


# 海洋科学前沿 (一)

Frontiers of Marine Science Sinica

首届海洋女科学家论坛论文集

中国海洋学会 编

 海洋出版社

# 海洋科学前沿 (一)

首届海洋女科学家论坛论文集

中国海洋学会 编

海洋出版社

2012年10月·北京

**图书在版编目 (CIP) 数据**

海洋科学前沿. 1, 首届海洋女科学家论坛论文集/中国海洋学会编. —北京: 海洋出版社, 2012. 10  
ISBN 978-7-5027-8417-1

I. ①海… II. ①中… III. ①海洋学-文集 IV. ①P7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 241017 号

责任编辑: 高 英 李宝华

责任印制: 赵麟苏

**海洋出版社 出版发行**

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京旺都印务有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷

开本: 880 mm × 1230 mm 1/16 印张: 29

字数: 835 千字 定价: 168.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

# 海洋科学前沿 (一)

## 首届海洋女科学家论坛论文集

编委会主任：雷 波

编委会副主任：李琳梅

编委：雷 波 李琳梅 张 滨 魏 宁 高 英

# 目 次

|  |  |
|--|--|
| 太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对区域气候的影响 .....           | 刘秦玉, 谢尚平, 郑小童(1)   |
| 春季一次黄海、东海层云 - 海雾过程的研究 .....              | 张苏平, 刘飞, 孔扬(11)  |
| 东印度洋季节内振荡信号的年际调整及其机制 .....               | 王国建, 孟祥凤(26)   |
| 北太平洋副热带流涡强度对长江中下游夏季降水的影响 .....           | 金啟华, 王辉, 姜华(35)  |
| ENSO 非对称及其机制初步研究 .....                   | 董宇佳, 孟祥凤, 张磊(42)   |
| 热带印度洋海表温动力统计预测模型及其应用 .....               | 王力维, 郑飞, 朱江, 翟宇梅(51)   |
| 海洋地球物理在国家安全领域的应用 .....                   | 刘光鼎, 陈洁(57)  |
| 台风 SAR 遥感研究 .....                        | 潘玉方, 杨劲松(67)   |
| 北太平洋副热带和副极地流涡强度和位置指数的建立 .....            | 姜华, 金啟华, 王辉, 黄瑞新(75)   |
| 试论中国海的地球物理监控 .....                       | 刘光鼎, 陈洁(86)  |
| 一次东风波引起的特大暴雨天气过程分析 .....                 | 夏秋萍, 张滨(96)  |
| 珠江口海域气溶胶中金属浓度及入海通量分析 .....               | 王欣睿, 刘梦南, 董燕红(102)   |
| 原油中双环倍半萜指纹的内标法分析 .....                   | 杨佰娟, 郑立, 张魁英, 陈军辉, 王小如(108)  |
| 喹啉为单一燃料对填料型 MFC 产电特性的影响研究 .....          | 张翠萍, 谢健, 贾后磊, 刘广立(114)   |
| 基于多元统计法研究渤海湾水质时空变化特征 .....               | 赵海萍(122)   |
| 海水利用排放水中氯化副产物环境安全性评价 .....               | 刘静, 王意, 曾兴宇, 刘小骐, 潘献辉(129)   |
| 基于博弈论的海洋环境风险的生态补偿机制 .....                | 张继伟(134)   |
| 大亚湾沉积物与生物体中重金属含量及其评价 .....               | 吴玲玲(141)   |
| 二氧化碳海底地质封存研究与建议 .....                    | 张永华, 霍传林, 李官保, 张振东, 杨正先(149)                                       |
| 岬湾海岸的沙坝 - 潜堤 - 岬头养滩模式研究——以北戴河西海滩为例 ..... | 匡翠萍, 潘毅, 贺露露, 张宇, 冒小丹, 杨燕雄, 张甲波, 邱若峰(154)                          |
| 台湾龟山岛热液原位观测数据及其小波分析 .....                | 韩沉花, 潘依雯, 秦华伟, 陈鹰, 叶瑛(165)   |
| 长江口 - 杭州湾及其邻近海域沉积动力环境及有机碳分布特征 .....      | 章伟艳, 金海燕, 张霄宇, 冯旭文, 于晓果, 姚旭莹, 高为利, 张富元, 高爱根(172)                   |
| 珠江磨刀门河口沉积物中主要离子含量及其分布 .....              | 杨蕾, 谢健, 贾后磊(183)   |
| 桐花树根系分泌物对微藻化感影响比较研究 .....                | 刘玉, 李飞, 黄齐欣(191)   |
| 对虾免疫反应的抗病毒功能比较 .....                     | 王蔚(199)  |
| 南海海洋经济动物功能基因组的创新性研究与开发 .....             | 白洁, 游欣欣, 杨成业, 彭超, 刘姗姗, 黄萌理, 穆茜, 陆君, 陈洁明, 王吉, 范明君, 阮志强, 孙颖, 石琼(205) |
| 壳寡糖绿色海水缓蚀剂的合成与防腐性能研究 .....               | 李伟华(212)   |
| 浙江沿岸养殖贝类中贝类毒素的调查研究 .....                 | 朱敬萍, 周文滨, 顾蓓乔, 郭远明, 梅光明, 薛彬, 陈瑜(223)                               |
| 渤海湾近岸海域生态水动力学模拟研究 .....                  | 李清雪(230)   |



