

学校编码: 10384  
学号: 22620111151457

密级\_\_\_\_\_

廈門大學

硕士学位论文

黑潮从南部入侵台湾海峡的季节  
和年际变化及其机制研究

Seasonal and inter-annual variability of Kuroshio intrusion  
into the Taiwan Strait from the south and the mechanisms

庄雪芬

指导教师姓名: 张文舟 副教授  
专业名称: 环境工程  
论文提交日期: 2014年8月  
论文答辩时间: 2014年8月

2014年9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

摘要 .....	I
Abstract .....	III
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究综述 .....	1
1.1.1 黑潮入侵台湾海峡的季节变化 .....	2
1.1.2 黑潮入侵台湾海峡的年际差异 .....	8
1.2 研究意义与内容 .....	8
第 2 章 数据与方法 .....	10
2.1 研究区域 .....	10
2.2 数据 .....	12
2.2.1 模型资料 .....	12
2.2.2 2013 全球海洋数据库 .....	14
2.3 方法 .....	15
2.3.1 黑潮入侵指数 .....	15
2.3.2 经验正交分解 .....	17
2.3.3 集合经验模态分解 .....	18
2.3.4 T-S 图分析法 .....	19
第 3 章 黑潮从南部入侵台湾海峡的季节变化及其机制 .....	23
3.1 黑潮从南部入侵台湾海峡的季节变化 .....	23
3.2 影响黑潮从南部入侵台湾海峡季节变化的其他因素 .....	28
第 3 章小结 .....	31
第 4 章 黑潮从南部入侵台湾海峡的年际变化及其机制 .....	32
4.1 黑潮从南部入侵台湾海峡的年际变化 .....	32

---

4.2 1994-1999 年澎湖水道 9 月温盐分布的年际变化及其机制分析 .....	37
第 4 章小结 .....	44
第 5 章 结论与展望 .....	45
5.1 结论 .....	45
5.2 不足与展望 .....	46
参考文献 .....	48
攻读硕士学位期间发表的论文 .....	57
致谢 .....	58

厦门大学博硕士学位论文摘要

## Table of Contents

Abstract (in Chinese) .....	I
Abstract (in English) .....	III
Chapter 1 Preface .....	1
1.1 Review .....	1
1.1.1 Seasonal variability of Kuroshio intrusion into the Taiwan Strait .....	2
1.1.2 Inter-annual variability of the Kuroshio intrusion into the Taiwan Strait .....	8
1.2 Significance and contents of research .....	8
Chapter 2 Data and methods .....	10
2.1 The study area .....	10
2.2 Data .....	12
2.2.1 Model data .....	12
2.2.2 World Ocean Database 2013 .....	14
2.3 Methods .....	15
2.3.1 Kuroshio intrusion index .....	15
2.3.2 Empirical Orthogonal Function .....	17
2.3.3 Ensemble Empirical Mode Decomposition .....	17
2.3.4 T-S plot analysis .....	19
Chapter 3 Seasonal variability of Kuroshio intrusion into Taiwan Strait from the south and the mechanism .....	23
3.1 Seasonal variability of the Kuroshio intrusion into the Taiwan Strait from the south .....	23
3.2 Other factor affect the seasonal variability of Kuroshio intrusion into the Taiwan Strait from the south .....	28
Conclusion of Chapter 3 .....	31

Chapter 4 Inter-annual variability of Kuroshio intrusion into Taiwan Strait from the south and the mechanism .....	32
4.1 Inter-annual variation of Kuroshio into the Taiwan Strait from the south .....	32
4.2 Inter-annual variability of temperature and salinity distribution and its mechanism in the Penghu Channel in September, 1994-1999 .....	37
Conclusion of Chapter 4 .....	44
Chapter 5 Conclusion and prospects .....	45
5.1 Conclusion .....	45
5.2 Shortage and prospects .....	46
References .....	48
Published and publishing paper during the master's degree .....	57
Acknowledgments .....	58

