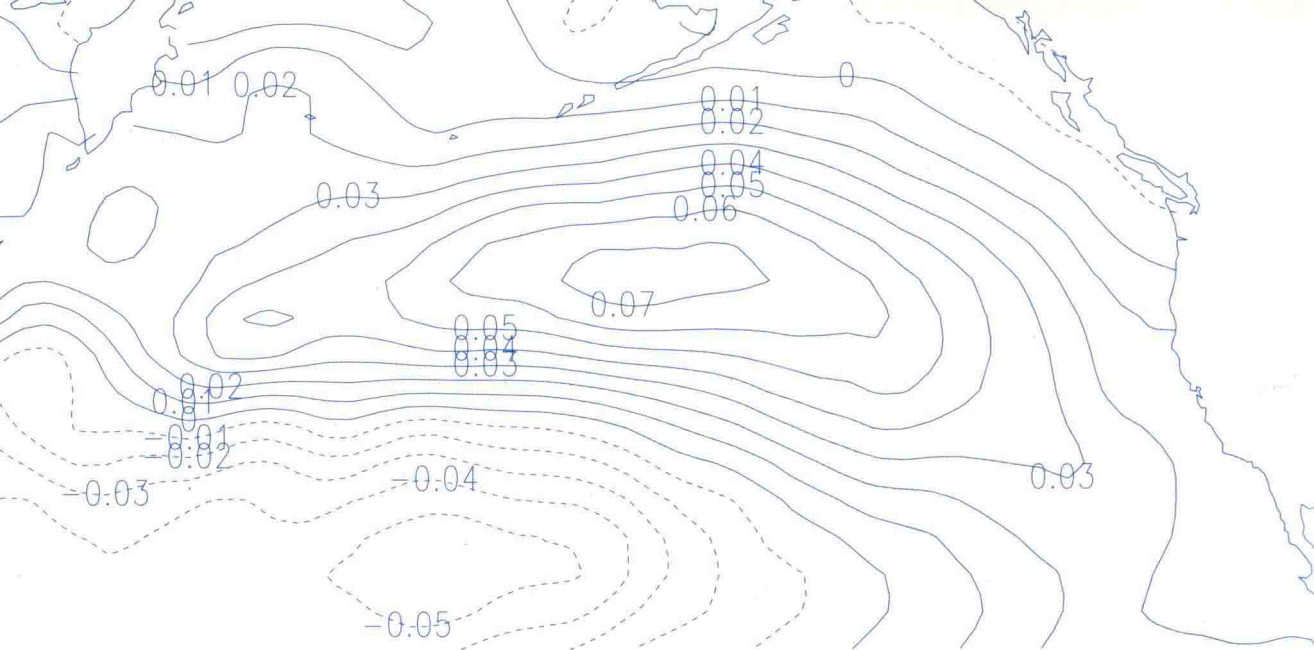




冬季北太平洋 环流振荡之研究

张立凤 张 铭 吕庆平 著

 气象出版社
China Meteorological Press

冬季北太平洋环流 振荡之研究

张立凤 张 铭 吕庆平 著



气象出版社

China Meteorological Press

内 容 简 介

本书主要介绍了对冬季北太平洋环流振荡的研究成果。书中分析了北太平洋环流振荡模态在上层海温、海流中的时空特征,揭示出在海洋上层的温度场和流场中都存在北太平洋环流振荡模态,且具有准 13 年周期的年代际变化;指出了风场动力强迫对北太平洋环流振荡模态的影响最大,中高纬西风急流是强迫北太平洋环流振荡模态的关键系统。一方面,中纬度西风急流异常通过大气北太平洋涛动模态强迫出北太平洋环流振荡模态;另一方面,受风应力驱动的海盆尺度的大洋环流异常会造成上层海洋海盆尺度垂直运动的异常,从而引起海盆尺度的海温动力异常,北太平洋环流振荡模态准 13 年的年代际周期主要是由大气动力强迫所造成。

本书可供大气科学和海洋科技工作者以及有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

冬季北太平洋环流振荡之研究 / 张立凤, 张铭, 吕庆平著.

—北京:气象出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-5029-6147-3

I. ①冬… II. ①张… ②张… ③吕… III. ①冬季—北太平洋—大洋环流—振荡—研究 IV. ①P731.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 125419 号

Dongji Beitaipingyang Huanliu Zhendang zhi Yanjiu

冬季北太平洋环流振荡之研究

张立凤 张 铭 吕庆平 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: [http:// www.qxcbs.com](http://www.qxcbs.com)

责任编辑:李太宇

封面设计:易普锐创意

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:230 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版

定 价:50.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:章澄昌

责任技编:赵相宁

印 张:9

彩 插:1

印 次:2015 年 9 月第 1 次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

前 言

进入 20 世纪后,太平洋年代际振荡(PDO)受到了高度重视,其不仅是年代际时间尺度上的气候变化强信号,又是叠加在长期气候趋势变化上的扰动,可直接影响太平洋周边地区乃至全球的气候变化。然而近年来发现,太平洋年代际振荡并不能解释东北太平洋中盐度、营养物质以及鱼储量等的年代际变化。因此,Di Lorenzo 在 2008 年定义了一个新的气候模态——北太平洋环流振荡(NPGO)。