- 基于 CCA 的西门岛海域浮游动物类群划分及环境指示研究 ..... 杜萍,徐晓群,刘晶晶,曾江宁,陈全震(238)
- 苏北滩涂生态系统服务功能遥感监测研究 ..... 贾艳红,陈丽,曹倩(250)
- 风向传感器校准与不确定度评定的研究 ..... 黄晓青(256)
- 海岛可再生能源发电系统总体设计 ..... 张中华,夏增艳,王海峰,黄勇(261)
- 海洋数字出版服务平台建设初探 ..... 苏勤(267)
- 基于统计过程控制技术的 XBT 故障概率控制研究 ..... 方芳,张鹏(271)
- 控制船舶水下噪声污染方法初探 ..... 李颖,冯海洋,董华,戚浩然,刘丙新,王菊英(279)
- 临空飞行器在海洋预报保障中的应用研究 ..... 印敏,冯径,唐尧(285)
- 新型太阳能海水淡化系统加热器的模拟 ..... 徐舒,凌祥,彭浩(291)
- 一种基于 AdHoc 技术的海洋浮标组网方案 ..... 冯径,沈晔,印敏(298)
- 珠江口海域营养盐比及与浮游植物的关系 ..... 董燕红,蔡建东,钱宏林(303)
- 我国海水淡化技术及应用 ..... 王琪,谭永文(312)
- 海域资源市场化配置问题与对策研究 ..... 杨林,黄勇(319)
- 我国海洋保护区发展成就与面临的形势 ..... 杨新梅(327)
- 海洋学术期刊在我国海洋科学发展中的作用 ..... 高英,于秋涛,李婧,李宝华,安森(333)
- 澳大利亚海水淡化现状以及对我国的借鉴 ..... 王静,刘淑静,邢淑颖,徐显(337)
- 海岸带综合管理中的政府职能分析 ..... 苏萌,马文瑞,董秀娇(342)
- 海岛型城市规划环评重点探讨——以平潭综合实验区总体规划环评为例 ..... 欧阳玉蓉,吴耀建,姜尚,傅世锋,郭晓峰(351)
- 中国沿海地区经济增长差距与劳动结构效应——一个基于指数分解的实证研究 ..... 郑慧,赵昕(355)
- 基于差分指数平滑模型的我国海洋生物制药产业发展预测及路径探讨 ..... 张小凡,温政实(363)
- 从“3S”到“3N”:海岛旅游开发思路转变的初讨 ..... 耿立佳(371)
- 论长三角海域生态合作治理:实现形式与治理绩效 ..... 陈莉莉(377)
- 基于替代市场法和条件价值法的潮汐电站环境收益评估 ..... 李京梅,孙晨(382)
- 海洋生态文明示范区的构建内涵研究——以大亚湾临海产业园区为例 ..... 黄华梅,谢健,王平,林丽华,罗艳(391)
- 广东省海洋倾倒区现状、问题与管理对策 ..... 何桂芳,袁国明,石萍,邱弋兵(397)
- 广东首批可开发无居民海岛开发与保护对策措施 ..... 谢素美,杨黎静,谢健(403)
- 浅谈财政政策引导广东建设海洋经济强省 ..... 杨黎静,谢素美,曹艳,赵明利(408)
- 浙江省海洋经济产业结构的历史演进与转型优化 ..... 唐立梅,王河森(416)
- 浙江省海洋经济可持续发展的法律保障机制思考 ..... 付翠莲(422)
- 江苏沿海地区高等教育服务沿海开发的调查与思考 ..... 周桂芹(427)
- 推进“五联动”,加快河北沿海发展 ..... 李文荣(432)
- 河北省海洋科技发展探析 ..... 王艳霞,徐全洪,顾建清,牛彦斌,田海兰,刘西汉(436)
- 海洋的军事意义与国家海洋安全 ..... 张炜(440)
- 改革开放以来中国海洋科技政策演变 ..... 乔俊果,王桂青,孟凡涛(446)
- 对实施陆海统筹的认识和思考 ..... 王芳(453)

# 太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对区域气候的影响

刘秦玉<sup>1</sup>, 谢尚平<sup>1,2</sup>, 郑小童<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 物理海洋实验室, 海洋 - 大气相互作用与气候山东省重点实验室, 山东 青岛 266100;  
2. Scripps 海洋研究所, 加州大学圣地亚哥分校 美国)

**摘要:** 介绍了全球变化研究国家重大科学研究计划 2012 年启动的一个题为“太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对气候变化的调控作用”项目。该项目紧紧围绕“在全球变暖背景下海洋环流变异将导致热量输运变异, 形成海温及降水响应空间分布不均匀性并导致海洋 - 大气耦合模态的变异, 调节并控制东亚及全球气候变化及其可预测性”这一思路开展研究; 该项目将改善有关全球变化中海洋作用及其对海洋大气反馈过程影响的认识, 加强中国在解决与气候变化有关的关键科学问题中所作的贡献, 并在中国组建一支在该领域活跃在国际舞台上的研究团队。

**关键词:** 全球变暖; 海洋响应; 海表温度; 空间非均匀性; 海洋 - 大气耦合模态

## 1 引言

海洋动力学在气候变化中的作用是目前全球变化研究中的前沿科学问题。海洋和大气处于不断运动和相互作用, 决定了气候在空间和时间上的巨大变化。预测气候的自然变化和对人类活动的响应是目前各国政府和科学家面临的重要任务。在首席科学家, 国家千人计划学者谢尚平教授的带领中国海洋大学牵头, 联合国海洋局第一海洋研究所, 中国科学院大气物理研究所, 国家海洋局第二海洋研究所, 中国科学院南海海洋研究所, 南京信息工程大学等单位的科学家, 申请了全球变化研究国家重大科学研究计划“太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对气候变化的调控作用”项目, 已获批准并于 2012 年初启动。该项目面向国家制定应对气候变化宏观政策的需求, 重点解决“海洋对全球变暖的响应及其对全球气候的影响和调控作用”这一前沿科学问题, 瞄准热带太平洋、热带印度洋和副热带西北太平洋这 3 个对中国气候有重要影响的海域 (简称“太平洋印度洋”), 揭示全球变暖导致的海洋动力、热力过程变异的机理, 评估未来气候的可预测性, 为国家应对气候变化宏观决策的制定提供科学依据。项目中的“太平洋印度洋”是副热带西北太平洋、热带太平洋和热带印度洋的简称。

该项目紧紧围绕“在全球变暖背景下海洋环流变异将导致热量输运变异, 形成海温及降水响应空间分布不均匀性并导致海洋 - 大气耦合模态的变异, 调节并控制东亚及全球气候变化及其可预测性”这一新思路, 重点解决以下 3 个关键科学问题: (1) 全球变暖如何影响太平洋印度洋海域海洋环流及其热输送; (2) 海洋环流及其热输送变化如何通过海 - 气耦合过程导致海洋气候对全球变暖响应的空间非均匀性; (3) 在全球变暖背景下海洋气候变异的非均匀性如何影响东亚气候变化。

围绕上述三个关键科学问题, 该项目拟展开的主要研究内容包括 (1) 全球变暖背景下决定太平洋印度洋海洋环流及其热输送变异的关键物理机制; (2) 全球变暖背景下决定太平洋印度洋海洋气候响应空

**基金项目:** 国家重大科学研究计划项目 (2012CB955600)。

**作者简介:** 刘秦玉 (1946—), 女, 河南省延津县人, 教授, 硕士, 博士生导师, 从事海洋 - 大气相互作用方向研究。E-mail: liuqy@ouc.edu.cn

间非均匀性的关键海洋-大气相互作用过程；（3）太平洋印度洋海洋气候响应空间非均匀性对该海域海-气耦合模态的调节作用；（4）全球变暖背景下太平洋印度洋海洋响应的空间非均匀性对未来全球气候，特别是东亚气候变化的调节和控制作用。针对上述研究内容，该项目将分为有机联系的4个研究课题：（1）热带太平洋印度洋海洋环流及其热输送对全球变暖的响应；（2）黑潮-黑潮延伸体-副热带逆流系统变异机理及其对全球变暖的响应；（3）全球变暖对太平洋印度洋海洋-大气耦合模态变异的调节过程及机理；（4）太平洋印度洋对全球变暖响应不均匀性对东亚气候的影响。

