表温度数据选取.....	23
4.3 模型实验设计.....	25

4.3.1 对照实验一.....	26
4.3.2 对照实验二.....	28
4.3.3 对照实验三.....	31
4.3.4 附加实验.....	35
4.4 本章小结.....	37
第五章 断面中层冷水异常分析	39
5.1 实测断面水团分析.....	39
5.2 台湾海峡风场变化分析.....	42
5.3 断面温度分布的时间变化.....	44
5.4 断面流速分析.....	48
5.5 断面热诊断分析.....	52
5.6 本章小结.....	58
第六章 总结与讨论	60
6.1 完结工作及结论.....	60
6.2 不足与展望.....	61
参考文献.....	62
致谢.....	65

Content

Abstract in Chinese	I
Abstract in English.....	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background of Taiwan Strait	1
1.2 Application of numerical simulation in Taiwan Strait	2
1.3 The research of heat flux correction in simulation	4
1.4 The research of intermediate cold water	5
1.5 Content and goal of the research.....	6
Chapter 2 The Taiwan Strait Nowcast/Forecast System.....	7
2.1 Introduction of the model.....	7
2.1.1 Control equation.....	8
2.1.2 Boundary conditons	9
2.1.3 Terrain-following coordinate	11
2.1.4 Stability conditions	12
2.2 Model configuration.....	12
2.2.1 Model grid and domain	12
2.2.2 The parameters setting and control conditions	13
2.3 Chapter summary	14
Chapter 3 Model validation	15
3.1 Slinity validation.....	16
3.2 Temperature validation	20
3.3 Chapter summary	22
Chapter 4 Model correction	23
4.1 Introduction of heat flux correction in surface	23
4.2 Selection of SST data.....	23
4.3 Design of the control experiment.....	25

4.3.1 Control experiment 1	26
4.3.2 Control experiment 2	28
4.3.3 Control experiment 3	31
4.3.4 Additional experiment.....	35
4.4 Chapter summary	37
Chapter 5 Analysis of intermediate cold water anomaly.....	39
5.1 Analysis of the water mass in the section	39
5.2 Analysis of the wind field in Taiwan Strait.....	42
5.3 Variation of the temperature distribution in the section.....	44
5.4 Analysis of the velocity in the section	48
5.5 Thermal diagnostics of the section	52
5.6 Chapter summary	58
Chapter 6 Summary and discussion.....	60
6.1 Completed work and conclusion.....	60
6.2 Deficiency and idea for future work	61
References.....	62
Acknowledgement	65

摘要

台湾海峡位于福建和台湾之间，为一狭长水道，在南海和东海水体交换过程中起着重要作用。海峡内部的水团成分多样，海流情况多变，对沿岸生态，经济等方面具有十分重要的影响。2015 年国家基金春季台湾海峡共享航次在海峡北部观测到了中层冷水的现象，在观测断面的中层水体表现为较表层及底层低的温度。本文通过基于 ROMS 的台湾海峡业务化预报系统 (TFOR) 模拟台湾海峡及周边的水文状况，并采用热通量校正的方法对模式的温度模拟进行同化，使其模拟的温度更加符合实际观测值，之后将其结果应用于春季台湾海峡北部中层冷水异常的研究。本文利用该台湾海峡模式模拟了航次出海采集数据的相应时段，其模型结果中海峡北部海域也出现了中层冷水异常现象，与实际相对应，证明了模式结果具有较强的可信度。本文分别从风场、温度场、流场、热诊断等方面对模型中层冷水异常现象进行了分析，发现春季中层冷水的发生始于风场的转变，即风场由东北风转变为西南风，浙闽沿岸冷水的垂向混合减弱，水体开始层化，而西南风作用于台湾海峡，使得海峡南部的暖水北向流动逐渐增强。海峡北部的近岸海域仍被冷水所占据，海表存在水体 Ekman 离岸输送，将沿岸冷水往外海输送，而海底进入海峡的南海暖流产生爬坡运动，形成了上升流，该上升流携带的暖水使底部增温现象明显。春季台湾海峡的太阳辐射增强，辐射通过海表后将热量向下传递，加热海表水，中层和底层水受太阳辐射作用较表层水弱，且底部上升流对中层水的增温效应也相对较弱，故中层水仍保持相对低温的状态。本文中断面热诊断结果也佐证了上述观点，其中海底的增温效应主要受海水的水平对流作用影响，包括沿断面方向以及跨断面方向的海流作用，即除了底部上升流对底层增温的影响外，西南风驱动的由南往北的暖水同样也使海峡北部底层增温显著，且前者对中层水的增温作用相对较弱是中层水保持相对低温的原因；海表增温主要是由于温度垂向扩散作用，其对 0-10m 左右深度的水层增温效果显著，该项一般与太阳辐射有关，故海表增温显著的主要因素是春季增强的太阳辐射。春季海峡北部海域内的整体水温都开始增加，但由于近岸海域仍滞留着浙闽沿岸冷水，加上海底上升流，海峡南部暖水以及太阳辐射等方面共同作用，最终导致