## 摘要

由于黑潮的高温高盐性质,导致黑潮对台湾海峡的环流和生态系统具有重要作用。关于黑潮对台湾海峡的生物地球化学影响及其不同时间尺度的变化受到了国内外广泛关注,但目前为止定量分析黑潮入侵台湾海峡的研究还非常少,尤其是年际变化方面。本文旨在根据一个水平分辨率为 12.5 km、垂直分为 30 层的三维生物地球化学与物理耦合模型输出的每 3 天平均结果,并结合 2013 全球海洋数据库(World Ocean Database 2013),定量分析黑潮从南部入侵台湾海峡的季节和年际变化。

以  $17^{\circ}27'N$ 、 $115^{\circ}124'E$  范围为研究背景,以台湾海峡南边界为研究重点,建立黑潮入侵指数(KII),定量衡量黑潮从南部入侵台湾海峡的程度。基于台湾海峡南部海水的组成只有南海水和黑潮水的假设,KII 是根据盐度守恒计算台湾海峡南部海水中黑潮水的比例。从 1991-2008 年的月平均 KII 和分别加减一个标准差的时间序列比较中发现,三者的变化趋势较为一致,表明 KII 变化的可信性。选取沿着台湾海峡南边界的 10 个点来计算 KII。

虽然 1991-2008 年的平均 KII 为 0.40,但是 10 个站位的 KII 季节平均结果显示黑潮入侵台湾海峡具有显著的季节变化:KII 在春季和冬季较大,而在夏季和秋季较小。黑潮入侵在春季最强,此时 KII 为 0.51;在秋季最弱,此时 KII 仅为 0.18。春季黑潮入侵台湾海峡强于冬季,可能是因为冬季东北季风较强,而春季东北季风减弱使黑潮更容易进入台湾海峡,这与以前的研究一致。

由于过去许多研究都认为黑潮入侵台湾海峡可能与风有关,因此我们试图研究 KII 与风应力的关系。这里我们将研究区域风应力取垂直于台湾海峡南边界的分量,并以向南为正(对应东北风),即为定义的风应力(DWS)。DWS 的月平均结果表明它的最大值和最小值出现在 12 月和 8 月,分别都比 KII 的最大值和最小值提前一段时间,看起来 KII 和 DWS 可能具有滞后关系。随后,为了确认 KII 和 DWS 在 1991-2008 年中主要的年变化趋势,我们用经验正交分解法提取了 KII 和 DWS 的主要模态。然后,一个时滞相关分析被用来分析 1991-2008 年的 KII 与 DWS 的第一 EOF 模态之间是否存在上述关系。结果显示,当滞后时间从 0 天



提升到 63 时, KII 与 DWS 的相关系数从 0.2109 提高到 0.8323, 表明 KII 与 DWS 之间确实存在一个时滞关系。为了提高计算相关系数的自由度, 1991-2008 年的月平均 KII 和 DWS 也被用来分析二者的时滞相关性。1991-2008 年月平均 KII 与 DWS 的相关系数为 0.1024, 然而当 KII 向前移动 2 个月后, 二者的相关性可提高到 0.4456(对应的 90%显著水平下的相关系数为 0.4000)。这表明黑潮入侵与风应力密切相关, 然而滞后 2 个月也表明这种关系可能不是短暂与直接的。除了研究区域的风应力, 台湾西南的气旋冷涡也可能影响黑潮从南部入侵台湾海峡。例如, 1991 年 10-12 月存在台湾西南约 3 个月并阻碍黑潮水进入台湾海峡的气旋冷涡对黑潮入侵台湾海峡的季节变化具有重要影响。

