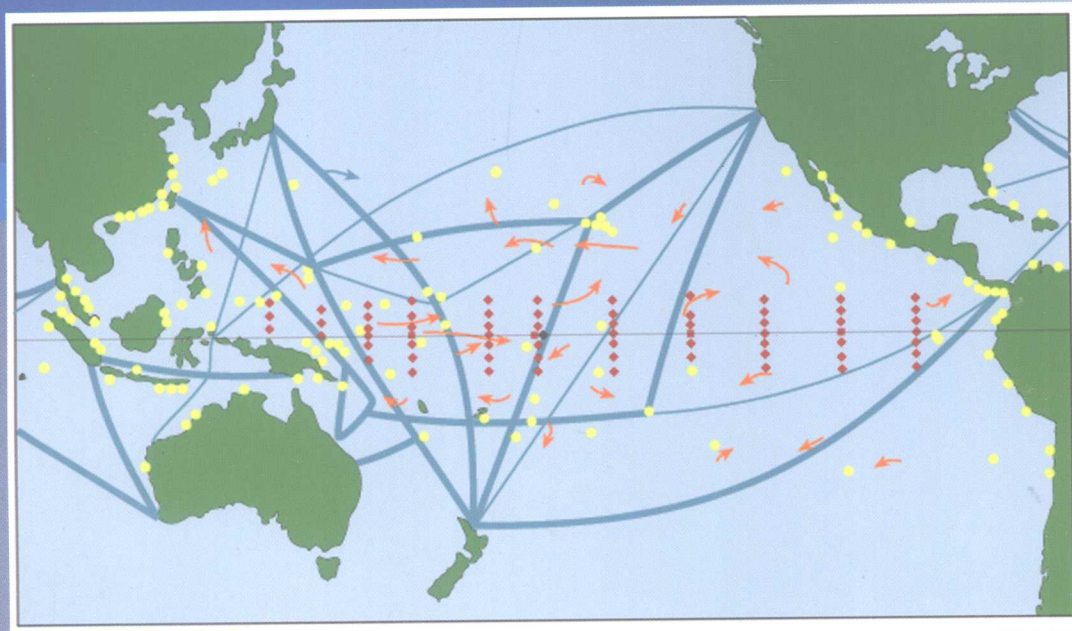


热带太平洋 环流变异与海气相互作用

王东晓 方国洪 王启 刘钦燕 主编



海洋出版社

热带太平洋

环境变异与海气相互作用

王遵亲 王世杰 王世杰 王世杰 王世杰 王世杰



科学出版社

热带太平洋环流变异与 海气相互作用

王东晓 方国洪 王 启 刘钦燕 主编

海洋出版社

2009年·北京

内 容 摘 要

本书系统地从四个方面对热带太平洋环流变异和海气相互作用过程进行了阐述。第一部分从不同的时空尺度对太平洋环流和温跃层变化进行阐述,对环流通道进行科学的研究,并提出热带太平洋气旋式“海温异常信号通道”的概念,为 ENSO 循环机理研究提供了又一重要依据。第二部分对中国冬季气候异常的变异机制、西太平洋暖池不对称性及热带太平洋海气相互作用的正反馈和冬季西北太平洋阿留申低压—海温差—西风急流正反馈过程进行分析,对于提高我国气候预报精度能够提供科研依据。第三部分在吕宋水交换、印尼贯穿流及两者的紧密联系等方面取得了不错的成果,对正确认识南海在全球热盐环流变化中的作用打下了扎实的基础;第四部分对全球熵变化、热带太平洋的盐度收支、中尺度涡旋的分布和传播及不同海域风生和热盐环流的作用进行了研究和阐述,对以后开展相关全球气候变化研究提供前提依据。

本书可供海洋和气象系统的专业技术人员以及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

热带太平洋环流变异与海气相互作用/王东晓等主编.

—北京:海洋出版社,2009.5

ISBN 978-7-5027-6922-2

I. 热… II. 王… III. ①热带—太平洋—大洋环流—研究②热带—太平洋—海—气关系—研究 IV. P731.27
P732.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 081591 号

责任编辑:陈茂廷 杨传霞

责任印制:刘志恒

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

北京盛兰兄弟印刷装订有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月北京第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:20.75

字数:510 千字 定价:78.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

本书主要撰写人员

(按音序排列)

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 陈锦年 | 程旭华 | 方国洪 | 谷德军 | 高荣珍 |
| 管玉平 | 姜 涛 | 李春晖 | 李海洋 | 刘钦燕 |
| 刘 赞 | 孟祥凤 | 孙即霖 | 杨 阳 | 王东晓 |
| 王 启 | 王永刚 | 魏泽勋 | 王文质 | 严幼芳 |