了海峡北部出现的中层冷水异常现象。

关键词：台湾海峡；ROMS；中层冷水异常；上升流；太阳辐射

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Taiwan Strait is a long and narrow channel located between Fujian and Taiwan , which plays an important role in water exchange of South China Sea and East China Sea. The composition of the water mass in the strait is complex and currents inside are various with different seasons, which can seriously affect the aspects of ecology and economy along the coast. In 2015 spring, measured data from the shared voyage of Taiwan Strait of national fund showed that the intermediate cold water phenomenon observed in the northern strait, which performed the colder water occurred in middle level than the surface and bottom. We used the Taiwan Strait Nowcast-Forecast System(TFOR) based on the ROMS(Regional Ocean Modeling System) to simulate the hydrological condition of Taiwan Strait, then we modulated the temperature simulation via adjusting the heat flux to ensure the accuracy of the model result, and the applicable consequence was used to the research of intermediate cold water. The TFOR has simulated the period during the voyage, and the intermediate cold water anomaly phenomenon was also observed in the model result of the northern strait that indicated the reliability for simulation of temperature. We analyzed the aspects of the wind field、 temperature field、 velocity field and thermal diagnostics, then we found the intermediate cold water phenomenon happened with the change of the wind direction, namely, the northeaster transformed to southwester, the stratification of water got started with the mixture of Zhe-Min coastal water becoming weak, at the same time, the southwester forced warm water to transport from south to north. The cold water was remained in offshore area of the northern strait, Ekman transport occurred in the surface to force the cold water flowing offshore and upwelling formed in the bottom due to climbing along the terrain of South China Sea warm current, which led to the warming of nearshore cold water in the bottom. During the spring, the solar radiation became stronger and transmitted the heat to deeper area, the warming of surface water was more obvious than deeper water, moreover, the

warming of intermediate water caused by upwelling was also relatively weaker than bottom water, in conclusion, the intermediate water maintained the relatively lower temperature. Finally, the thermal diagnostics confirmed the opinions above, the rise of temperature in bottom was affected by the horizontal convection, which contained the effects of flow along section and flow across section , that is the upwelling and the northward warm flow bottom forced water temperature to rise together, the weaker effect of the former to the intermediate water was the reason that the intermediate water retained relatively lower temperature; the rise of surface temperature was mainly caused by the vertical diffusion, which was more obvious in 0-10m layer approximately and related to solar radiation. In spring , the water temperature began to rise in the northern strait, the Zhe-Min coastal water stayed in the nearshore area, the effect of bottom upwelling、 southern warm current and solar radiation resulted in the intermediate cold water.