为了得到 KII 的年际变化, 集合经验模态分解(EEMD)法被用来处理 1991-2008 年月平均 KII。结果显示, KII 的极大值出现在 1991、1994、1997、2002 和 2007 年, 极小值出现在 1992、1995、1999-2000、2004-2005 和 2008 年, 这些年份也分别是 El Niño(暖)和 La Niña(冷)事件发生的年份。接着, 用 EEMD 方法分析月平均 DWS 和海洋尼诺指数(ONI)以获得二者的年际变化并与 KII 的年际变化进行比较: KII 几乎与 ONI 同相变化(相关系数为 0.5228), 而与 DWS 则是反相(相关系数为-0.5792)。结果充分表明 El Niño 事件和 La Niña 事件发生的全球气候变化在黑潮入侵台湾海峡的年际变化中具有重要作用。在 El Niño(La Niña)时期, 更多(少)黑潮水从南部进入台湾海峡。然而, 太平洋年代际振荡指数(PDO)的年际变化与 KII 却只有非常小的相关性, 可能是因为 PDO 更多是表征全球气候的年代际变化。此外, 2013 全球海洋数据库也被用来分析 9 月澎湖水道 1994-1999 年的温盐年际变化: 1994-1999 年期间, 1994 和 1997 年, 澎湖水道北部盐度基本低于南部, 而其他四个年份则是高于南部。这是因为澎湖水道北部存在上升流, 导致正常时候盐度高于南部, 而在 1994 和 1997 年, 黑潮进入澎湖水道, 导致澎湖水道南部盐度高于北部。

关键词: 黑潮入侵; 季节变化; 年际变化; 台湾海峡

## Abstract

For the properties of high temperature and salinity, the Kuroshio has a significant effect on the circulation and ecosystem in the Taiwan Strait (TWS). There are lots of researches about the biogeochemical effect and different time scales of variability of the Kuroshio intrusion into the Taiwan Strait, however, the quantitative analysis about the Kuroshio intrusion variation is rarely seen, especially the inter-annual variability. Besides the World Ocean Database 2013 from NOAA is analyzed in this paper, the results with every three-day averaged during the period of 1991–2008 output from a Pacific basin-wide three-dimensional physical-biogeochemical model of which horizontal resolution is 12.5 km, vertical resolution is 30 levels were adopted to investigate the intrusion of the Kuroshio into the TWS from the south.

The study area is within the sea area in  $17^{\circ}27'N$ ,  $115^{\circ}124'E$ , focused on the southern boundary of TWS, and the Kuroshio intrusion index (KII) designed to quantify the degree of Kuroshio intrusion into the TWS from the south. Based on the characteristic salinity of the Kuroshio water and the South China Sea water, we calculated the proportion of the Kuroshio water within the sea water in the southern of TWS to measure the degree of intrusion. Compared the month-averaged KII from 1991 to 2008 with the time series of the KII plus and minus the standard deviation of each month, it is obvious that these three data have a similar trend indicating the credibility of the KII variation. Ten stations along the southern boundary of the TWS were chose to compute the KII.

Since the mean KII during 1991 to 2008 was 0.40, the seasonal mean KII of the ten stations averaged from the original data during 1991 to 2008 showed a distinct seasonal variation of the Kuroshio intrusion. The result manifested that the KII was prevailing in spring and winter while waning in summer and autumn. Kuroshio intrusion was strongest in spring with a mean KII of 0.51 while it was weakest in autumn with a mean KII of 0.18. More Kuroshio water intrudes into the TWS during

spring than during winter, mainly because strong winter northeast monsoon wind becomes weak in spring, which is in agreement with previous studies.

As many previous investigations suggested that the Kuroshio intrusion into the TWS might be related to wind forcing, we examined the relationship between the KII and wind stress. Here, of the wind stress is used only the component normal to the section mentioned previously with the positive being southwestward (corresponding to northeasterly wind), referred to defined wind stress (DWS). The seasonal mean DWS indicated that its maximum and minimum appeared in December and August, ahead of the counterparts of the KII in time, respectively. There seems to be a time-lag between the KII and the DWS. The Empirical Orthogonal Function (EOF) was applied to extract the major modes of the KII and DWS to analyze their main trends in one year around. A time-lag correlation analysis was applied to the first EOF modes of KII and DWS, which represent the main characteristics of the KII and DWS during 1991-2008. The correlation coefficient increased from 0.2409 up to 0.8323 when the lag time was prolonged from zero to 63 days, indicating there existed a time-lag relation between the KII and DWS. Then monthly averaged of the KII and DWS during 1991-2008 were used instead to increase the degree of freedom for annual variation. The correlation coefficient between the monthly KII and the DWS is only 0.1024, however, when the KII is shifted forward by two month, the correlation coefficient rises up to 0.4456 (the corresponding significance level of 90% is 0.4000). This implies that the Kuroshio intrusion is closely related to the wind stress in the annual band though the time lag of about two months demonstrates that the relation may not be instantaneous and direct. Besides the wind stress in the study area, the cyclonic eddy stood in the southwest of the Taiwan could also affected the Kuroshio intrusion into the TWS from the south. For instance, the cyclonic eddy in 1991 illustrated that cyclonic eddy existed in the southeast of the TWS for about 3 months and blocked the Kuroshio entering into the TWS could affect the seasonal variation of the Kuroshio intrusion significantly.

The Ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method was applied to the monthly KII during 1991 to 2008 to obtain its inter-annual signal. The results showed

that peak of the KII appeared in 1991, 1994, 1997, 2002, and 2007 while the troughs occurred in 1992, 1995, 1999-2000, 2004-2005, and 2008, but also with the El Niño and La Niña events taking place during the period concerned, respectively. The monthly DWS and Ocean Nino Index (ONI) were also processed with EEMD method to obtain their inter-annual signal which would be compared with the corresponding of the KII: the KII is almost in phase with the ONI with a correlation coefficient of 0.5228, but out of phase with the DWS with a correlation coefficient of -0.5792. It was found that the El Niño (warm) and La Niña (cold) events play an important role in the inter-annual variation of the Kuroshio intrusion into the TWS. During the El Niño (La Niña) events, more (less) Kuroshio water intrudes into the TWS from the south. Nevertheless, the inter-annual of KII and Pacific Decadal Oscillation (PDO) index had a rare low correlation, maybe because the PDO index indicates a more long time scales of the global climate change. Additionally, World Ocean Database 2013 was used to analyze the inter-annual variation of temperature and salinity in the Penghu Channel in September during 1994 to 1999. During 1994 to 1999, the salinity of the northern Penghu Channel were lower than the southern part, while in other four years, the condition was reversed. This was mainly because in the northern part of Penghu Channel there was an upwelling would make the higher salinity than the southern part, and the Kuroshio intrusion into the Penghu Channel.

Key words: Kuroshio intrusion; Seasonal variation; Inter-annual variation; Taiwan Strait

## 第 1 章 绪 论

当北赤道流向西运动至菲律宾海岸，通常会在 $10^{\circ}15'N$ 处分叉成向北和向南两支流，向北的洋流称为黑潮(Wyrtki, 1961; Farris and Wimbush, 1996; Yaremchuk and Qu, 2004; Qiu and Chen, 2010)。当黑潮沿菲律宾东岸向台湾岛东岸运动时，其有可能通过吕宋海峡进入到南海北部和台湾海峡南部(Centurioni et al., 2004; Jia et al., 2010; Tsui and Wu, 2012)。黑潮水具有高温高盐特性，要了解黑潮对台湾海峡的水文水质影响，就需要分析黑潮入侵台湾海峡的规律。因此，黑潮入侵台湾海峡的季节和年际变化的研究是研究台湾海峡生物地球化学循环的关键问题和迫切需求。

### 1.1 研究综述

当北赤道流由东向西运动至太平洋洋盆西侧的菲律宾沿岸，其受到菲律宾海岸的阻碍，便分成两支洋流，一支向南称为棉兰老流，另一支向北称为黑潮。黑潮沿着菲律宾东岸，流经吕宋海峡、台湾岛东侧，通过台湾和与那国岛之间的水道进入东海，沿陆坡向东北方向流动。当黑潮主干汇入北太平洋洋流前，有部分进入黄海，称为黄海暖流，部分经对马海峡进入日本海，称为对马暖流。接着，黑潮主干沿日本列岛流向东北，在 $35^{\circ}N$ 附近分为两支：主干向东流至 $160^{\circ}E$ 附近，称为黑潮延续体；另一支在 $40^{\circ}N$ 附近与亲潮汇合(冯士筭等, 1999)。Tabata (1975)把黑潮、黑潮延续体以及黑潮逆流称为黑潮流系(如图 1-1)。