北太平洋环流振荡是东北太平洋海表面高度异常(SSHA)经验正交函数(EOF)分解的第二模态,其空间结构呈南北偶极子分布,它不仅很好地反映了风应力和海表盐度距平的变化,而且与东北太平洋中生物变量的变化相关很好。由于海表温度异常(SSTA)和东北太平洋海表面高度异常的变化趋势相关较高,所以北太平洋环流振荡亦可反映海表温度异常的环流变化。自 1993 年以来,北太平洋环流振荡的强度正在逐渐加强。已有研究认为,阿留申低压是太平洋年代际振荡模态的大气强迫场,北太平洋涛动(NPO)与海洋北太平洋环流振荡模态有关,是驱动北太平洋环流振荡的大气强迫场。北太平洋环流振荡是近年来发现的太平洋海温异常重要的年代际变化,关于其变化特征及其对气候影响的研究越来越受到重视。

本书采用统计分析、解析求解和数值模拟的方法,研究了北太平洋环流振荡模态在北太平洋冬季海洋温度场和海洋流场中的表现,揭示了海温及海流场中北太平洋环流振荡模态特征和形成机理,发现海温场和流场中都存在相应的类似于海表面高度场的北太平洋环流振荡模态,且具有准 13 年的年代际变化周期;中纬度西风异常的强迫是造成北太平洋环流振荡的直接原因。本书还研究了海表温度场优势模态的迁移,发现 20 世纪 80 年代中期后,海表温度异常优势模态的空间结构由太平洋年代际振荡型转变为北太平洋环流振荡型,且该迁移现象有准 18 年的年代际变化周期。

本书的研究工作得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)两个项目《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》(项目编号:2007CB411800)和《西北太平洋海洋多尺度变化过程、机理及可预报性》(项目编号:2013CB956200)的资助,在此向科技部和这两个项目的首席科学家表示衷心感谢。本书的出版得到了解放军理工大学气象海洋学院领导和气象出版社的重视与支持;我的研究生余沛龙、张晓慧和朱娟参与了全书的画图、校对等工作;程婷博士审校了全书,在此也向他们表示深深的谢意。最后,还要感谢所有帮助和鼓励过我们的同事和朋友们。

张立凤

2015年6月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 北太平洋环流振荡的基本概念和研究意义	(1)
1.2 北太平洋环流振荡的基本观测特征	(2)
1.3 北太平洋环流振荡研究回顾	(4)
第 2 章 上层海温的北太平洋环流振荡模态	(8)
2.1 资料和方法	(8)
2.2 上层海温第二模态特征	(9)
2.3 冬季上层海温异常北太平洋环流振荡指数	(14)
2.4 本章小结	(15)
第 3 章 海表温度与海平面气压的耦合模态	(16)
3.1 资料和方法	(16)
3.2 海面温度异常及海面气压异常的主要模态特征	(17)
3.3 海面温度异常和海面气压异常的主要耦合模态	(23)
3.4 海面温度异常和海面气压异常的耦合关系分析	(28)
3.5 本章小结	(33)
第 4 章 北太平洋大洋环流异常分析	(34)
4.1 资料和方法	(34)
4.2 大洋环流复经验正交函数分析	(35)
4.3 关键区大洋环流复经验正交函数分析	(41)
4.4 大洋环流异常与海面温度异常的关系	(46)
4.5 本章小结	(48)
第 5 章 大气环流与大洋环流的耦合	(49)
5.1 资料和方法	(49)
5.2 复经验正交函数的第一模态	(50)
5.3 复经验正交函数的第二模态	(54)
5.4 耦合环流讨论	(57)
5.5 本章小结	(60)

第 6 章 时变风应力强迫北太平洋环流振荡流场模的解析解	(61)
6.1 数学模型	(61)
6.2 模型求解	(63)
6.3 解析解的进一步讨论	(69)
6.4 本章小结	(70)
第 7 章 太平洋西海岸对北太平洋环流振荡流场模的影响	(71)
7.1 数学模型和求解方法	(71)
7.2 海洋对西风强迫的响应和迭代法的验证	(74)
7.3 线性倾斜西边界海洋的计算结果	(76)
7.4 北太平洋环流振荡流场模的再现	(81)
7.5 非线性情况的计算结果和讨论	(81)
7.6 本章小结	(82)
第 8 章 大洋环流模式对北太平洋环流振荡模态的数值模拟	(83)
8.1 大洋环流数值模式介绍	(83)
8.2 数值方法	(87)
8.3 海表环境模拟结果	(89)
8.4 冬季北太平洋环流振荡模态模拟结果	(92)
8.5 气候控制试验	(97)
8.6 本章小结	(100)
第 9 章 大气强迫北太平洋环流振荡模态的数值试验	(101)
9.1 气候敏感性试验	(101)
9.2 大气动力强迫和热力强迫的作用	(110)
9.3 大气强迫对北太平洋环流振荡年代际变化的影响	(114)
9.4 本章小结	(117)
第 10 章 北太平洋海面温度异常优势模态的迁移	(118)
10.1 资料和方法	(118)
10.2 场相似度与经验正交函数分解	(119)
10.3 海面温度异常优势模态的迁移	(120)
10.4 海面气压异常与海面温度异常优势模态间的关系	(127)
10.5 本章小结	(130)
第 11 章 全书总结	(132)
11.1 海温场和流场北太平洋环流振荡模态的时空特征	(132)
11.2 北太平洋环流振荡模态形成的机制	(132)
11.3 冬季北太平洋海面温度异常优势模态的迁移	(133)
参考文献	(134)