通过上述研究，拟构建海洋气候对全球变暖响应空间分布非均匀性的动力学理论框架，拓展全球变暖背景下热带及中纬度海洋-大气相互作用理论，揭示全球变暖背景下太平洋印度洋海区影响东亚气候的关键过程及机理，提高对未来东亚气候变化的预估水平。在此基础上，提升对海洋对全球变暖响应与气候反馈过程和机理的认识水平，加强我国在海洋与全球变化这一关键科学问题的话语权，服务应对气候变化这一国家重大战略需求。

本文将详细介绍该项目的立项意义，有关研究的国内外进展。在此基础上阐明该项目拟解决的关键科学问题和研究内容，最后介绍了该项目预期的成果。

## 2 立项意义

### 2.1 国家需求

#### 2.1.1 为国家制定应对气候变化政策提供重要依据

以全球变暖为主要特征的全球气候环境变化问题日益突出，成为人类可持续发展最严峻的挑战之一。现有研究表明，全球变暖已经对中国产生了一定的影响，造成了沿海海平面上升、西北冰川面积减少、春季物候期提前，极端天气事件频繁出现等后果，而且未来将继续对中国自然生态系统和经济社会发展产生重要影响。目前对于全球变暖问题，世界上许多研究都着眼于全球平均温度的升高，即以全球平均温度为标尺来衡量全球变暖的程度。这种量化方法对于公众来说非常易于理解，但为了制定应对策略，各国政府还需要掌握区域气候响应特征。从这个意义上来说，认识和理解影响中国经济可持续发展的区域气候变化特征应当成为我国政府制定应对气候变化战略决策的重要依据。

海洋是气候系统的一个重要组成部分，由于海洋的热容量远大于大气，地球对太阳辐射的吸收以及与大气的热量交换主要由海洋决定，因此海洋对热量的储存在很大程度上控制了全球变暖的速度。气候模式的模拟结果表明，在大气二氧化碳浓度加倍的情景下，包含与不包含海洋动力过程的两种情景在百年尺度上全球平均气温的增幅相差可高达 $1^{\circ}\text{C}$ 。此外，海洋的热量输送是决定全球变化区域差异的重要机制。近50年来，热带海区特别是印度洋海表温度（SST）持续上升，而副热带西北太平洋有的海域增暖幅度较小，有的海域甚至变冷，海表温度这种空间分布的不均匀性会直接影响我国气候和全球气候变化。由于海洋的改变而导致的区域气候空间分布差异是我国政府制定应对气候变化政策的重要依据；回答在目前温室气体排放水平下，海洋如何减缓全球气温的上升以及如何造成区域气候的空间差异，不仅是全球变化研究中的重要科学问题，也是政府制定经济发展规划和开展气候外交中必须要考虑的重大问题。

因此，开展海洋，特别是对我国气候有重要影响的热带太平洋、热带印度洋和副热带西北太平洋海区对全球气候变化影响的研究，解决海洋在全球气候变化中的调控作用这一热点问题，将为国家制定应对气候变化政策提供重要依据，同时增强我国在全球气候变化研究中的国际话语权。

#### 2.1.2 提高我国中长期气候预测水平，对防灾减灾做出贡献

我国地处东亚季风区，属于典型的季风性气候，是全球气候系统的重要组成部分，影响着全球三分之二的人口和包括我国在内的多个亚洲国家的社会、经济和民生。随着全球气候变暖，东亚季风异常引起我国东部地区频繁出现流域性洪涝、大范围干旱等气候灾害，经济损失严重。近年来的典型天气和气候灾害事件直接影响粮食安全、水资源和人民生命财产，而海温异常正是造成这些天气、气候灾害的主要原因



之一。

相对大气的变化来说，海洋的调整过程要慢得多，因此具有较长期的“记忆”功能。海洋通过与大气的相互作用，抑制并削弱气候系统中高频变异信号，凸显气候系统的低频变异信号，从而决定了气候系统自然变化的时间尺度。目前对全球变暖背景下海洋如何响应，该响应又如何影响我国区域气候的变化并不清楚；最近几十年我国出现的大范围干旱现象是气候年代际自然变化的结果，还是温室气体增加导致的全球变暖的效应，是否与海洋的变化有关，目前也没有清楚的认识，这极大地限制了我们对降水事件发生规律的认识和预测能力，直接影响了国家经济社会可持续发展目标的实现。

因此，开展全球变暖背景下海洋变化如何通过海洋-大气相互作用影响天气和气候的研究，对国家南水北调等重大决策的制定具有重要的科学和现实意义，也为国民经济建设、防灾减灾提供科学支撑。

## 2.2 科学意义

该项目将瞄准热带太平洋、热带印度洋和副热带西北太平洋这3个对中国气候有重要影响的海域，有针对性地开展海洋对全球变暖的响应及其对气候的调控作用研究，具有以下科学意义：

### 2.2.1 海洋动力、热力过程在全球变暖区域响应中所起作用国际前沿科学问题之一

海洋对于气候变化十分重要。研究表明随着大气中温室气体的增加，全球平均温度会随之上升。气候系统的热惯性主要由海洋决定，海洋对热量的吸收能力和对大气的加热过程决定了全球变暖的速度。目前数值模式研究结果指出：陆地表面气温的升高主要是由海表温度增暖所导致而不是温室气体直接强迫的结果。

数值模拟结果和古气候研究结果都表明，无论地球气候处在暖期还是在冷期，全球海温变异都表现出空间分布不均匀的特征。气候变暖后，全球平均降雨将会增加，但呈现出巨大的区域差异。研究表明海洋增温的不均匀性是造成这种差异的重要原因（见图1）。温室气体增加造成海洋层结和风应力等海面通量的变化，必将改变海洋环流及其热输送，导致海洋增温空间分布的不均匀。该不均匀性将导致降雨、气压以及大气环流的变化，进而引起海洋动力、热力过程新的调整，进一步强化海温对全球变暖响应的不均匀性，导致海洋气候区域响应的不同。因此，海洋动力、热力过程在全球变暖区域响应中所起作用国际前沿科学问题之一。

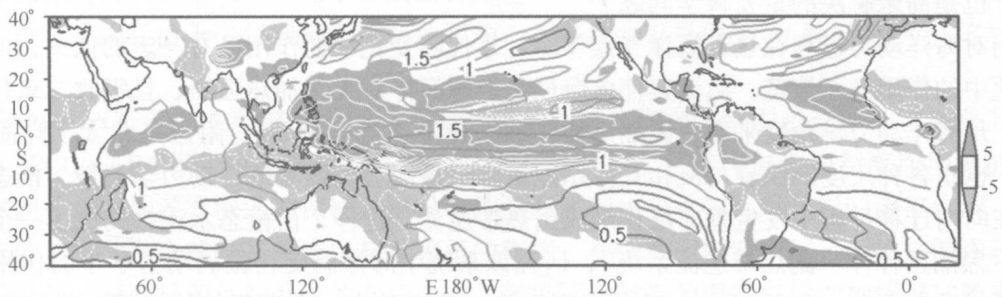


图1 气候模式对全球变暖的模拟结果：2050年与2000年间的海表温度（℃；彩色等值线）和降雨变化（mm/month；阴影）。海面增温大的海域降水增加（绿色阴影），增温小的地方降水会减少（灰色）<sup>[1]</sup>