前 言

近 20 多年来,气候异常频繁发生,给全球社会经济发展带来严重影响。各国科学家多年来致力于研究地球系统自然变化和人类活动共同引起的气候变化,比较典型的工作是关于厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件研究,从而兴起气候研究的又一个高潮。其后,国际气候变率与可预报性研究计划(CLIVAR)明确地将年代到百年尺度气候变率与可预报性研究单独作为一个子计划提出来(CLIVAR-DecCen),强调开展与年际、年代际及更长期变率有关的海洋过程研究,探索长期特别是年代际气候变率的成因和可预报性。

发生在热带的 ENSO 及其年代际变化以及发生在太平洋中高纬的年代际变化(PDO)对我国和世界气候及其异常影响显著,已经成为该领域学者的研究热点。以 ENSO 研究为代表的海洋年际变化研究已取得实质性进展,并在一定程度上对其作出了可靠合理的预测。对 ENSO 的进一步研究发现,ENSO 循环本身存在显著的年代和年代际特征,并认为此乃 ENSO 循环的“背景”状态的改变所致。ENSO 年代际变化的起源及与 PDO 关系是太平洋不同区域及不同尺度海洋-大气运动及相互作用的核心问题。

在国际上全面开展 CLIVAR 气候变化研究计划的背景下,国家自然科学基金委于 2002 年开始资助了为期 4 年的“热带太平洋海洋环流年际与年代际变率”重点基金项目的研究。来自中国科学院南海海洋研究所、中国海洋大学、中国科学院海洋研究所、国家海洋局第一海洋研究所的课题组成员,以及中国气象局广州热带海洋气象研究所、南京信息工程大学、中山大学等单位的研究同行采用观测统计分析、简单动力诊断、多版本海洋环流资料同化分析、海洋环流模式数值研究相结合的研究方法,探讨了太平洋环流年际海洋变异

三维结构形成、维持的原因及其对热带太平洋年际变化的影响行为和热带太平洋环流对印尼贯穿流和南海贯穿流的影响等一系列海洋环流前沿问题,提出了太平洋海洋环流指数及其气候学意义、太平洋副热带经圈环流与热带纬向环流系统之间相互作用等重要观点。此外,课题组广泛开展国际合作,参与了全球海洋资料同化计划(GO-DAE);课题组骨干被遴选为 CLIVAR 太平洋委员会(Pacific Panel)成员。

为了及时与国内外同行交流本项目取得的研究成果,进一步推进我国在太平洋海气相互作用领域的研究,参与国际海洋与气候研究界的交流与竞争,我们依照项目任务要求和成果的不同侧重方向,撰写了“热带太平洋环流与温跃层变率特征”、“西太平洋海气相互作用的年际与年代际过程”、“太平洋及其热带边缘海环流模拟与诊断”和“全球热盐变化过程研究”4个章节的内容。

在本书的撰写过程中,得到了国家自然科学基金委地学部陆则慰和任建国两位先生的指导以及出版社同志的大力帮助,特此致谢。本书虽然经过项目组全体成员的协同努力,但由于种种原因其中肯定有许多不成熟的地方,恳请各位读者批评指正。

王东晓

目 次

| | |
|---|------|
| 第 1 章 热带太平洋环流与温跃层变率特征 | (1) |
| 1.1 太平洋环流指数定义及变率 | (1) |
| 1.1.1 引言 | (1) |
| 1.1.2 资料和方法 | (1) |
| 1.1.3 基本特征 | (3) |
| 1.1.4 环流指数反映的北太平洋年代变化 | (5) |
| 1.1.5 热带和副热带环流的相互作用 | (8) |
| 1.1.6 讨论 | (8) |
| 1.2 ENSO 循环过程机制的研究 | (10) |
| 1.2.1 ENSO 循环系统的研究进展 | (10) |
| 1.2.2 西太平洋暖池变化与 ENSO 循环过程的关系 | (13) |
| 1.2.3 西太平洋暖池变异的机制研究 | (16) |
| 1.2.4 热带太平洋次表层异常海温的信号通道 | (23) |
| 1.2.5 热带太平洋次表层异常海温东传与赤道潜流的关系 | (24) |
| 1.3 热带太平洋表层流各流系的变化 | (30) |
| 1.3.1 引言 | (30) |
| 1.3.2 数据资料 | (31) |
| 1.3.3 季节变化分析 | (31) |
| 1.3.4 年际变化分析 | (34) |
| 1.3.5 结论 | (35) |
| 1.4 热带太平洋赤道潜流和温度季节变化的相关性 | (35) |
| 1.4.1 资料说明 | (37) |
| 1.4.2 赤道太平洋水温和潜流的季节变化 | (37) |
| 1.4.3 经向流速的变化对赤道太平洋温度和潜流速度季节变化的影响 | (39) |
| 1.4.4 讨论和结论 | (40) |
| 1.5 太平洋副热带至赤道密度跃层流 | (42) |
| 1.5.1 引言 | (42) |
| 1.5.2 数据和方法 | (43) |
| 1.5.3 等密面上的环流和通道 | (43) |
| 1.5.4 通道的输送 | (44) |