第1章 绪 论

1.1 北太平洋环流振荡的基本概念和研究意义

海洋占地球总面积的71%,它对地球气候形成有着深远的影响,其巨大的热含量、热输送和地表覆盖率,调节着气候系统的时空变率,在各种时间尺度的气候变化中起着重要作用;随着全球变暖的加剧,越来越迫切需要掌握海洋的变化规律及其对全球气候的反馈作用。国际重大科学研究计划——气候变化及可预报性研究(Climatic Variability and Predictability, CLIVAR)强调开展年代际及更长时间尺度的海洋过程的研究,以更好地探索长期特别是年代际气候变化的成因和可预报性。北太平洋是邻近我国的最大海洋,从大气系统来讲,北太平洋副热带海区之上是副热带高压,这里海水的蒸发超过降水,对北太平洋两岸乃至全球气候变化产生重要影响。

太平洋海温的年代际变化是影响我国气候异常的一个重要因素,许多研究表明(李峰和何金海,2001;王慧和王谦谦,2002;马柱国,2007;顾薇等,2007;侯威等,2008;李春,2008;华丽娟和马柱国,2009),包括赤道中东太平洋、北太平洋在内的关键海区对中国区域气候有明显的影 响,但影响东亚天气气候的海温关键区,并不是固定的,而是随着海气相互作用的年代际变化而转移,这种关系主要反映在年代际变化的时间尺度上,对中国夏季旱涝有重要的预报启示作用。

随着海洋观测资料的长时间积累和再分析资料的不断推出,20世纪90年代后,年代际尺度的海洋气候变化成为国际气候学研究中的热点。年代际尺度气候变率的强信号(Mantua *et al.*, 1997)是北太平洋海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)的年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO),关于PDO的基本特征及其对周边地区大气环流变化的影响已有了许多研究(Zhang *et al.*, 1998;江志红和屠其璞,2001;李泓等,2001;王辉等,2002;Mantua and Hare, 2002;谷德军等,2003;王东晓等,2003;杨修群等,2004;吴德星等,2006;Alexander, 2010;刘秦玉等,2010;Liu, 2012)。PDO是北太平洋海温场中一种缓变的气候模态,许多研究工作揭示出PDO对中国气候有显著影响。PDO指数与中国降水和气温的年代际变化存在密切联系,处于不同阶段的ENSO事件对中国夏季气候异常的影响明显受到PDO的调制(朱乾根和徐建军,1998;朱益民和杨修群,2003)。华北降水年代际异常与太平洋上层海洋热力状况异常的显著关系主要表现为PDO与华北降水异常的相关(杨修群等,2004),华北和西北东部的年干湿变化与同期PDO指数有密切的关系,PDO指数的正位相对应上述两个地区的干旱时段,负位则相对应湿润时段(马柱国和邵丽娟,2006)。东亚夏季风降水与PDO在年代际尺度上具有较好的相关关系(唐民和吕俊梅,2007),PDO对夏季江淮地区降水的年代际变化有重要影响(杨秋明,2005)。

近年来发现, PDO 还不能够完全解释东北太平洋中盐度、营养物、叶绿素及鱼储量等的年代际变化。因此, 2008 年 Di Lorenzo 等(2008)对东北太平洋海域的海表面高度(Sea Surface Height, SSH)定义了一个新的气候模态——北太平洋环流振荡(North Pacific Gyre Oscillation, NPGO), 它不仅很好地反映了风应力和海表面盐度(Sea Surface Salinity, SSS)距平的变化, 而且与东北太平洋中生物变量的变化趋势相关性很好。由于 SST 和 SSH 的变化趋势相关较高(Cummins *et al.*, 2005), 所以 SST 的年代际变化也应具有 NPGO 模态。

NPGO 作为北太平洋的主要气候模态越来越受到人们的重视, 该模态有不同时间尺度的变化特征, 这些变化会显著地改变北太平洋各海洋要素的分布形态, 从而影响大气环流的变化。从长期看, PDO 和 NPGO 是相互独立的两个模态, 两者的相关系数仅为 0.15。但近年研究发现 PDO 和 NPGO 指数表现出了相关, 1990 年后, 二者的相关系数增大为 0.4(Ceballos *et al.*, 2009)。而且, 自 1993 年以来, NPGO 的强度正在逐渐加强, 冬季北太平洋的气候主模态结构也正在发生变化; 20 世纪 80 年代末北太平洋气候模态的变化并不是 PDO 信号的简单反转(Yeh *et al.*, 2011; Lv *et al.*, 2012), 空间结构也发生了改变。

由于年代际尺度的气候预测仍处于“婴儿期”(Meehl *et al.*, 2009; Murphy *et al.*, 2010; Solomon *et al.*, 2011), 而 NPGO 模态具有显著的年代际变化特征, 所以近年来对 NPGO 的研究成为气候研究的热点。研究 NPGO 的时空结构及其对周边气候的影响不仅对认识全球气候变化和海气相互作用的动力学机制有重要理论意义, 还对气候预测和气候灾害的防御有重要的潜在应用价值。如前所述, 现有的研究大多注重 PDO 模态对中国气候的影响, 对 NPGO 模态与东亚大气环流以及中国气候年代际变化之间的关系几乎还没有研究。由于 NPGO 模态的强度正在逐渐增强, 冬季北太平洋的气候主模态结构正在发生变化。因此, 进行 NPGO 与中国气候之间关系的研究是极为重要的。

1.2 北太平洋环流振荡的基本观测特征

Di Lorenzo 等(2008)利用涡分辨率海洋环流模式回报的 SSH 资料, 在东北太平洋(25° — 62° N, 180° — 110° W)进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析, 得到东北太平洋海表高度年代际变化的两个主要模态: 第一模态类似于 Mantua 等(1997)提出的 PDO 模态; 第二模态被认为是 NPGO 模态。故 NPGO 可定义为东北太平洋海表面高度异常(SSHA)EOF 分解的第二模态, 其对应的时间序列则定义为 NPGO 指数(下载地址为 <http://www.ocean3d.org/npgo>)。