### 2.2.2 全球变暖背景下海洋-大气耦合模态如何变化是气候预测面临的新挑战

“气候变率及可预测性”（CLIVAR）国际研究计划的主要成果之一是确定了全球气候年际与年代际变率的主要海洋-大气耦合模态和气候的可预测性。热带太平洋、热带印度洋和副热带西北太平洋海域的海洋-大气耦合模态[包括厄尔尼诺-南方涛动（ENSO），印度洋海盆一致模态（IOB）和偶极子模态（IOD），以及太平洋年代际振荡（PDO）等]是目前我国气候预测的主要依据；西北太平洋的黑潮、黑潮延伸体和副热带逆流构成的海洋动力学系统也在气候变化和我国近海海洋环境演变中扮演重要角色。尽管

科学家对全球变暖背景下 ENSO 的变化做了一些评估工作,但是各个模式中 ENSO 对全球变暖的响应并不一致,振幅和周期都有相当的差异(图2)。因此,太平洋印度洋海域的海洋-大气耦合模态是否在全球变暖的未来还存在,其特征及“遥相关”效应是否会发生变化,是否会对未来的气候发挥调节和控制作用,是否会影响气候的可预测性是海洋-大气相互作用研究领域面临的新挑战。为此,“联合国政府间气候变化专业委员会”(IPCC)第五次报告中特别设立专门章节评估这一重要的科学问题。

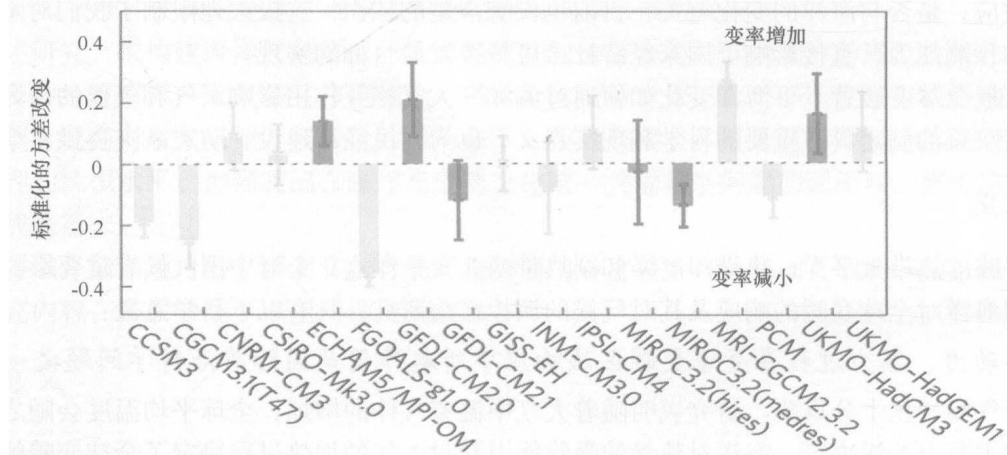


图2 第3次耦合模式比较研究计划(CMIP3)模式群中 ENSO 强度对全球变暖的响应<sup>[2]</sup>

### 2.2.3 太平洋印度洋海洋环流系统对全球增暖响应的理论体系亟需建立

在温室气体增加全球变暖背景下,上层海洋首先被加热,从而改变海洋的层结、加强温跃层的层化效应;同时,大气层结的变化改变了大气环流,进而引起海洋环流的调整。目前,已有的研究指出全球变暖导致大气 Walker 环流减弱,赤道太平洋温跃层变平、变强;赤道印度洋东部温跃层变浅。但是,由于观测资料的缺乏,我们并不能完全确定这些现象究竟是海洋年代际变化的表现,还是对全球变暖的响应。另外,联系热带太平洋与副热带太平洋的海洋浅层经向翻转环流(STC)在全球变暖背景下如何变化,是加强还是减弱,也是尚未解决的重要科学问题。

目前人们对海洋动力过程在热带海洋气候年际、年代际变化中的作用已有一定的认识,但其中纬度海洋气候变化中的作用尚不清楚。黑潮延伸体海域是全球海洋对大气加热强烈、且吸收二氧化碳气体最多的海域之一。从海洋动力学角度来看,黑潮延伸体和副热带逆流(STCC)附近是北太平洋海面高度变化最大的海域,也是各种尺度的涡旋与流相互作用能量串级最明显的强非线性动力学海域。模态水在黑潮延伸体形成,在向南迁移过程中发生垂向堆积形成副热带逆流。这样,由模态水连接构成了一个复杂的强非线性“黑潮-黑潮延伸体-副热带逆流系统”,研究该系统中海洋涡旋在位涡动力学中的作用是目前国际物理海洋学新的发展方向。在 IPCC-AR4 的温室气体加倍实验中,黑潮延伸体海域 SST 的增暖远大于北太平洋其它海域,而各个模式对上述响应的模拟差异很大(图3),直接影响了气候模式的模拟能力和预测水平。迄今为止,我们对黑潮延伸体等海洋环流在全球变暖背景下如何变化尚不清楚,有关理论急需建立。

因此,研究海洋环流对全球变暖的响应及其形成机制不仅是海洋动力学面临的亟待解决新科学问题,也是提高气候模式能力的一个可能突破口。

总而言之,全球变暖为海洋动力学、海洋-大气相互作用研究提出了新的科学问题,也带来了新的发展机遇。从全球视野出发,依据历史资料,立足对海洋动力、热力过程和海洋-大气耦合过程在现代气候变化中作用的理解,利用气候模式模拟,预估海洋动力、热力过程以及海洋-大气主要耦合模态在未来气候变迁中的作用,实现 CLIVAR 和 IPCC 两个研究计划之间的有机结合,从而揭示海洋环流对全球变暖的响应和对东亚气候的影响机制,对海洋动力学和气候动力学的发展、提高对未来东亚气候预测能力都有重

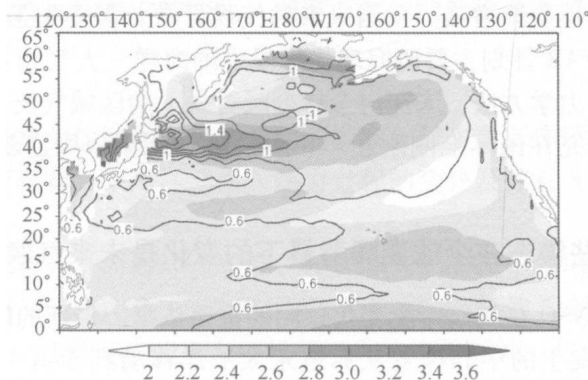


图3 2009年与2000年间的海面温度变化。阴影和黑色等值线分别代表参加CMIP3的24个模式的集合平均温度异常(°C)和模式之间的标准方差(°C)