| | | |
|-------|-----------------------|------|
| 1.5.5 | 通道输送的特性 | (46) |
| 1.5.6 | 年代际变化 | (50) |
| 1.5.7 | 结论 | (56) |
| 1.6 | 南太平洋热含量变化特征 | (56) |
| 1.6.1 | 引言 | (56) |
| 1.6.2 | 环流区域的划分和环流指数的定义 | (57) |
| 1.6.3 | 数据和处理方法 | (58) |
| 1.6.4 | 结果与分析 | (59) |
| 1.6.5 | 结论 | (63) |
| 1.7 | 黑潮输送异常及其与大尺度海气相互作用的关系 | (64) |
| 1.7.1 | 引言 | (64) |
| 1.7.2 | 北太平洋西边界流输送异常分析 | (65) |
| 1.7.3 | 黑潮输送异常与大尺度海气相互作用的关系 | (68) |
| 1.7.4 | 结论和讨论 | (71) |
| 1.8 | 太平洋温跃层年代际变率的同化资料分析 | (72) |
| 1.8.1 | 引言 | (72) |
| 1.8.2 | 资料和分析方法 | (72) |
| 1.8.3 | 结果分析 | (75) |
| 1.8.4 | 结论和讨论 | (79) |
| | 参考文献 | (79) |

第2章 西太平洋海气相互作用的年际与年代际过程 (87)

| | | |
|-------|--------------------------------|-------|
| 2.1 | 影响中国冬季气候的经向风变异 | (87) |
| 2.1.1 | 引言 | (87) |
| 2.1.2 | 模式、资料及处理方法 | (88) |
| 2.1.3 | WP-CS的异常海温形势对中国冬季气候的影响 | (88) |
| 2.1.4 | EN(LN)年冬季异常经向风的地转和非地转分量 | (92) |
| 2.1.5 | 1982—1983年冬季WP-CS局地Hadley环流的诊断 | (93) |
| 2.1.6 | 结论 | (95) |
| 2.2 | 西太平洋暖池热力结构气候态南北不对称 | (95) |
| 2.2.1 | 引言 | (95) |
| 2.2.2 | 模式介绍 | (98) |
| 2.2.3 | 资料和外部参数的选取 | (100) |
| 2.2.4 | 控制试验 | (101) |
| 2.2.5 | 敏感性试验 | (102) |
| 2.2.6 | 结论 | (110) |
| 2.3 | 热带西太平洋上层热含量年际变化的区域性 | (111) |
| 2.3.1 | 引言 | (111) |
| 2.3.2 | 数据与处理方法 | (111) |

| | | |
|-------|--|-------|
| 2.3.3 | 结果和分析 | (112) |
| 2.3.4 | 结论与讨论 | (118) |
| 2.4 | 热带太平洋海气系统年代际局地正反馈机制 | (120) |
| 2.4.1 | 引言 | (120) |
| 2.4.2 | 资料和方法 | (121) |
| 2.4.3 | 热带太平洋地区海温与风场 SVD 分析 | (121) |
| 2.4.4 | 热带海气正反馈过程 | (123) |
| 2.4.5 | 结论和讨论 | (128) |
| 2.5 | 珊瑚灰度对 1946—1992 年局地云量年代际突变的记录 | (128) |
| 2.5.1 | 引言 | (128) |
| 2.5.2 | 资料与方法 | (129) |
| 2.5.3 | 主要结果 | (129) |
| 2.5.4 | 结论与讨论 | (132) |
| 2.6 | ENSO 特性的年代际变化 | (133) |
| 2.6.1 | 引言 | (133) |
| 2.6.2 | 资料 | (135) |
| 2.6.3 | 结果分析和讨论 | (135) |
| 2.6.4 | 总结与讨论 | (142) |
| 2.7 | 赤道中太平洋停驻模态与阶段性海气相互作用 | (143) |
| 2.7.1 | 两层半模式中的停驻模态和背景风场的影响 | (145) |
| 2.7.2 | 对模式同化资料的分析 | (148) |
| 2.7.3 | 第二斜压模态在热带中太平洋的持续对西风异常的影响 | (150) |
| 2.7.4 | TOGA-TAO 实测资料中第二斜压模信号和预测 El Niño 事件的简单指数 | (151) |
| 2.7.5 | 经验正交分析 (EOF) | (152) |
| 2.7.6 | 小结 | (153) |
| 2.8 | 冬季西北太平洋海洋大气正反馈过程分析 | (154) |
| 2.8.1 | 引言 | (154) |
| 2.8.2 | 资料简介 | (154) |
| 2.8.3 | 阿留申低压指数 | (154) |
| 2.8.4 | 西风指数 | (155) |
| 2.8.5 | 黑潮影响区和亲潮影响区海温差 | (155) |
| 2.8.6 | 结果和讨论 | (156) |
| 2.8.7 | 结论 | (159) |
| 2.9 | 不同天气尺度系统对热带太平洋海气潜热通量贡献的估计 | (159) |
| 2.9.1 | 引言 | (159) |
| 2.9.2 | 资料和方法 | (159) |
| 2.9.3 | 结果分析 | (162) |
| 2.9.4 | 结论与讨论 | (165) |