NPGO 模态的空间结构是 SSHA 正负中心呈南北偶极子分布, 北部中心对应阿拉斯加涡流(Alaskan Gyre), 南部中心对应副热带涡流(Subtropical Gyre), 二者被北太平洋洋流(North Pacific Current, NPC)分开。NPGO 可分为正、负位相, 在 NPGO 的正位相时, 南部为 SSH 正异常中心, 对应涡旋环流为顺时针转动, 北部为 SSH 负异常中心, 对应涡旋环流为逆时针转动, 反之则称为 NPGO 的负位相。当 NPGO 位于正位相时, 南北涡流都加强, 而该加强则是由风应力涡旋及风生涌流所驱动的。

NPGO 模态最早是由 SSHA 给出, 由于 SSHA 与海面温度异常(SSTA)有很好的对应关系, 所以 NPGO 与北太平洋 SSTA EOF 分析的第二模态(Victoria mode; Bond *et al.*, 2003)有很好的相关性。图 1.1 给出了由 SSTA 揭示的典型 NPGO 时空结构。从 NPGO 指数演变

(图 1.1a)可见,其具有明显的年际变化和年代际变化。利用东北太平洋海域内 1950—2008 年冬季 SSTA 与 NPGO 指数回归,其回归系数分布如图 1.1b 所示,东北太平洋上 SSTA 呈南北向的偶极子分布,其北部为负值中心,南部为正值中心,这意味着北部的 SSTA 偏冷,南部的 SSTA 偏暖,类似于典型 NPGO 模态的正位相空间结构。回归所用 SST 资料选自美国国家气候数据中心(NCDC)的 ERSST.v3.。

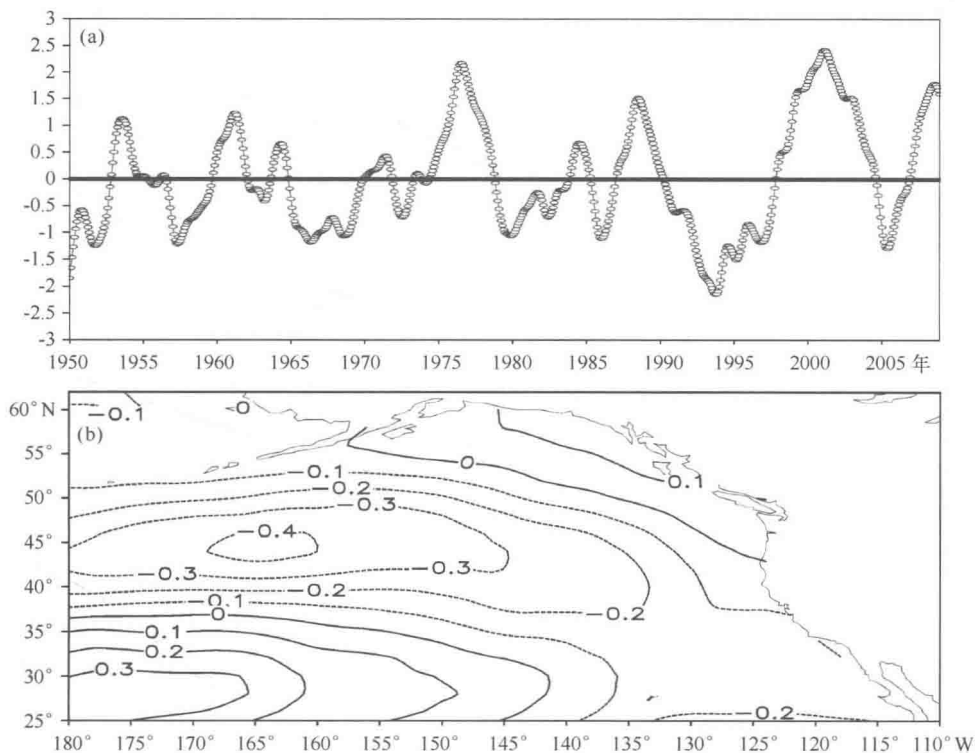


图 1.1 NPGO 的时间演变和空间结构图

(a)1950—2008 年间标准化的 NPGO 指数时间序列;

(b)1950—2008 年冬季东北太平洋 SSTA 对 NPGO 指数的回归系数分布,单位:℃。

在全球气候变暖的背景下,热带太平洋中部与东部厄尔尼诺发生的比率可增加 5 倍(Yeh *et al.*, 2011)。考虑到 NPGO 与中太平洋厄尔尼诺的密切关系(见以下 1.3.2 小节),可以推测 NPGO 强度也会随之增强。自 1993 年以来,NPGO 的强度确实正在逐渐加强,NPGO 的加强可能是由于人类活动和全球变暖引起的,这个假设可以大略受 GFDL2.0 气候耦合模式结果的支持(Di Lorenzo *et al.*, 2008),其分析结果显示:对比 1900—2000 年和 2000—2100 年,NPGO 增加了 38%,PDO 减少了 58%,近十年内 NPGO 的振幅大于 PDO,从而证实了之前独立分析得到的结论(Cummins and Freeland, 2007)。而且 Bond 等(2003)对北太平洋冬季 SSTA 作 EOF 分析后发现,1990—2002 年间,NPGO 模态比 PDO 模态可以更多地解释 SSTA。此外,空间结构的改变是另外一个值得关注的问题。如 20 世纪 80 年代末北太平洋气候模态的变化并不是 PDO 信号的简单反转(Hare and Mantua, 2000),空间结构也发生了改变。Yeh 等(2011)对 1956—1988 年及 1977—2009 年两个时期的北太平洋冬季 SSTA 作了经验正交函数分解,发现第一模态在 1956—1988 年为 PDO 型,到 1977—2009 年时段转变为