Key words: Taiwan Strait; ROMS; Intermediate water anomaly; Upwelling; Solar radiation

第一章 绪论

2015年春季我们在台湾海峡北部断面发现了明显的中层冷水现象，断面中层水温较表层和底层低，且该现象在我们的模式中也有所体现，关于台湾海峡中层冷水现象成因的解释资料相对缺乏，故本文基于模式结果对台湾海峡北部春季中层冷水异常展开了研究。

1.1 台湾海峡背景介绍

台湾海峡地处东海大陆架，介于台湾与福建之间，南海水与东海水于此进行水体交换。海峡内地形复杂，西侧地势较为平坦，东侧坡度相对较大，平均水深约 60m，在海峡南部出口处存在台湾浅滩，水深仅有 10m-20m，浅滩东北方向澎湖岛与台湾岛之间有一地壳断裂带，由此形成了澎湖水道，澎湖水道两端水深急剧变化，复杂的地形进而对峡区内潮流运动产生了重要的影响（吕新刚和沙文钰，1999）。台湾海峡由于其自身地势特殊，南北分别连接南海与东海，导致了其峡区内的水团成分多样，其一是瓯江、闽江和长江等径流进入沿海后与海水混合形成的沿岸低温低盐水，也称为浙闽沿岸水，该类水体主要出现在春、秋、冬三季（潘爱军等，2012）；其二是粤东沿岸水，该水团主要分布在福建和广东的近岸海域，受到珠江冲淡水的影响形成的；其三是由海峡南部进入海峡内的黑潮入侵水和南海水，特征是高温高盐，较难区分；其四是低温低盐的涌升水，一般出现在台湾浅滩附近上升流区，是由海水沿陆架爬坡形成（肖晖等，2002）。海峡内的海流结构比较复杂，在不同深度以及不同季节条件下均有差异，控制其流态和强度的主要因素包括水团的强度、分布以及海峡内风场的变化。冬季海峡内东北风强盛的时候，福建和浙江沿岸的低温低盐水受风场的驱动产生一股强劲的向南流，被称为浙闽沿岸流，该海流能影响台湾海峡西岸海域的流场结构和海水的水文特征，有研究者认为它能影响至台湾浅滩附近（黄自强和暨卫东，1995；许金电等，2015）。而在台湾海峡内还存在一支常年东北流向的海流，该海流通过许多观测数据以及数值模拟结果被证实，有研究者认为这支北向流是南海暖流在台湾海峡内的续流，其水团来源于南海水以及黑潮水入侵南海的分支（管秉贤，1978；管秉贤，1979；Ye，1994；管秉贤，1998）。浙闽沿岸流以及南海暖流是

台湾海峡海流结构的重要构成，对海峡内的水文特征有着重大的影响。

台湾海峡地处亚热带季风区，峡区内季风季节变化明显，冬季盛行东北风，风速较强，夏季盛行西南风（Jan 等，2002；郭婷婷等，2010），并时常伴随着热带风暴和台风的影响，这些灾害性天气过程不仅会对沿岸建筑、防汛工程等造成严重侵蚀作用，而且容易导致人类社会直接或间接的经济损失，因此加强对海峡内风和潮汐等方面的研究并对其进行合理有效的预报能够有效防止灾害发生。

台湾海峡存在众多上升流区域，包括粤东上升流区、台湾浅滩上升流区以及平潭上升流区，众所周知，上升流会将海底高营养盐水体带至海表，使该处海水营养盐丰富，利于浮游植物等的生存，故一般上升流区适合渔场的建设，如果合理利用这类海洋资源，还能间接带动经济发展。

综上所述，台湾海峡的研究不仅关乎人类社会经济、气候和安全等方面，而且从军事国防、航运等角度来说也是意义斐然。只有对台湾海峡有足够深入的了解，才能从各个方面对其加以利用，当然前提是人们需要对该海洋区域的水文条件和水动力环境有一定的认识，包括海峡内各种水团的分布和变化，海峡内海流的结构等方面。虽然随着国家对海洋研究的愈发重视，各种出海调研项目的设立，数据采集的增加，但台湾海峡内的实测数据仍较为稀少，站位稀疏且无法重现数据在时态上的连续性。近年来数值模拟发展快速，结合实测数据和数值模式来研究海洋现象成为了一种可行且有效的方案。