| | |
|--|--------------|
| 参考文献 | (166) |
| 第3章 太平洋及其热带边缘海环流模拟与诊断 | (174) |
| 3.1 全球变网格数值模式及结果与观测的比较 | (174) |
| 3.1.1 全球变网格数值模式介绍 | (174) |
| 3.1.2 模拟结果与观测的比较 | (177) |
| 3.2 南海环流季节和年际变化模拟结果 | (187) |
| 3.2.1 南海环流季节变化 | (187) |
| 3.2.2 南海环流结果的可靠性分析 | (192) |
| 3.2.3 南海环流的年际变化 | (194) |
| 3.3 吕宋海峡输送年际变异 | (208) |
| 3.3.1 引言 | (208) |
| 3.3.2 数据来源与处理 | (209) |
| 3.3.3 吕宋海峡输送随深度变化的一般特征 | (210) |
| 3.3.4 吕宋海峡体积(热量)输送的年际变化 | (212) |
| 3.3.5 结论及讨论 | (216) |
| 3.4 印尼贯穿流季节和年际变化模拟结果 | (217) |
| 3.4.1 印度尼西亚海域模式结果的可靠性分析 | (220) |
| 3.4.2 印度尼西亚海域环流季节变化的模拟结果及分析 | (221) |
| 3.4.3 印尼贯穿流各个海峡流量的季节变化模拟结果 | (228) |
| 3.4.4 印尼贯穿流年际变化的模拟结果及分析 | (232) |
| 3.5 印尼贯穿流年代际变化及成因分析 | (236) |
| 3.5.1 引言 | (236) |
| 3.5.2 资料 | (237) |
| 3.5.3 ITF 体积和热量运输的计算和平均情况 | (237) |
| 3.5.4 ITF 体积和热量运输的年代际变化特征 | (238) |
| 3.5.5 ITF 体积输运年代际变化成因分析 | (239) |
| 3.5.6 小结 | (245) |
| 3.6 西太平洋关键海峡输送年际变化特征及相互关联 | (246) |
| 3.6.1 引言 | (246) |
| 3.6.2 资料及方法 | (247) |
| 3.6.3 ITF 与吕宋海峡体积输送年际变化特征 | (248) |
| 3.6.4 ITF 与吕宋海峡体积输送异常反位相年际特征机制分析 | (249) |
| 3.6.5 小结和讨论 | (253) |
| 3.7 全球大洋环流气候平均场诊断计算 | (255) |
| 3.7.1 引言 | (255) |
| 3.7.2 模型的设置 | (256) |
| 3.7.3 模式结果 | (257) |
| 3.7.4 南海贯穿流与印尼贯穿流的关系 | (267) |

| | |
|----------------------------------|--------------|
| 3.7.5 结论 | (271) |
| 参考文献 | (271) |
| 第4章 全球热盐变化过程研究 | (279) |
| 4.1 全球海洋与大气界面的熵通量估算 | (279) |
| 4.1.1 熵平衡方程 | (279) |
| 4.1.2 资料分析和处理 | (282) |
| 4.1.3 计算结果 | (283) |
| 4.1.4 结论 | (286) |
| 4.2 热带太平洋海面盐度年际变化的海洋同化数据分析 | (286) |
| 4.2.1 引言 | (286) |
| 4.2.2 资料来源及处理方法 | (287) |
| 4.2.3 海面盐度距平场的 EOF 展开与因子分析 | (287) |
| 4.2.4 结论 | (292) |
| 4.3 热带太平洋次表层盐度的年际变化 | (293) |
| 4.3.1 引言 | (293) |
| 4.3.2 数据与处理方法 | (294) |
| 4.3.3 表层海水盐度的变化特征 | (294) |
| 4.3.4 影响次表层海水盐度变化的影响因子分析 | (296) |
| 4.3.5 小结和讨论 | (299) |
| 4.4 风对热盐环流的作用与影响 | (301) |
| 4.4.1 引言 | (301) |
| 4.4.2 关于驱动大洋深海环流的新观点 | (302) |
| 4.4.3 风对大洋深海环流作用与影响的初步研究结果 | (303) |
| 4.4.4 结语 | (304) |
| 4.5 现代北太平洋无深水形成的原因 | (304) |
| 4.5.1 引言 | (304) |
| 4.5.2 大洋热盐环流——全球海洋输运带 | (305) |
| 4.5.3 造成北太平洋上层盐度差异的因素 | (306) |
| 4.5.4 北太平洋是否有深水形成 | (308) |
| 附录 全球中尺度涡的分布和传播特征 | (310) |
| 1 引言 | (310) |
| 2 数据和处理方法 | (310) |
| 3 中尺度涡的空间分布特征 | (311) |
| 4 中尺度涡的传播特征 | (312) |
| 5 结论 | (313) |
| 参考文献 | (313) |