NPGO 型。此外,在 20 世纪 90 年代后期,北太平洋 SST 的空间结构也与 PDO 模态有着明显不同(Bond *et al.*, 2003)。这意味着,冬季北太平洋主要气候模态的结构正在发生变化,仅仅使用 PDO 一种气候模态来描述北太平洋 SST 的低频变异并不完备,NPGO 模态也应得到更多的重视。

GFDL2.0 气候耦合模式的分析结果表明:NPGO 的加强可能是因人类活动和全球变暖引起的(Di Lorenzo *et al.*, 2008),故人类活动和全球变暖对北太平洋环流振荡的变化也许有较大影响,但现今尚缺乏这一类的研究。到目前为止,人们对北太平洋气候模态变化对全球变暖的响应情况了解很少,主要原因是气候模态的变化是在全球变暖背景下发生的,且很难对该二者做出区分。根据 PDO 和 NPGO 的原始定义,在对 SST 进行 EOF 分解前,已经减去了被认为是变暖信号的全球平均值(或者是线性趋势);这就使得全球变暖和气候模态成为两种相对独立的物理问题。实际上,两者存在非线性的相互作用,并不能简单地使用去掉全球平均气温或者线性趋势等方法将其分离(Meehl *et al.*, 2009; Oshima and Tanimoto, 2009; d'Orgeville and Peltier, 2009; Bonfils and Santer, 2011)。Shiogama 等(2005)认为类 ENSO(厄尔尼诺和南涛动)模态(Zhang *et al.*, 1997)的年代际变化(即 PDO)包括异乎寻常大的线性增长趋势,其主要是由人类活动造成的,而由于人类活动的强迫作用和 PDO 相关的自然变率对 SST 变化可能起着相反的作用(Corre *et al.*, 2012)。因此在温室气体增加引起全球变暖的同时,具有显著年代际变化特征的 NPGO 和 PDO 模态也调节着全球气候变暖趋势。

1.3 北太平洋环流振荡研究回顾

与 PDO 相比,NPGO 是近几年才被发现和得到重视的北太平洋气候模态,所以相关的研究较少,人们对 NPGO 变化机制的了解要较 PDO 匮乏。尽管如此,已有的研究也使我们对 NPGO 的机制有了初步认识。

1.3.1 与大气强迫的关系

海洋—大气的相互作用是现代气候动力学和物理海洋学研究的基础,也是气候变化机理研究的主要内容,其可追溯至 Bjerkness(1972)和 Wyrki(1973)的工作,赤道地区 ENSO 及其年际循环和年代际变异都是海气相互作用结果。而 NPGO 和 PDO 都是中纬度北太平洋的主要模态,观测和海洋环流模式均揭示出 NPGO 模态和 PDO 模态分别对应于特定的大气强迫场(Ceballos *et al.*, 2009; Chhak and Di Lorenzo, 2009): PDO 模态对应于阿留申低压(Aleutian Low, AL)异常强迫,而 NPGO 则对应于北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)异常强迫。AL 异常是北太平洋海平面气压(Surface Level Pressure, SLP)异常 EOF 分解的第一模态(Trenberth and Hurrell, 1995; Schneider and Cornuelle, 2005),而 NPO 是北太平洋 SLP 异常 EOF 分解的第二模态(Walker and Bliss, 1932; Rogers, 1981)。NPGO 模态和 PDO 模态及其对应的特定大气异常强迫不仅从长时间序列的观测资料中得到了验证(Qiu and Chen, 2010),而且在海洋模式的回报试验中也得到了证实(Chhak and Di Lorenzo, 2009),这一结果得到了 IPCC AR4 海气耦合模式结果的验证(Furtado *et al.*, 2011)。

李春(2010)利用海气耦合模式 FOAM 研究了海洋环流对 NPO 型和 PNA 型异常风场强迫的响应及反馈,得出如下结论:在 NPO 型正位相异常风应力强迫下,整个北太平洋环流系

统加强,此时北太平洋 SST 的响应则类似于 NPGO 模态正位相异常,进而削弱 NPO 型风应力,这是一种负反馈机制。冬季海洋环流的调整则对北太平洋大气环流产生类似 PNA 型负位相环流异常的反馈。而在 PNA 型负位相异常风应力强迫下,北太平洋副极地环流异常减弱且向北收缩,使北太平洋副热带环流与副极地环流的边界向北偏移,北太平洋 SST 的响应类似于 PDO 模态负位相异常,从而进一步造成 PNA 型负位相异常的风应力,这是一种正反馈机制。实际中,这两种反馈机制达到动态平衡。

海洋直接或间接受大气的强迫作用,主要通过风应力、海表面气压和浮力等机制来实现(Philander,1978)。其中,海表面气压的作用很小,可以忽略,其余两个机制中,浮力通量反映了大气对海洋的热量作用,风应力则反映了动力作用,二者相比,大气对海洋的动力作用更为重要。海洋对大气的作用主要是通过大尺度的 SST 对大气非绝热加热或冷却,来改变大气的环境流状况,进而改变海洋表面的风应力和热通量;风应力的改变使得海洋的热力结构和环境流状况发生了变化,正反馈的作用进一步加强了 SST 的异常。如果把海洋和大气看成是彼此独立的系统,则风应力和 SST 就是两者之间的纽带。