1.2 数值模式于台湾海峡的应用

随着社会发展，人类与海洋的关系日益密切，在这种前提下，海洋流体运动的研究逐渐兴起，而求解海洋运动相关方程是描述流体运动的关键。20 世纪 40 年代，人类发明了计算机，经过几十年的发展，计算机的计算能力有了极大地提高，这为人类对海洋运动描述方程的求解提供了强有力的设备支持。海洋数值模式发展初期，人类利用数值模式进行海浪的相关研究和预报工作，之后逐渐扩展到海洋的其他方面，包括潮汐预报，海洋温度、盐度、海流等水文状况等的数值模拟研究（郑沛楠等，2008）。通过实测数据对模型的验证以及模型自身不断优化和调整，数值模式已经能够有效地模拟海洋中的各种现象，且能够不断提高其精度。

台湾海峡中数值模拟的应用也由来已久, Jan 等 (1994) 于 20 世纪 90 年代初就利用一个三维正压海洋环流模型来研究章云隆起对该处海流流态的影响, 该隆起在澎湖水道北部, 以往的夏季水文调查结果显示较轻的表层水流过隆起后紧贴台湾西岸流动, 而较重的底层水则被上游阻碍转而向西北沿等深线流动, 模型结果表明了该海域的流态主要由底部地形以及入流的惯性作用决定。Cai 和 Wan (1997) 利用正压数值模型研究风应力和黑潮对中国南海东北海域以及台湾海峡海域环流的影响, 通过设置不同的驱动条件进行对照实验, 当仅靠风应力驱动模型, 模型能够模拟出季节性的流态, 但不存在南海暖流的痕迹, 而仅靠黑潮来驱动模型则缺乏季节性的流态变化。除此之外, 底部的地形也对台湾海峡内的环流也有这重要的影响。吕新刚和沙文钰 (1999) 利用 POM 模式构建了台湾海峡 M2 分潮的三维数值模式, 研究台湾海峡 M2 分潮的潮流结构以及该分潮余流等的分布。Ko 等 (2003) 通过一个实时北太平洋数据同化模型对 1999 年 10-11 月份台湾海峡海水输送逆转的现象进行了研究, 发现该现象是由局地风、黄海和东海的远场风共同驱动的。其后 Wu 和 Hsin (2005) 也利用了更高精度的模式对台湾海峡内的体积输运进行模拟, 模式结果表明海峡内的北向体积输运的最大值出现在夏季, 而最小的体积输运是南向的, 出现在秋冬两季, 体积输运的趋势跟季风季节性反转有关。杜凌等 (2005) 采用三维有限元模型来模拟台湾海峡的潮汐和潮流要素。随着模式计算方法的改进和精度的提高, 模式越来越频繁应用于台湾海峡的研究。Hu 等 (2010) 利用二维正压潮汐模型模拟台湾附近海域正压潮的特征。模式发展除了在计算方法和精度方面有所改善外, 还伴随出现了一些列的嵌套和耦合方案来提高模式研究区域的精度和计算效率, Jiang 等 (2011) 利用嵌套的三维 POM 模式模拟了台湾海峡南部的上升流, 并根据模式结果探讨了西南部上升流和台湾浅滩上升流的机制。Liao 等 (2013) 基于 ROMS 构建台湾海峡三维模式, 并结合模式结果对 2008 年台湾海峡寒害事件展开了研究。不同模式在海洋研究中具备不同的优势, 如 FVCOM 模式采用的是三角网格, 该类网格在岸线和地形的刻画上有很大的优势, 可以较好地拟合复杂岸线边界和地形。王道生等 (2016) 基于 FVCOM 构建了台湾海峡三维潮汐与潮流模式, 对海峡内的潮汐和潮流进行模拟, 得到的潮流和潮汐各项要素的结果同观测资料比较符合, 模拟效果良好。

台湾海峡作为一个研究热点区域，多年以来各类专家学者利用模式开展的研究、已经涉及海域的各个方面，本文在此不多做叙述。

1.3 模式热通量校正相关研究

模式中热量主要来源于海表净热通量的输入，热量进入海洋后的输送通过对流和扩散作用进行。温度的对流-扩散方程可以大致表示为：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A + D + F \quad (1.1)$$