第 1 章 热带太平洋环流与温跃层变率特征

1.1 太平洋环流指数定义及变率*

1.1.1 引言

近期的历史资料分析表明,太平洋海气相互作用有显著的长时间尺度变化(Graham, 1994; Deser et al., 1996; Barnett et al., 1999)。这些变化的显著特征表现为从年代到年代际范围内的一个宽的频带上(Minobe, 1999)。

太平洋年代温度脉动对北半球的气候和生态系统有显著的影响(Trenberth and Hurrell, 1994; Mantua et al., 1997; Tourre et al., 1999)。然而,对这些脉动的物理机制仍没有很好的理解(Miller and Schneider, 2000)。一些理论把它归因于副热带-热带相互作用起主要作用(Gu and Philander, 1997),而另一些认为中纬度海气耦合反馈和海洋环流调整起主要作用(Latif and Barnett, 1994, 1996)。还有一些研究认为大气随机强迫被海洋红化在起作用(Jin, 1997; Frankignoul et al., 1997; Saravanan and McWilliams, 1998)。

在年代时间尺度上,可以想象到,因为海洋大的热容量,其内部的动力学过程将起重要作用。在这些过程中,被平均流平流的速度异常($U \cdot \nabla T'$)和被异常流平流的速度异常($U' \cdot \nabla T$)在最近 10 a 备受关注。在北太平洋,模拟和观测都表明,副极地和副热带环流向风应力异常的调整可以影响黑潮扩展区(Kuroshio extension region, KER)的 SST 和温跃层深度(Miller et al., 1998; Deser et al., 1999; Seager et al., 2001; Schneider et al., 2002)。在副热带-热带太平洋,向风应力异常调整的副热带-热带浅的经向翻转环流被认为在副热带和热带太平洋海洋的年代变化中起主要作用(Kleeman et al., 1999)。观测表明,这个浅的翻转环流从 20 世纪 70 年代以来变慢了,这种趋势是与太平洋 SST 的变化相联系的(McPhaden and Zhang, 2002)。Huang 和 Liu(1999)用 NCEP 再分析的洋流资料定量分析了副热带和热带太平洋之间的交换。他们的结果和以前的观测结果非常一致。除了副热带和热带环流的变化,热带外的暖(冷)异常的潜沉也可以影响热带地区的 SST,尤其在南太平洋。

在本节,我们将采用简单的环流指数分析来研究与北太平洋气候变化有关的北太平洋海洋环流调整的潜在联系。结果表明,北太平洋副极地环流和副热带环流在年代和年代际变化中起不同的作用。

1.1.2 资料和方法

本工作采用了 50 a 的上层海洋温度、盐度和流在南、北纬 60°之间再分析资料(Carton et al., 2000),也就是 SODA 海洋再分析资料。SODA 资料提供从 1950 年 1 月至 2000 年 12 月的逐月南、北纬 60°之间资料。水平分辨率从热带 $1.0^\circ \times 0.45^\circ$,降至中纬度的 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 。

* 本节由王东晓等撰写。

垂直方向上有不等间距的 20 层。

太平洋的大尺度环流特征是,两个强大的反气旋式副热带环流、两个高纬度气旋式环流、沿 10°N 和 15°S 的两个向西的流和一个向东的流,该流在表层和 500 m 左右在赤道偏北一点,而在其他深度上都是沿赤道的。这种观测分布型关于赤道大致是对称的(Reid, 1997)。

为了描述北太平洋这 3 支大尺度环流的变化特征,通过沿各个环流路径(用理想的长方形近似,图 1.1.1)积分上层 500 m 速度,我们定义了 3 个环流指数如下:

$$\vec{U} = \int_{-500}^0 \vec{u} \cdot dz$$

然后通过沿理想长方形随气候态的流型累加得到各指数(见图 1.1.1 和表 1.1.1):

$$I = \oint_{\Sigma} \vec{U} \cdot d\vec{l}$$

我们用 SODA 2001 版资料计算这些指数,3 个指数都通过除去 50 a 平均的季节循环而转为它们的异常序列。正(负)异常表示环流强度加强(减弱)。从物理上讲,这 3 个指数都代表着区域平均的 Ekman 抽吸的变化(图略)。