海洋和大气之间相互作用的程度在不同的区域不同。公认的海气耦合最强信号发生在赤道地区,这主要是因为赤道 SST 异常最显著,而 SST 在很大程度上会影响风应力。在赤道以外的区域,大气环流驱动表层大洋环流(风生流),并通过影响大洋上层的垂直运动,造成海温的动力变化,从而影响 SST(路凯程等,2010)。

1.3.2 与热带海洋的关系

尽管北太平洋的年代际变化独立于热带海洋,但也有研究从统计和动力两方面将 PDO/AL 与 ENSO 联系起来(Alexander *et al.*, 2002, 2008; Newman *et al.*, 2003; Deser *et al.*, 2004; Vimont, 2005),而且已有理论研究揭示出 NPO 可以通过削弱 Walker 环流影响 ENSO(Vimont *et al.*, 2003; 张立凤等, 2011)。将 NPGO 与 ENSO 的定义扩展到整个太平洋, NPGO 模态的空间结构表现出关于赤道的南北对称性,这意味着热带海气耦合的动力机制对 NPGO 的产生有强迫作用(Di Lorenzo *et al.*, 2008)。而且,在整个太平洋,其与热带中太平洋厄尔尼诺(Kao and Yu, 2009)有很相似的空间结构(Di Lorenzo *et al.*, 2010),两者在热带中太平洋均存在强的暖中心并向东北延伸至北美西海岸,而北太平洋中部则有一个冷中心;区别是前者 SST 变化的最大振幅在东北太平洋,后者在热带中部。热带的东太平洋厄尔尼诺可以通过大气遥相关作用驱动 NPGO 的年代变化,而中纬度的大气对热带海域也有反馈作用。NPO 通过季节足迹过程,不仅可以影响东太平洋厄尔尼诺(Yu *et al.*, 2010),也可以改变中太平洋厄尔尼诺(Yu and Kim, 2011)。在这个过程中,北太平洋的变化在冬季通过海表面热通量在 SST 上留下“足迹”,并在海洋中一直储存到夏季,在副热带可改变包括纬向风在内的大气环流,该风场向南延伸至赤道,进而改变 ENSO 的年代变化。因此要更好地理解 NPGO 的动力机制,还是要考虑热带太平洋的作用。Di Lorenzo 等(2011)通过量化太平洋年代际尺度的动力作用,建立了太平洋气候变量的概念模型(图 1.2),该模型依赖于海洋年代际变量(PDO 和 NPGO),大气强迫(AL 和 NPO)和 ENSO 循环以及它们之间的相互联系。PDO 和 NPGO 则与 ENSO 循环的不同阶段有关。春季北部的 NPO 使热带太平洋中部产生 SSTA,引发 ENSO 在下个冬季达到顶峰(Vimont *et al.*, 2003; Anderson, 2003)(如通过季节足迹机制),然后 ENSO 通过大气遥相关对 AL 产生影响,进而影响到 PDO。

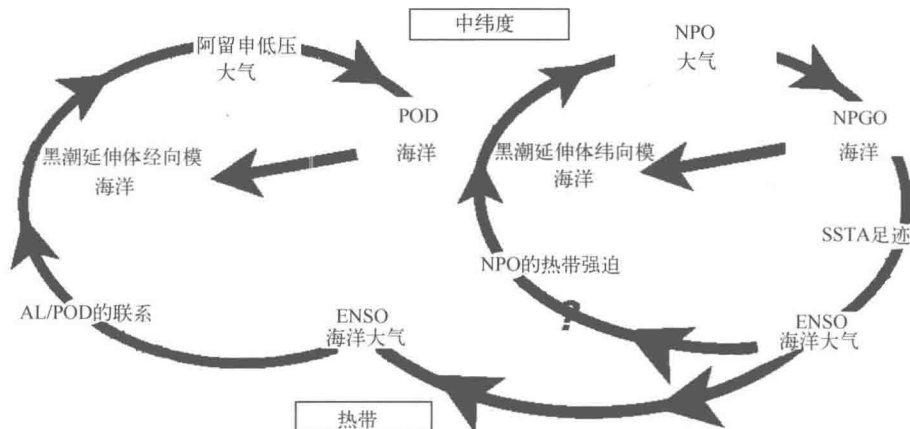


图 1.2 太平洋年代际尺度系统相互关系示意图 (Di Lorenzo *et al.*, 2011)

左侧路径: PDO/AL 动力过程; 右侧路径: NPGO/NPO 动力过程

NPO 的动力强迫机制及其与热带的关系需要进一步研究。尽管存在基于物理基础的假设, 可以将 NPO 与 ENSO 和热带 SSTA 联系起来, 但 NPO 的来源迄今为止还是归因于中纬度固有的大气强迫, 该强迫与风暴路径的变化和风暴强度有关 (Linkin and Nigam, 2008); 然而, 已有研究揭露出 NPO 也许不能完全独立于 ENSO, 且可能来源于赤道太平洋。若能证实这个设想, 那么上述概念模型就可以为太平洋年代际振荡提供一个物理框架。

1.3.3 对 KOE 环流的影响

北太平洋 SST 对 NPO 型和 PNA 型风应力的响应分别类似于 NPGO 模态和 PDO 模态, 且 SST 对 NPO 型风应力的响应是一种负反馈机制, 对 PNA 型风应力的响应则是一种正反馈机制, 这里需要说明的是海洋模态是通过对黑潮亲潮延伸区 (KOE) 的纬向流轴产生影响, 进而对大气形成反馈机制的 (李春, 2010)。这说明 NPGO 模态与 KOE 的关系密切。