要的科学意义。

### 3 国内外最新研究进展

海洋在气候变化中的作用一直以来是气候研究的重点。鉴于海洋在地球气候系统中的重要地位，在全球变化研究中，海洋的变化及其气候效应也倍受关注。下面就有关海洋对气候变化影响研究的国内外最新进展进行论述，以阐明并提出有待进一步深入研究的重大科学问题。

#### 3.1 海洋动力、热力过程对全球变暖的响应及其对气候系统的影响是国际全球变化研究新提出的焦点问题

海洋在气候年际、年代际变化中的作用是国际大型研究计划 CLIVAR 的重要研究内容。研究表明：热带海洋动力过程和海洋-大气相互作用过程决定了全球气候年际变化的主要模态（如热带太平洋 ENSO、热带印度洋的 IOB 和 IOD），而热带与副热带之间的海洋通道则是决定气候年代际变化（如 PDO）的重要环节，热盐环流在气候的多年代际变化中扮演重要角色。年际和年代际变化及其可预测性，是 CLIVAR 计划取得的重要研究成果。由于受仪器观测资料的制约，大多数研究局限于 20 世纪 50 年代之后的年际、年代际变化。

人们所熟知的 IPCC 计划主要定位于研究人类活动对气候的影响，特别是全球平均气温上升这一特定问题。尽管在 IPCC-AR4 报告中也描述了海洋的变化，并讨论了海洋深层水抑制海面增温的效应；但对海洋增温的空间非均匀性没有深入的探讨，更没有涉及海洋变化非均匀性对气候的调控作用。

海洋环流的热输送在全球气候系统中起着重要的作用。在全球变暖背景下，无论是海洋环流的变化还是海洋层结的变化，都会导致气候系统的变化。在气候模式中所做的温室气体增加情景试验表明：未来海表温度和海上降水的变化在空间上呈现出极大的不均匀性，前者与海洋动力过程有直接的联系，并决定降水的变化<sup>[1]</sup>；SST 增温在赤道太平洋和黑潮延伸体区达到了极大值<sup>[3]</sup>，而在副热带逆流海区则呈现出向东北倾斜的条状结构，表明海洋动力过程的重要性<sup>[1,4]</sup>；热带气旋在海洋上的发展和加强主要取决于 SST 增暖分布的不均匀性<sup>[5]</sup>；SST 增暖的空间分布非均匀性会影响大气层顶的全球平均辐射平衡以及气候反馈效应<sup>[6]</sup>。大气环流模式（AGCM）对 20 世纪全球气候变化的模拟也表明，海洋增温不均匀性是造成降水和大气环流变化的主要原因<sup>[7]</sup>；近 50 年降水变化是由 SST 增暖分布的不均匀性所引起的<sup>[8]</sup>。上述有限研究是海洋动力、热力过程对全球变暖的响应及其对气候系统影响研究的有益探索，为研究海洋在全球变暖区域气候响应非均匀性中的作用开辟了新的途径。

由于 CLIVAR 和 IPCC 这两个国际研究计划关注的焦点问题和研究方法不同，从事这些研究的科学家在过去分为两个不同的研究团体。随着全球变暖的信号加强，现在观测到的气候异常中除了自然变率外，

全球变暖导致的气候变化信号也逐渐增强。预测未来的气候异常, 需要加强 CLIVAR 和 IPCC 这两个研究团体之间的交流与合作。CLIVAR 计划主要研究现代气候中的海洋-大气相互作用, 利用 CLIVAR 计划执行过程中形成的海-气耦合动力学方法, 来探讨全球变暖背景下的区域气候分布型问题, 将为该项目的研究带来新的契机; 这方面的研究在国际上刚刚起步, 有发现新现象、构建新机制, 取得创新成果的广阔空间。

### 3.2 进一步理解和预测这些模态在全球变暖背景下的变化是未来气候预测所面临的挑战

众所周知, 热带太平洋 ENSO 是气候年际变化预测的重要依据。最新的研究成果表明: 随着全球变暖的加剧, 更多的 El Niño 事件发生的中心位置从赤道东太平洋移动到赤道中部太平洋<sup>[9]</sup>。全球变暖背景下, 热带太平洋温跃层温度梯度的增加将会加强 ENSO 的振幅<sup>[10]</sup>, 但 ENSO 的强度和频率在未来如何变化依然没有定论<sup>[2]</sup>。在热带印度洋, 海洋气候平均态的变化将会影响 SST 年际变化的主要模态 (IOB/IOD)。Abram 等<sup>[11]</sup>根据过去 150 年珊瑚反演资料, 发现 IOD 模态有明显的增强趋势, 他们认为这反映了该模态对全球变暖的响应; 但在气候模式中, 全球变暖背景下热带印度洋 IOD 模态强度变化并不大<sup>[12]</sup>。对于 IOB 模态, 在过去 60 年中尤其是 20 世纪 70 年代的气候突变之后, 出现了明显的增强<sup>[13]</sup>, 但这种增强现象是低频的自然变化还是对全球变暖的响应, 目前还不清楚。在有些模式中, IOB 模态及其“电容器”效应在全球变暖下有增强的趋势<sup>[14]</sup>。相比 ENSO, PDO 模态对全球变暖响应的研究则比较少。通过国际合作我们研究了太平洋副热带模态水对全球变暖的响应<sup>[15]</sup>, 以及对北太平洋年代际变率的影响<sup>[16]</sup>。

总之, 海洋对全球变暖的响应导致了海洋-大气耦合模态发生变化, 从而影响对未来年际、年代际气候变化的预测。目前国际上已经开始关注在气候年际、年代际变化预测中发挥重要作用的海洋-大气耦合模态如何随着全球变暖而改变这一新兴科学问题。

### 3.3 海洋经向环流及其热输送对全球变暖响应的研究刚刚起步

太平洋热带与副热带之间的海洋经向热输送是维持热带温跃层的关键机制, 在太平洋气候年代际变化中起着重要的负反馈作用。黑潮延伸体向大气释放大量的热量, 热量释放导致海面冷却、在冬季形成深混合层。由此形成的低位涡副热带“模态水”, 通过“潜沉”过程将大气异常信号储存在温跃层中。模态水的缓慢向南迁移和相关的热量输送会导致热带海温的变化。模态水在向南移动中的垂向堆积, 是形成副热带逆流的重要动力机制。另外, 多卫星的综合观测指出黑潮及其延伸体以及副热带逆流急流区的 SST 锋面会对大气产生重要的影响。有迹象表明这种影响不仅仅局限于大气边界层, 而且能扩展到对流层, 并能通过大气 Rossby 波将海洋的热力强迫作用传播到其他区域。东海和日本东部的冬季风暴路径和夏季梅雨雨带都受到这种 SST 锋面的影响<sup>[17-18]</sup>。近年来国际上对黑潮延伸体展开了大型的现场观测, 主要有美国的“黑潮延伸体系统研究”计划 (KESS, 2003-08) 和日本的 Hot Spot 计划 (2010-15)。美国自 2004 年以来在北大西洋开展了分为两期的“模态水动力学实验” (CLIMODE; 其第二期现在研), 然而在北太平洋尚未开展类似的针对模态水动力过程的研究计划。