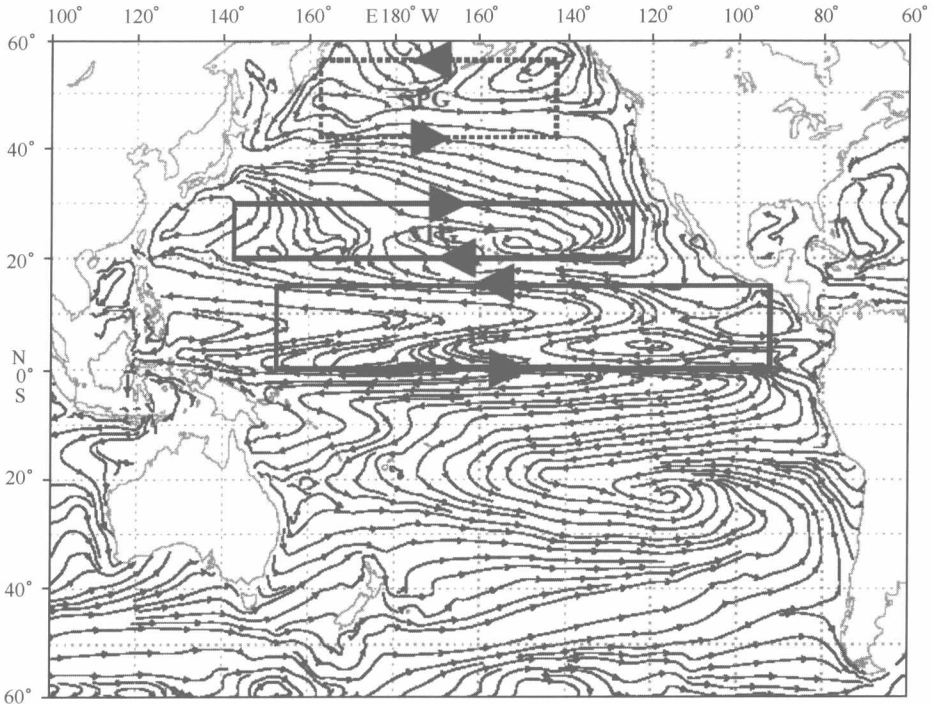


图 1.1.1 根据 1950—1999 年 SODA 产品导出的长期气候平均流线(上层 500 m 平均) 3 个长方形分别表示 SPG、STG 和 TG,指数是沿箭头方向积分的结果

另外,这里采用上层 400 m 热容量异常(White, 1995)研究海洋热力变化。选择有强信号的 3 个关键区域:北太平洋中部、黑潮扩展区和 Niño3 区。

我们用多通道奇异谱分析(SSA-MTM)软件包,该软件包包括一系列的可以对单变量输入时间序列进行细致谱分析和分解的程序(Ghil and Vautard, 1991)。它包含以下程序:(a) 估计时间序列的谱;(b) 把时间序列分解到诸如趋势项、振荡和噪声等不同的分量;(c) 对

选中的分量(或模)重建。这里,利用 SSA 方法分离那些在年际到年代际时间尺度上变化的不同内在模。

表 1.1.1 环流指数的定义边界

| 环流 | 西边界 | 东边界 | 北边界 | 南边界 |
|-----------------------------|---------|---------|------|------|
| 副极地环流(subpolar gyre,SPG) | 162.5°E | 142.5°W | 56°N | 42°N |
| 副热带环流(subtropical gyre,STG) | 142.5°E | 124.5°W | 36°N | 20°N |
| 热带环流(tropical gyre,TG) | 152.5°E | 92.5°W | 15°N | 0°N |

1.1.3 基本特征

因为南太平洋,历史观测资料不充分可能导致如 SODA 之类的同化产品不能提供真实的海洋环流,所以我们仅把重点放在北太平洋。应该提醒的是,STG 和 SPG 的边界尽量远离包含西边界流范围,因为 SODA 对西边界流的模拟不是很好。决定主要动量由风驱动环流限制的深度不是一件小事。一般说来高纬度地区的温跃层深度要比热带和副热带地区的更深。