NPGO 模态受大气 NPO 型风场驱动, NPO 强迫的海洋 Rossby 波将 SSH 场的 NPGO 特征从北太平洋中部向西传播到 KOE 区, 引起 KOE 区域 SSH 场滞后 2~3 年的强度变化, 这意味着 NPGO 指数可用来追踪北太平洋副热带环流中北支的变化, 该结果还为北太平洋东西边界间气候及生态系统的年代际变化提供了物理解释。NPGO 模态实质上反映了北太平洋中部 SSH 的经向梯度大小和变化, 即北太平洋海流的强度和变化。该变化经过 2—3 年的时间则会影响到 KOE 地区, 使 KOE 流轴加速 (KE 的伸展模态), 可称其为 KOE 流轴的纬向模态 (Ceballos *et al.*, 2009; Kwon *et al.*, 2010)。而 PDO 则与 NPGO 不同, 在海洋环流上其反映为北太平洋副极地环流的变化。副极地环流的加强, 会使北太平洋副热带环流与副极地环流相遇的纬度向副热带一侧偏移, 即使 KOE 纬向流轴向南偏 (KE 的收缩模态), 可称其为 KOE 的经向模态 (Miller *et al.*, 1997; Qiu *et al.*, 2007; Taguchi *et al.*, 2007)。

Ceballos 等 (2009) 通过线性 Rossby 模型揭示了与 NPO 有关的风应力旋度异常 (WSCA), 其可解释 KOE 区域 SSH 的年代际变化, 但这与 Qiu (2003) 的结论相反。Ceballos 认为 Qiu 的资料过短 (1982—2002), 这造成 PDO 和 NPGO 指数表现出些许相关, 1990 年后相关系数更可达 0.4, 且 Qiu 使用了 WSCA 的 EOF 分析第一模态代表 PDO 的大气强迫, 而非 SLP 的 EOF 分析第一模态; 虽然这两者相关很大, 但空间模态 (活动中心位置) 却不同, 这

可引起 Rossby 波模型的改变。

Ceballos 等(2009)对 KOE 区域(142°E — 180° , 30° — 45°N)内的纬向平均 SSHA 作了 EOF 分析,通过比较 NPGO 指数和 EOF 第二模态时间系数(PC2)及 KOE 区平均 SSHA 的时间变化趋势,发现当 NPGO 提前 2.5 年时其与 PC2 相关最大,提前 1.5 年时与平均 SSHA 相关最大。NPGO 与 KOE 区的 SSHA 具有相同的大气强迫(NPO),KOE 强度的低频变化是由 NPO 调节的。Qiu and Chen(2010)使用 16 年的卫星 SSH 资料,研究了 KE 系统在稳定动力状态和不稳定动力状态之间振荡的年代际变化。这两个状态之间的转换是由与 PDO 及 NPGO 有关的海盆尺度的风应力旋度对东北太平洋的强迫所造成的。在正 PDO 位相(负 NPGO 位相)时,加强的 AL 通过 Ekman 抽吸在东北太平洋产生负的 SSHA,负 SSHA 以斜压 Rossby 波的形式向西传播,它们削弱了纬向 KE 急流,并使其路径南移。在负 PDO 位相(正 NPGO 位相)时则情况相反。

1.3.4 中高纬海洋对风应力的响应

中纬度西风带急流和风暴轴的重要性是众所周知的(Li *et al.*, 2009)。西风急流造成的相应近地面的风应力,会使海洋上层流动对其强迫做出响应,并通过海气相互作用引起气候变化(容新尧和杨修群,2006)。虽然观测表明中纬度的海气相互作用较热带要小,对气候的影响也没有热带那样显著,但是有关这方面的工作依然引起气象和海洋学者的关注(赵永平等, 1997;朱艳峰等,2002;谭桂容等,2009)。风应力驱动上层海洋的理论早在 20 世纪 50 年代就已提出(Pedlosky, 1996),然而直到目前海洋对风应力响应的研究仍受到广泛的重视。Qiu (2002)研究了东太平洋风应力强迫的 Rossby 波;Cabanes 等(2006)研究了风应力驱动的正压 Sverdrup 平衡和一阶斜压 Rossby 波;Qiu 和 Chen(2006)研究了南太平洋海表面高度时空变化的动力机制等。目前研究大都采用在长波近似条件下带有风应力强迫的线性海洋 Rossby 波模型(张永垂和张立凤,2009a,2009b;Zhang *et al.*, 2010;Zhang *et al.*, 2011),且以对海洋高度场的研究居多。为研究带有西边界的海洋对中高纬西风急流的响应,张永垂、路凯程、张铭等曾建立了一个考虑瑞利摩擦的水平二维正压准平衡海洋模型,对准定常风场强迫下的海洋流场响应进行了解析求解(张永垂等,2011;路凯程等,2011),解释了中纬度北太平洋流场异常的原因。

第2章 上层海温的北太平洋环流振荡模态

北太平洋环流振荡模态原始定义是东北太平洋海表面高度异常(SSHA)经验正交函数(EOF)分解的第二模态,但由于海表温度异常(SSTA)和SSHA的变化趋势有很高的相关性(Cummins *et al.*, 2005),所以也可用SSTA的年代际变化反映NPGO模态。然而,NPGO模态是否仅表现在SSTA上?其在海洋上层是否也存在?若存在的话,其空间结构特点和时间尺度如何?这是深入了解NPGO模态要研究的问题。本章将冬季北太平洋上层海温异常作为整体进行EOF分析,以探讨上述问题。为书写方便,以下将Di Lorenzo等(2008)定义的NPGO模态称之为经典NPGO。