作为北赤道流的延续，黑潮具有北赤道流的水文特征，如高温高盐，高溶解氧，低营养盐，浮游生物不易繁殖，海水透明度大，水色高等特点。此外，黑潮又是北太平洋的一支西边界流，具有西边界流的特点：是一支沿着洋盆西边界大陆隆流动的速度快且宽度小的流；会在一些地方分叉，并继续流入开放大洋中。此外，黑潮还具有几个准稳态路径 (Tomczak and Godfrey, 2003)。



图 1-1 太平洋的流系(Schmitz, 1996)

Fig. 1-1 Currents in the Pacific Ocean (Schmitz, 1996)

### 1.1.1 黑潮入侵台湾海峡的季节变化

在早期的观点中, Nino 和 Emery (1961) 与 Nitani (1972) 认为在台湾海峡东侧, 无论是冬季还是夏季, 都有黑潮分支从台湾南端进入台湾海峡向北流去, 即黑潮入侵台湾海峡在冬夏没有存在明显的变化。Jan et al. (2002) 把早期的研究观点展示如图 1-2。

到了 20 世纪 80 年代, 许多学者通过现场观测数据发现黑潮入侵台湾海峡具有明显的季节变化: 黑潮从夏末开始入侵台湾海峡, 冬季达到顶峰, 春末黑潮入侵停止, 春末到夏末期间, 南海水取代黑潮水进入台湾海峡(Fan and Yu, 1981; Fan, 1982; Fan, 1984; Wang and Chern, 1988; Shaw, 1989)。Fan (1982) 通过 4 个航次调查数据(1977 年 10 月末、1979 年 6 月末、1981 年 8 月末和 1982 年 6 月中)分析台湾海峡南部和东部的水团性质时发现, 处于夏季的 3 个航次中都没有发现有黑

潮水存在于台湾海峡南部,而1977年10月末则发现位于澎湖水道南部的两个站位的海水具有高盐性质,Fan认为该海水应该来源于黑潮。Wang and Chern (1988)通过1985年11月到1986年4月的4个航次(1985年11月中、1985年12月末、1986年1月中和1986年4月初)水文数据和台湾海峡风场数据分析后认为在冬季或早春遭遇强冷空气后风应力突然减小,从而诱发黑潮分支进入台湾海峡。这支稳定流被观测到一直持续到春季甚至到夏季早期,即在东北季风转为西南季风之前。到了夏季,南海表层水冲入台湾海峡,黑潮分支就暂时停止进入台湾海峡(Fan and Yu, 1981; Fan, 1982)。Shaw (1989)根据1986年5月12-16日和8月10-12日的航次调查数据分析得到的台湾海峡东南部海域水团 T-S 图显示,5月澎湖水道南部有黑潮水存在,但是到了8月,5月存在的黑潮水被南海水取代。

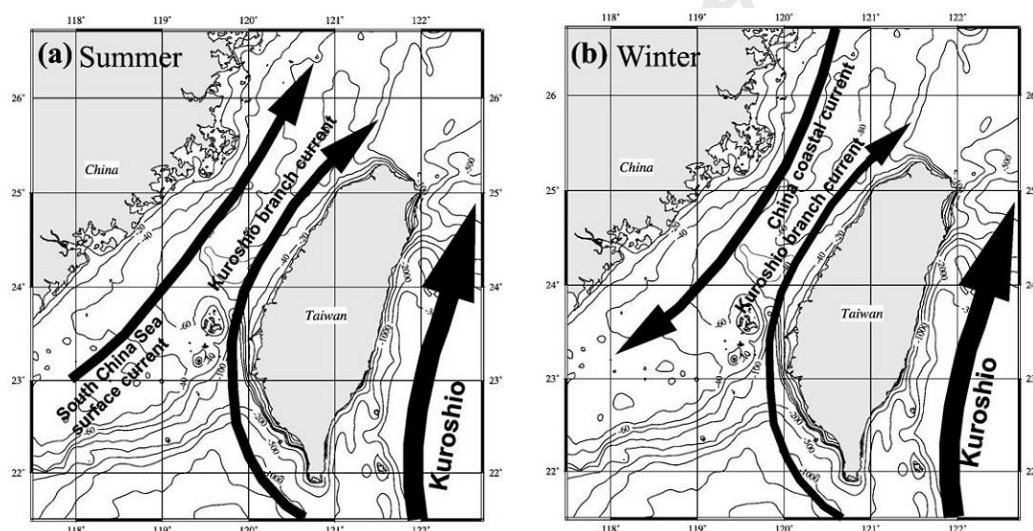


图 1-2 台湾海峡流场的早期观点((a)为夏季, (b)为冬季, 取自 Jan(2002))