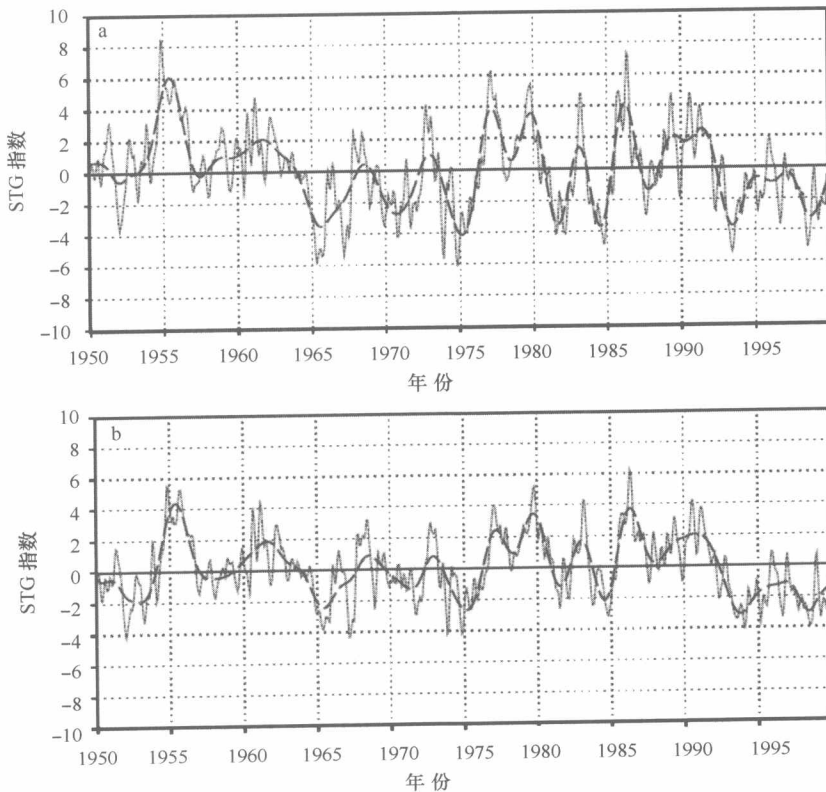


图 1.1.2 不同层次积分的 STG 指数

a. 上层 200 m 积分的指数;b. 200 ~500 m 次表层积分的指数。细线是原始资料,粗线是基于 SSA 主模态重建的指数。单位为 $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$

这里,我们给出一种对 STG 指数定义最少选择 500 m 的简单验证。我们计算两个不同

的指数,一个是上 200 m,另一个是 200 m 到 500 m。上层的输送和下沉的输送有相同的量级且表现出类似的低频变化(图 1.1.2)。这表明 200 m 的上层和 200 ~ 500 m 的次表层是同样重要的。图 1.1.3 给出了我们计算的 SPG、STG 和 TG 3 个指数的时间序列。为了除掉高频变化,我们对这些时间序列进行 SSA 分析并根据主要模态重建滤波后的时间序列。因为每一个模态可以解释显著的方差百分比(见表 1.1.2),重建后的时间序列本质上抓住了每一个指数的主要特征。综合来看,我们发现,每一个环流指数有不同的主要时间尺度。