以上研究计划主要针对现代气候变异。在全球变暖背景下, 上述物理过程是否会发生变化, 该变化是否会影响太平洋年际、年代际模态, 目前尚无定论。IPCC AR4 的全球气候模式对未来各种情景下的气候预测显示, SST 增温在黑潮延伸体海区达到太平洋的极大值, 这与末冰期全球海温变冷时黑潮延伸体海区 SST 降温幅度最大的现象一致<sup>[19]</sup>。最近的研究表明: 在全球变暖的模拟中, 由于海洋层结增强, 北太平洋副热带模态水的低位涡特征减弱<sup>[15]</sup>; 在黑潮延伸体以南的海表温度异常出现向西南延伸的条状结构, 这与模态水及副热带逆流的减弱有关<sup>[4]</sup>。但各个模式对黑潮延伸体海区 SST 变化的模拟的差异很大 (图 3), 对历史情景的再现能力也有限, 这说明人们对“黑潮-黑潮延伸体-副热带逆流系统”中物理过程的理解还不够深入, 模式对低位涡模态水的模拟还需要进一步改善。

目前的气候模式在副热带西北太平洋海域的模拟误差不仅严重影响了气候年代际变化的预测, 也成为解决如何依据根据有限的器测资料区分温室气体效应和自然的年代际变化这一问题的一大障碍。因此, 当

前亟需开展副热带西北太平洋位涡动力学研究，确定海洋经向环流及其热输送对全球变暖的响应。

### 3.4 国内研究现状和水平

我国科学家和政府一直非常关注海洋对气候变化的影响，但多数工作还集中在海洋对年际、年代际气候变化的影响上，有关全球变暖背景下海洋动力、热力过程的变异及其对气候的调节和控制作用的研究刚刚开始。

最近几年，我国开展了一系列针对海洋在年际、年代际气候变化中作用的科研项目，例如：科技部重大基础研究发展计划（973 计划）项目“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论的研究”（G1998040900，1999 - 2004），已经完成的 973 项目“亚印太交汇区海 - 气相互作用及其对我国短期气候的影响”（2006CB403600，2006 - 2010），正在执行的 973 项目“北太平洋副热带环流变异及其对我国近海动力环境的影响”（2007CB411800，2007 - 2011），“基于全球实时海洋观测计划（Argo）的上层海洋结构、变异及预测研究”（2007CB816000，2007 - 2011）等。这些项目的研究成果一致指出热带太平洋、热带印度洋和副热带西北太平洋海域海洋变异可以通过各种途径（大气桥和海洋桥）影响我国气候年际和年代际变化。国家海洋局海洋气候观测能力建设专项和科技部气候变化专项“南大洋 - 印度洋海气过程对东亚及全球气候变化的影响”（2010CB950300，2010 - 2014）和“亚洲区域海陆气相互作用机理及其在全球变化中的作用”（2010CB950400，2010 - 2014）等开展了有关海区的浮标和潜标观测，旨在重点提高我国短期气候预测水平。由中国科学家主导的大型国际合作海洋观测计划西北太平洋海洋环流与气候实验（NPOCE）的实施，极大地提高了我国在热带太平洋海洋环流领域的研究的能力，将为该项目的研究提供宝贵的观测资料。

在年际气候变化研究中，中国科学家早在 20 世纪 70 年代就发现冬季黑潮及其延伸体海域 SST 异常可以作为我国夏季降水的预测因子。最近的研究也指出了北太平洋以黑潮/亲潮延伸体为中心海域的冬季马蹄形海温异常将会持续影响太平洋夏季大气环流<sup>[21]</sup>。另外，通过积累观测资料，已有研究初步揭示了热带印度洋海气相互作用对于亚洲季风首先在孟加拉湾爆发的重要影响。此外，已有研究还发现了热带印度洋海盆一致（IOB）模态影响南亚和东亚夏季风的“电容器”效应<sup>[22]</sup>，特别指出在 1976/77 年之后，热带太平洋和热带印度洋海温年际变率增强，导致夏季印度洋对同期西北太平洋气候影响增强，使得副热带西北太平洋夏季气候的可预报性增强<sup>[23]</sup>。当印度洋发生年际尺度海盆增暖时，夏季中国南方气温偏高，而东北气温偏低；中国江南在 8 月份高温日数增多<sup>[24]</sup>。

在年代际气候变化研究中，中国科学家指出近几十年来，东亚夏季风减弱<sup>[25]</sup>中国南方降水偏多而北方降水减少（南涝北旱）<sup>[26]</sup>，中国夏季降水分布从三极型转变为两极型<sup>[25]</sup>，西北太平洋副热带高压偏强且西伸<sup>[27]</sup>，这些长期气候变化现象都与海洋有关<sup>[28]</sup>。热带 SST 在 50 年代后东亚夏季风减弱现象中起着重要作用<sup>[29]</sup>，热带印度洋长期增暖导致 1992/1993 年之后华南降水偏多<sup>[30]</sup>。总体而言，热带太平洋、热带印度洋和副热带西北太平洋海区 SST 异常影响东亚季风的相对重要性仍有待于进一步的研究。

综上所述，在热带太平洋、热带印度洋和副热带西北太平洋海域的年际、年代际变化对气候的影响已经积累了丰硕的成果，但这 3 个海域对全球变暖的响应目前仅有初步的探索。现有工作大多针对于单一海区或单一模态，并没有把这 3 个海区的海洋 - 大气相互作用作为一个整体进行系统研究，更未涉及在全球变暖背景下海洋对气候变化的调节和控制作用。通过该项目的实施，有望在国内组织一支从事该方向研究的学术队伍，开拓“海洋气候对全球变暖响应空间分布非均匀性动力学”这一国际科学研究新领域。

## 4 关键科学问题和主要研究内容

为了充分理解全球变暖中海洋的贡献，深入认识热带太平洋、热带印度洋和副热带西北太平洋海域海洋动力、热力过程对全球变暖的响应及其对气候变化的调节和控制作用，需要解决以下相互关联的 3 个关键科学问题：

(1) 全球变暖如何影响太平洋印度洋海域海洋环流及其热输送；

(2) 海洋环流及其热输送变化如何通过海-气耦合过程导致海洋气候对全球变暖响应的空间非均匀性;

(3) 在全球变暖背景下海洋气候变异的空间非均匀性如何影响东亚气候变化。

针对上述 3 个关键科学问题, 该项目设计了 4 个方面的研究内容:

第一: 全球变暖背景下决定太平洋印度洋海洋环流及其热输送变异的关键物理机制

第二: 全球变暖背景下决定太平洋印度洋海洋气候响应空间非均匀性的关键海洋-大气相互作用过程

第三: 太平洋印度洋海洋气候响应空间非均匀性对该海域关键海-气耦合模态的调节作用。

第四: 全球变暖背景下太平洋印度洋海洋响应的空间非均匀性对未来全球气候, 特别是东亚气候变化的调节和控制作用。

## 5 主要科学目标和成果

该项目的实施, 将通过对海洋-大气相互作用物理过程的剖析, 将气候观测资料和气候模式结果有机结合, 全面刻画从近代到未来的气候变化图像, 评估自然和人为变化的相对重要性; 提高对海洋在全球变化中所起作用的认识, 预估海洋环流以及海洋-大气耦合动力过程在未来气候变迁中的作用; 揭示未来气候的可预测性, 为国家社会经济可持续发展宏观决策的制定提供科学依据, 加强中国在全球变化关键科学问题研究中的话语权, 服务于应对气候变化这一国家重大战略需求。

通过该项目的研究, 预期将取得以下成果:

(1) 建立海洋气候对全球变暖响应空间分布非均匀性的动力学

通过该项目的实施, 定量评估海洋动力过程在决定海温和降水变化的空间分布非均匀性中的作用; 揭示海洋变化在气候基本状态近几十年及未来变化中所起的调节和控制作用; 回答与全球变暖背景下气候平均态变化有关的有争议的科学问题; 明确热带和副热带海域空间分布不均匀动力学机制上的差异, 揭示联系热带和副热带海域的经向翻转流及其热输送在其中的作用。

(2) 拓展全球变暖背景下热带及中纬度海洋-大气相互作用理论

通过对热带海洋-大气相互作用过程对全球变暖响应的物理机制研究, 预测未来全球变暖背景下热带海区气候平均态以及主要海洋-大气模态的变化状况; 基于高时空分辨率资料, 通过提取海洋大气耦合系统的固有模态, 发现与热带东风波和大气季节内振荡有关的高频海洋-大气耦合模态及其在未来气候变化中的相对重要性, 补充和完善热带海洋-大气相互作用理论。

(3) 揭示全球变暖背景下太平洋印度洋海区影响东亚气候的关键过程及机理, 提高对未来东亚气候变化的预估水平

通过分析全球变暖背景下, 太平洋印度洋海域对东亚气候子系统(包括南亚高压、副热带高压和东亚急流)的影响途径和内在机制所发生的变化, 理解热带海洋以及副热带西北太平洋影响东亚气候的动力学机制, 建立关键海区影响东亚主要气候子系统的遥相关动力学, 评估未来东亚气候的可预测性; 考虑海-气耦合模态及其对应的遥相关型在全球增暖背景下的变化, 发展能够应对该变化的统计预测模式。

通过该项目的实施, 启动有关黑潮-黑潮延伸体-副热带逆流系统的国际观测计划, 为气候变化的监测和研究提供现场观测资料的支撑, 也为推动我国气候变化监测和预测水平的进一步提高奠定基础。通过该项目和国际合作计划的实施, 加强与国外优势研究团队的合作; 通过海洋-大气相互作用的研究, 促进 CLIVAR 和 IPCC 等大型国际科学计划间的联系与合作; 在国内形成若干个优势互补、分工合作的海洋-大气相互作用研究基地。

通过本研究项目的实施, 在中国形成一支海洋-大气相互作用研究团队, 做出有重要影响的研究成果, 培养 3~5 名致力于海洋环流和海洋-大气相互作用研究在国际上起领军作用的学术带头人, 15~20 名研究骨干, 20~30 名博士与硕士研究生队伍, 构建一支高水平的研究团队。

**致谢:** 本文主要依据全球变化研究国家重大科学研究计划“太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对气候



变化的调控作用”项目的申报书撰写的,该申报书是在项目申报过程中,由参与项目申报的所有科学家共同讨论完成的.在申报书撰写过程中得到国内外大气科学和海洋科学的许多专家的指点和帮助.在此,向所有对项目的申报书撰写做出贡献的人致谢!

### 参考文献:

- [1] XIE S P, DESER C, VECCHI G A, et al. Global warming pattern formation: Sea surface temperature and rainfall [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 966—986.
- [2] COLLINS M, COAUTHORS. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 391—397.
- [3] LIU Z, VAVRUS S, HE F, et al. Rethinking tropical ocean response to global warming: The enhanced equatorial warming [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18: 4684—4700.
- [4] XIE S P, XU L X, LIU Q, et al. Dynamical role of mode—water ventilation in decadal variability in the central subtropical gyre of the North Pacific [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24: 1212—1225.
- [5] VECCHI G A, SWANSON K L, SODEN B J. Whither Hurricane Activity? [J]. *Science*, 2008, 322, 687—689.
- [6] BARSUGLI J, SHIN S, SARDESHMUKH P. Sensitivity of global warming to the pattern of tropical ocean warming [J]. *Climate Dynamics*, 2006, 27: 483—492.
- [7] HOERLING M., EISCHEID J, PERLWITZ J. Regional precipitation trends: Distinguishing natural variability from anthropogenic forcing [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 2131—2145.
- [8] SHIN S I, SARDESHMUKH P D. Critical influence of the pattern of tropical ocean warming on remote climate trends [J]. *Climate Dynamics*, 2011, doi: 10.1007/s00382-009-0732-3.
- [9] YE H S W, KUG J S, DEWITTE B, et al. El Niño in a changing climate [J]. *Nature*, 2009, 461: 511—514.
- [10] YANG H, ZHANG Q. Anatomizing the ocean role in ENSO changes under global warming [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21: 6539—6555.
- [11] ABRAM N J, GAGAN M K, COLE J E, et al. Recent intensification of tropical climate variability in the Indian Ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 849—853.
- [12] ZHENG X T, XIE S P, VECCHI G A, et al. Indian Ocean dipole response to global warming: Analysis of ocean-atmospheric feedbacks in a coupled model [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 1240—1253.
- [13] XIE S P, DU Y, HUANG G, et al. Decadal shift in El Niño influences on Indo-western Pacific and East Asian climate in the 1970s [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 3352—3368.
- [14] ZHENG X T, XIE S P, LIU Q. Response of the Indian Ocean basin mode and its capacitor effect to global warming [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24: 6146—6164.
- [15] LUO Y, LIU Q, ROTHSTEIN L M. Simulated response of North Pacific Mode Waters to global warming [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L23609, doi: 10.1029/2009GL040906.
- [16] XU L X, XIE S P, LIU Q, et al. Response of the North Pacific Subtropical Countercurrent and its variability to global warming [J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 68: 127—137, doi: 10.1007/s-10872-011-0031-6.
- [17] KOBASHI F, XIE S P, IWASAKA N, et al. Deep atmospheric response to the North Pacific oceanic subtropical front in spring [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21: 5960—5975.
- [18] TAGUCHI B, NAKAMURA H, NONAKA M, et al. Influences of the Kuroshio/Oyashio Extensions on air-sea heat exchanges and storm track activity as revealed in regional atmospheric model simulations for the 2003/4 cold season [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 6536—6560.
- [19] OKAZAKI Y, TIMMERMAN A, MENVIEL L, et al. Deepwater formation in the North Pacific during the last glacial termination [J]. *Science*, 2010, 329: 200—204.
- [20] 巢纪平. 大尺度海气相互作用与长期天气预报 [J]. *大气科学*, 1977, 3: 223—233.
- [21] LIU Q, WEN N, LIU Z. An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L18611, doi: 10.1029/2006GL026082.
- [22] YANG J, LIU Q, XIE S P, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L02708, doi: 10.1029/2006GL028571.
- [23] HUANG G, HU K, XIE S P. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the Northwest Pacific since the mid-1970s: An atmospheric GCM study [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 5294—5304.
- [24] HU K, HUANG G, HUANG R. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24: 5365—5377.