公式 1.1 中 A 为温度对流作用项，B 为温度扩散作用项，F 为海气交互界面的热通量边界条件，通常与海水吸收规律有关。在实际大洋中，热量主要来源于太阳辐射，上层大洋对太阳辐射的吸收以及太阳辐射在上层大洋的衰减等过程对模型的物理、化学和生物方面都有着重要的影响，模式开发者通过参数化水体对太阳辐射的吸收能力，来计算不同深度光辐射的衰减程度。Denman（1973）首先提出向下辐照度的概念，并给出了向下辐照度随深度的衰减方程：

$$I = I_0 e^{-\kappa z} \quad (1.2)$$

公式 1.2 中 I 代表向下辐照度，表示为在一个水平表面的辐射通量的密度， I_0 是指极少被反射的通过海表的辐照度，z 指代深度， κ 指代衰减深度。

太阳光包含不同波段的光，而海水对不同波段的光吸收能力不一，从而导致了海水对光的吸收存在选择性。以上假设过于单一地认为向下辐照度仅随深度指数式衰减，而现实并非如此，考虑到大洋上层海水对光的吸收的选择性，后来的研究者对衰减方程进行了改良。大洋 10m 以上深度的水层对光吸收比较接近于指数式衰减，基于此 Paulson 和 Simpson（1977）给出了以下的向下辐照度的衰减方程：

$$\frac{I}{I_0} = R e^{-\kappa_1 z} + (1 - R) e^{-\kappa_2 z} \quad (1.3)$$

公式 1.3 中的 R 为光被不同水层吸收的比例系数， κ_1 表示光在表层的衰减深度， κ_2 表示光在 10m 以上深度水层的衰减深度。Paulson 和 Simpson（1977）基

于上述方程给出了不同类型水体的最适合参数。

Haney (1971) 首次提出通量型的海表热力边界条件, 该条件能够允许大尺度的海气热力系统进行耦合。Han (1984) 给出了一套类似于 Haney (1971) 的热力学公式的简化版公式, 该公式能够在海洋模式运行中不断修正驱动模式的热通量。基于前两者的研究成果, Barnier 等 (1995) 提出了一种应用于大洋环流模型的通量型海表热力条件, 而其海表热通量校正方程表述为:

$$Q_{NET}(T_S) = Q_{NET}(T_S^{clim}) - \left(\frac{\partial Q_{NET}}{\partial T} \right)_{T_S^{clim}} (T_S^{clim} - T_S) \quad (1.4)$$

公式 1.4 中 Q_{NET} 为净热通量, T_S^{clim} 为气候态海表温度, T_S 为模式的海表温度, 模型通过模拟的海表温度与气候态温度差异来调节净热通量并用于驱动模式, 通过不断更新模型的净热通量场来逐步调整模式温度, 通过多年平均净热通量, 及模式海表温度, 得到现场净热通量。

1.4 中层冷水研究进展

本文除了涉及到台湾海峡模式热通量校正外, 在 2015 年春季台湾海峡北部发现了观测断面的温度分布存在类似三层水体的结构, 即中层冷水异常现象。这里中层冷水异常是指断面最低水温出现在中层附近, 表层及底层的海水温度较中层温度高的现象, 水层的下半部分呈现负温度梯度, 上半部分为正温度梯度。

中层冷水的研究可以追溯到 20 世纪 20、30 年代, 当时已经有学者着手研究极地海的中层冷水, 并解释其成因。之后陆续有学者开展了不同海域中层冷水的研究, 包括日本的南部海域、北太平洋、波罗的海等海域 (Jehiye, 1962; Reid, 1965; Nagata, 1967; Malkki, 1985)。我国的毛汉礼等 (1984) 曾就东海出现的逆温跃层现象进行过论述。翁学传 (1984) 于 1984 发表的海洋学集刊上对东海西北部海域出现的中层冷水现象进行了初步的分析, 他认为冬季的沿岸低温水滞留于该海域内, 而春季海表水温增加, 海底由于台湾暖流输送的高温水导致水温也增加, 中层水仍保持着相对较低的温度, 由此产生了中层冷水异常现象。徐伯昌等 (2000) 基于前人研究的基础上, 对东海西北部中层冷水特征的时空变化进行了总结和分析。王宗山等 (2002) 基于一维数值预报模式, 加入海表热力和动力驱动, 热交换、热平流, 剪切应力等因素构建了三维数值预报模式, 较好地

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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库