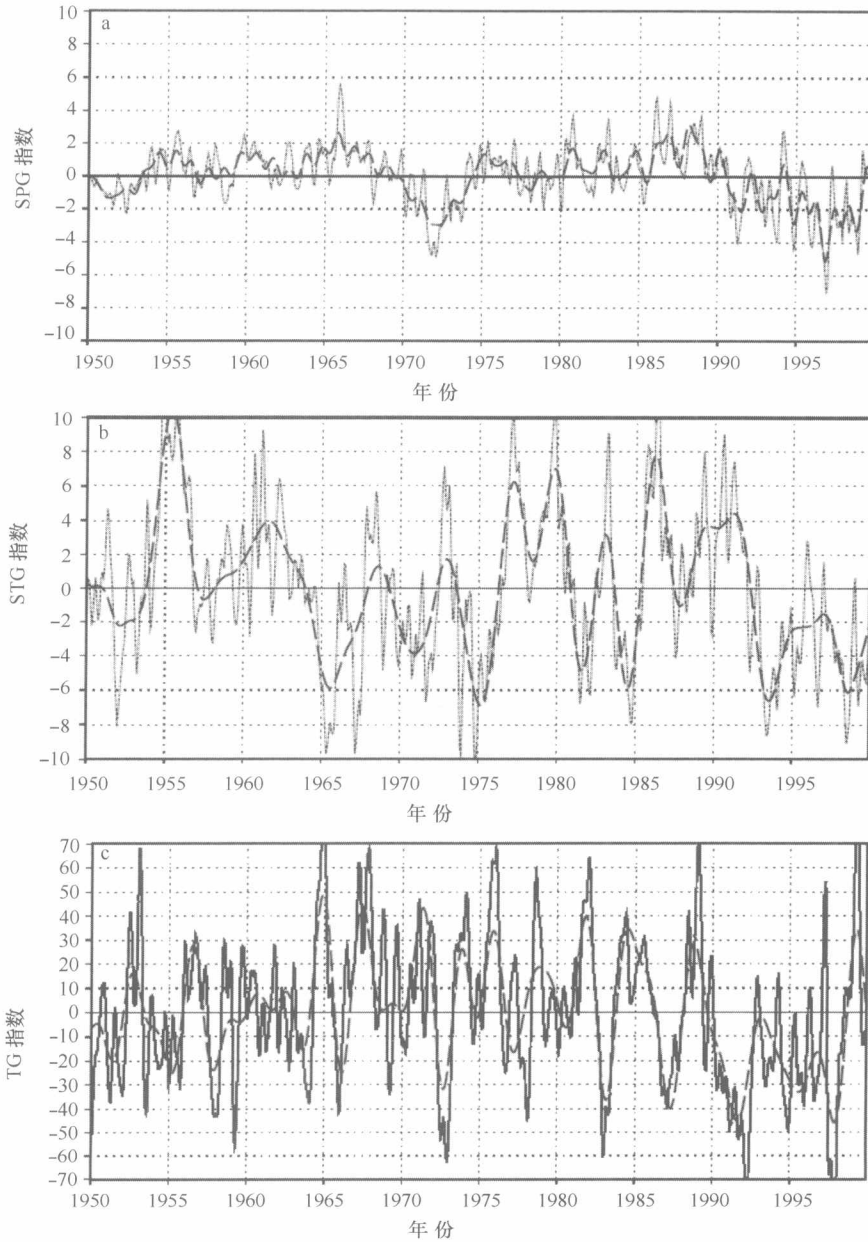


图 1.1.3 SPG(a)、STG(b)、TG(c)指数的时间序列

长虚线表示基于主要模态的重建序列。对各指数,各模态解释方差所占百分比见表 1.1.2。注意:根据 SSA 方法,周期振荡的一对模的百分比基本相等

表 1.1.2 各模态解释方差所占百分比 (%)

| 模 | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | 6th | 7th | 8th | 9th | 10th |
|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| SPG | 17.0 | 16.2 | 6.2 | 5.4 | 4.4 | 3.5 | 3.3 | 2.6 | 2.5 | 2.4 |
| STG | 11.3 | 9.7 | 8.5 | 8.5 | 7.1 | 6.9 | 5.3 | 5.0 | 3.8 | 2.7 |
| TG | 8.3 | 6.1 | 6.1 | 5.3 | 5.0 | 5.0 | 4.5 | 4.5 | 4.0 | 4.0 |

1.1.3.1 SPG 指数

SPG 指数的特征是年代际变化占优势(见图 1.1.3a)。环流从 20 世纪 50 年代中期至 70 年代早期和 1980—1990 年趋于加强。显著的减弱出现在 1975—1985 年。也有一定的年际和年代变化,一般说来比年代际变化弱得多。其年代至年代际变化在下文将作进一步分析。

1.1.3.2 STG 指数

与 SPG 相反,STG 由 10 ~ 20 a 的年代变化控制(见图 1.1.3b)。STG 大致在 1955—1965 年、1976—1981 年和 1986—1992 年趋于加强,而在 1965—1975 年和 1992—2000 年趋于减弱。1992—1998 年是一个较短的周期。从 20 世纪 70 年代至 80 年代的加强与先前的观测研究(Qiu and Joyce, 1992; Deser et al., 1999)是一致的。转换发生在 1976—1977 年气候突变的几年后,可能可以看成对内部风变化的延迟响应。后面还会回到这个问题。

1.1.3.3 TG 指数

因为靠近赤道,TG 变化与 ENSO 密切相关。可以看到 TG 的变化特征是年际变化为主(见图 1.1.3c)。这与 SPG 和 STG 明显不同。也可以看出一个年代长的减弱出现在 20 世纪 90 年代,这是与热带太平洋的持续性变暖相联系的。

总体而言,这里定义的环流指数清楚地表明了北太平洋海盆尺度环流的不同时间变化特征。对副极地环流,以年代际变化为主;而在副热带和热带环流中,分别以年代和年际变化为主。以下部分中,我们将要研究海洋环流如何与 SST 和大气环流异常联系起来。为了完成这项工作,我们简单地用太平洋年代际变化(PDO)指数(Mantua et al., 1997)、北太平洋指数(NPI,定义为 30° ~ 65°N, 160°E ~ 140°W 面积平均的 SLP, Trenberth and Hurrell, 1994)和 ENSO 指数(这里用 Niño3 指数)。在分析之前,先对所有的指数进行 9 个月的滑动平均。

1.1.4 环流指数反映的北太平洋年代变化

从 9 个月平滑的 5 个指数(STG、TG、Niño3、PDO 和 NPI,见图 1.1.4a)可以看出年际和年代际时间尺度的信号。这些指数之间的相关系数见图 1.1.4b 和 1.1.4c。对 STG、Niño3、PDO 和 NPI 都超前于副热带环流变化。位相的超前可由观测证据支持,这种证据就是,副热带中太平洋应力诱导的 Rossby 波可以影响环流,比如,影响内区的 Sverdrup 输送平衡,从而改变几年后的西边界流。TG 与滞后 2 ~ 3 个月的 Niño3 有显著相关。

太平洋年代际变化的可能机制之一是北太平洋副热带环流和阿留申低压之间的不稳定海气相互作用。Latif 和 Barnett (1994, 1996) 基于风应力涡度强迫的 Rossby 波调整和其后的副热带环流的西边界流热输送,提出了北太平洋年代际变化的延迟负反馈机制。这也得到 Deser 等(1999)的支持,他们发现,作为异常内区风应力涡度的延迟响应,黑潮扩展区从 20