- [25] DING Y, WANG Z, SUN Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28: 1139—1162.
- [26] 黄荣辉, 徐子红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 1999, 18: 465—476.
- [27] HU Z Z. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1997, 102: 19403—19412.
- [28] ZHOU T, COAUTHORS. Why the Western Pacific Subtropical High has extended westward since the late 1970s [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 2199—2215.
- [29] LI H, DAI A, ZHOU T, et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950—2000 [J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34: 501—514.
- [30] WU R, WEN Z, YANG S, et al. An Interdecadal Change in Southern China Summer Rainfall around 1992/93 [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 2389—2403.

## Response of the Indo – Pacific Oceans to global warming and the effect on regional climate change

LIU Qinyu<sup>1</sup>, XIE Shangping<sup>1,2</sup>, ZHENG Xiaotong<sup>1</sup>

(1. *Physical Oceanography Laboratory and Key Laboratory of Ocean-Atmosphere Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego, USA*)

**Abstract:** A project entitled “Response of the Indo – Pacific Oceans to global warming and the effect on regional climate change” was launched in 2012 under the National Basic Research Program for Global Change Research. It is built on a premise that ocean response to global warming involves heat transport adjustments, gives rise to spatial patterns of SST and precipitation changes, and alters modes of climate variability, thereby affecting regional climate over East Asia and elsewhere. The project will improve the understanding of the ocean’s role in global change and relevant ocean-atmospheric feedback, strengthen China’s contributions to key scientific issues pertinent to climate change, and build a Chinese research team active on the international stage in these areas.

**Key words:** global warming, oceanic response; sea surface temperature; spatial pattern; coupled ocean-atmospheric mode

# 春季一次黄海、东海层云-海雾过程的研究

张苏平<sup>1</sup>, 刘飞<sup>1,2</sup>, 孔扬<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学, 物理海洋教育部重点实验室和海洋-大气相互作用与气候山东省重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 91199 部队气象台, 浙江 舟山 316000)

**摘要:** 结合多种观测数据和数值模式对2011年3月12日1次黄、东海层云-海雾过程进行分析。观测数据分析表明: 东海层云和黄海海雾之间有密切的联系。地面高低压位置为水汽从南向北的输送提供了有利的环流条件; 30°N以北高空为大规模下沉气流。在下沉运动影响下, 海洋大气边界层(MABL)层结稳定, 甚至出现逆温, MABL高度自南向北不断降低, 边界层中的云高度随之不断下降接近海面。MABL高度下降最明显出现29°~30°N附近, 模式结果表明, MABL之上的下沉运动与MABL内的下沉在30°N附近同位相叠加, 使得该海区上空的下沉运动明显增强, 导致边界层高度迅速下降。用HYSPLIT-4模式对气块的后向追踪表明, 来自层云的气块在向北运动过程中高度不断下降, 相对湿度增加并维持较高的水平, 说明气块下沉过程中吸收了来自层云中蒸发的水汽, 气块下沉至更低高度后, 低空偏南气流带来的水汽也有贡献。大量水汽局限于MABL内, 在黄海冷海面冷却凝结成雾。该研究可以为我国海雾形成机理提供新的认识, 并对海雾预报提供新的参考思路。

**关键词:** 层云; 海雾; 下沉; 逆温层; 海洋大气边界层

## 1 引言

雾可以认为是底部接地的云, 它使能见度小于等于1 km, 严重影响交通<sup>[1-3]</sup>。海雾是指在海洋的影响下, 在海上、岛屿或沿海地区形成的雾<sup>[4]</sup>。海雾使海上或沿海能见度降低, 对海上交通, 船舶航行, 捕捞等造成严重的影响, 80%的海洋灾难与海雾有关<sup>[5]</sup>。据舟山海事局近年来资料统计, 近200次海上因船舶碰撞、触礁等发生的海难事故中, 有70%是由海雾引起的, 海雾可谓“海上无声的杀手”<sup>[6]</sup>。因此对海雾形成、发展的机制研究有十分重要的意义。

20世纪20年代国外已经对海雾开始研究<sup>[7]</sup>, 我国相关研究起步较晚, 20世纪80年代, 王彬华<sup>[4]</sup>首先对中国沿海海雾进行了研究。张苏平和任兆鹏<sup>[8-9]</sup>、张苏平等<sup>[10]</sup>用观测资料和中尺度模式WRF (Weather Research and Forecast) 对黄海、渤海春夏季海雾形成机理进行了研究, 指出雾顶长波辐射冷却对海雾的形成和发展起十分重要的作用。前人研究表明, 黄海海雾多属于平流冷却雾<sup>[4, 11-19]</sup>, 即暖湿空气流经冷海面, 底层空气降温达到其露点而形成雾。国外研究发现, 海洋上空大气边界层中的层云 (marine stratus) 可以下降成为海雾, 1931年加利福尼亚沿岸有了层云下降成雾过程的飞行记录<sup>[20]</sup>。Oliver等<sup>[21]</sup>, Pilić等<sup>[22]</sup>及Telford和Chai<sup>[23]</sup>认为层云下降成雾主要是由于微物理过程和卷挟作用导致的。Korašin和Lewis<sup>[24]</sup>引入一维湍流模式对加利福尼亚一次层云-海雾过程进行研究, 认为在大尺度下沉的背景下, 低空逆温和云顶长波辐射冷却是成雾的主要机制, Lewis等<sup>[25]</sup>从天气系统上分析了适合层云下降成雾的天气系统, 给出了概念图。黄海、东海是层云和海雾多发海区, 但是对层云和海雾的关系迄今为止

基金项目: 国家自然科学基金 (41175006)

作者简介: 张苏平 (1956—), 女, 博士, 教授, 海洋气象专业 E-mail: zsping@ouc.edu.cn