Fig. 1-2 Early views of the Taiwan Strait circulation ((a) summer, (b) winter, from Jan2002))

近20年来,随着科技的发展,现场观测结合卫星遥感、数值模型等手段在研究黑潮入侵台湾海峡中被广泛使用。Jan等人对黑潮入侵台湾海峡的季节变化做了大量的工作。Jan et al. (2002)分析了30个航次的温盐深仪(Conductivity Temperature Depth, CTD)数据(1985-1992)并总结得到图1-3。冬季(11-3月)台湾海峡东南部有高温( $>24^{\circ}\text{C}$ )高盐( $>34$  psu)水团被限制在澎湖水道里,这个水团就是黑潮分支水;春季(4-5月),随着东北季风的减弱,被阻碍在澎湖水道的黑潮分

支水穿过云彰隆起向北流去,最后,黑潮分支水侵占了整个海峡东部,而西部则是中国沿岸流;到了夏季(6-8月),东北季风转为西南季风,澎湖水道里的黑潮分支水被南海水取代;秋季(9-10月)与夏季类似,南海水取代黑潮水进入台湾海峡。而后,Jan et al. (2006)根据CTD数据(1985-2003)和声学多普勒流速剖面仪(ADCP)数据(1999-2001),结合聚类分析法和T-S图分析法进一步分析了黑潮分支表层水和次表层水在台湾海峡分布的季节变化。结果表明在海峡东南部100-200 m,终年存在着黑潮分支次表层水,而200 m以下则主要被南海水占据。而在海峡表层水中,10月,随着风向开始转变为东北,黑潮水从海峡东南部开始进入台湾海峡,直到次年2月,基本都被限制在澎湖水道;3-5月,黑潮水一直北上,直到东海;6-9月,南海水取代黑潮水进入台湾海峡。随后,Jan et al. (2010)又通过duo-grid Pacific Ocean model模型对黑潮入侵台湾海峡的季节变化进行研究发现:夏季几乎没有黑潮水通过吕宋海峡进入台湾海峡;冬季,黑潮很少从吕宋海峡直接进入台湾海峡,而是以流套的形式进入南海,在黑潮返回黑潮主轴前有一黑潮分支进入台湾海峡。

许多学者从生物化学方面也得到相似的结果(Chung et al., 2001; Hsieh et al., 2004; Lan et al., 2004; Dur et al., 2007; Lan et al., 2009)。Chung et al. (2001)通过1999年5月(23-25日)和8月(13-14日)两个航次的数据,对台湾海峡中部断面进行氮、磷、硅含量的测量,发现这两次航次的营养盐都是主要来自台湾海峡澎湖水道的北向流,且分别来自黑潮分支水和南海水,由此可见,黑潮在这两个时间段是否入侵台湾海峡是有差异的。Hsieh et al. (2004)通过2000年3月20-25日的航次数据,以桡族动物多样性和组成为指标,认为在当时有黑潮分支从台湾海峡南部进入到中部甚至北部。Lan et al. (2004)分析了2001年5月台湾海峡北部的桡族动物分布后,把桡足类分成3组,分别是与黑潮分支有关,与中国沿岸水有关和与台湾淡水河有关。该文章显示黑潮分支水广泛影响着桡足类在台湾海峡北部的分布,Lan et al.认为是由于春季,东北季风减弱导致黑潮进入台湾海峡北部。Lan et al. (2009)通过2002年1月4-5日的航次及NOAA的卫星AVHRR的海表温度数据,结合水团分析和桡足类分类分析,将研究区域的桡足类分成3类:黑潮分支组,混合组和中国沿岸水组,认为2002年1月4-5日,



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.

廈門大學博碩士論文摘要庫