2.1 资料和方法

研究使用的月平均海温资料由美国Maryland大学全球简单海洋同化分析系统(SODA)提供(Carton *et al.*, 2008),水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂直有15层,各层深度分别为5.01 m、15.07 m、25.28 m、35.76 m、46.61 m、57.98 m、70.02 m、82.92 m、96.92 m、112.32 m、129.49 m、148.96 m、171.4 m、197.79 m、229.48 m。同时,研究还使用了NPGO指数,NPGO指数定义为东北太平洋($25^\circ-62^\circ\text{N}$, $180^\circ-110^\circ\text{W}$)SSHA EOF分解第二模态对应的时间序列(下载地址为:<http://www.ocean3d.org/npgo>)。上述资料均取1958年1月至2007年12月,共600个月。

研究方法包括回归分析、联合EOF分析、小波分析及变差度分析;研究范围则是赤道外北太平洋海域($20^\circ-60^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{E}-100^\circ\text{W}$),以2月份海温作为冬季海温的代表。将研究海域2月份整层(15层)的海温异常作为整体进行联合EOF分析,得到的不同模态中,各层有相同的时间系数,这样就可将同一模态中各层的海温异常有机地关联起来。在此得到的EOF第二模态方差贡献为6.5%,并通过了North检验(North *et al.*, 1982)。因篇幅关系,这里仅给出深度为25.28 m、112.32 m和229.48 m三层的结果,其可分别代表近表层、次表层和海洋上层的底部(以下简称上层底)。

变差度定义为:

$$D_j = \text{sign}(a_{j+1} - a_{j-1}) \frac{|a_{j+1} - a_{j-1}|^2}{|a_{j+1}|^2 + |a_{j-1}|^2} \quad (2.1)$$

由于本章所用到的序列 $\{a_j\}$ 值有正负,故上式与曾庆存等(2005)的定义略有不同。在此乘了符号函数sign。sign函数的值由 $a_{j+1} - a_{j-1}$ 的符号决定,当 $a_{j+1} > a_{j-1}$ ($a_{j+1} < a_{j-1}$)时,其值取1(-1)。以上变差度可定量度量序列 $\{a_j\}$ 随时间变化的速率(这里的时间用下标 j 表

示)。易证明有下式成立:

$$\frac{|a_{j+1} - a_{j-1}|^2}{|a_{j+1}|^2 + |a_{j-1}|^2} \leq 2 \quad (2.2)$$

这样有 $-2 \leq D_j \leq 2$ 。若 $D_j = 0$, 则 $a_{j+1} = a_{j-1}$; 若 $D_j \neq 0$, 则表明其在 $j-1$ 和 $j+1$ 时段 a_j 的值有变化。 $|D_j|$ 越大, 这种变化就越快。本章中, j 表示年份, 而 $j-1$ 和 $j+1$ 的时段则为 2 年。曾庆存等(2005)将变差度(其用 d^2 表示)分成 4 挡: 极强 ($d^2 > 0.8$)、强 ($0.8 \geq d^2 > 0.6$)、稍强 ($0.6 \geq d^2 > 0.4$)、不强 ($d^2 \leq 0.4$)。本章也按此标准分挡, 不过, 这里定义变差度强度时采用 $|D_j|$ 。

2.2 上层海温第二模态特征

2.2.1 空间场

为揭示北太平洋海域经典 NPGO 模态的空间结构, 利用赤道外北太平洋海域内 SSTA 与 NPGO 指数求回归, 得到回归系数分布(图 2.1a, 另见彩图 2.1)。由图可见, 北太平洋上 SSTA 呈南北向的偶极子分布, 其北部为负值中心, 南部为正值中心, 这意味着北部的 SSTA 为冷异常, 南部的 SSTA 为暖异常, 此时类似于经典 NPGO 模态的暖位相。

图 2.1b-d 给出了冬季北太平洋上层海温异常 EOF 第二模态空间场的分布。由图可见, 近表层(图 2.1b)在 $25^\circ-30^\circ\text{N}$ 的副热带上, 从 120°E 向东一直延伸至 150°W 均为正值带, 其中在 180° 至 160°W 有正的大值区。在中纬度 $40^\circ-50^\circ\text{N}$, 即在上述正值带以北, 从北太平洋西岸一直向东延伸至 140°W 则为负值带, 其后向南弯曲, 占有 140°W 以东的东太平洋, 其中在 180° 至 160°W 则有负的大值区。以上正、负值带构成一个沿纬圈的符号相反的平行带状系统, 以下简称双带系统, 其上正、负大值区的中心则呈南北偶极子分布, 这与经典 NPGO 模态空间结构相似。此外, 在日本本州岛东面海域还有小范围强海温异常, 表现为很强的正异常中心和较强的负异常中心, 两者大致呈南北分布。次表层的海温分布(图 2.1c)与近表层相比, 不同的是双带系统和南北偶极中心的海温异常值减小一半左右; 此外, 本州岛东面海域小范围强海温异常仍存在, 空间分布也相似。上层底(图 2.1d)的情况则有所变化, 上述的双带系统仅残留一点痕迹, 南北偶极子也几乎不见; 但日本本州岛东面海域小范围强海温异常仍维持, 并相对更加突出。

纵观该模态各层的空间分布可见, 在次表层及以上各层的中纬度北太平洋, 海温异常表现明显的两个区域分别为北太平洋中部的双带系统和带上的偶极中心, 以及日本本州岛以东的小范围强海温异常, 这也是该模态的特点所在。尽管本州岛以东的海温异常范围要较前者小得多, 但其异常强度却不小, 特别是在正异常中心处。NPGO 模态的空间结构在表层和次表层一致, 而随着海洋的加深, 这种特征逐渐减弱消失, 这反映了 NPGO 模态是大气异常强迫的结果。

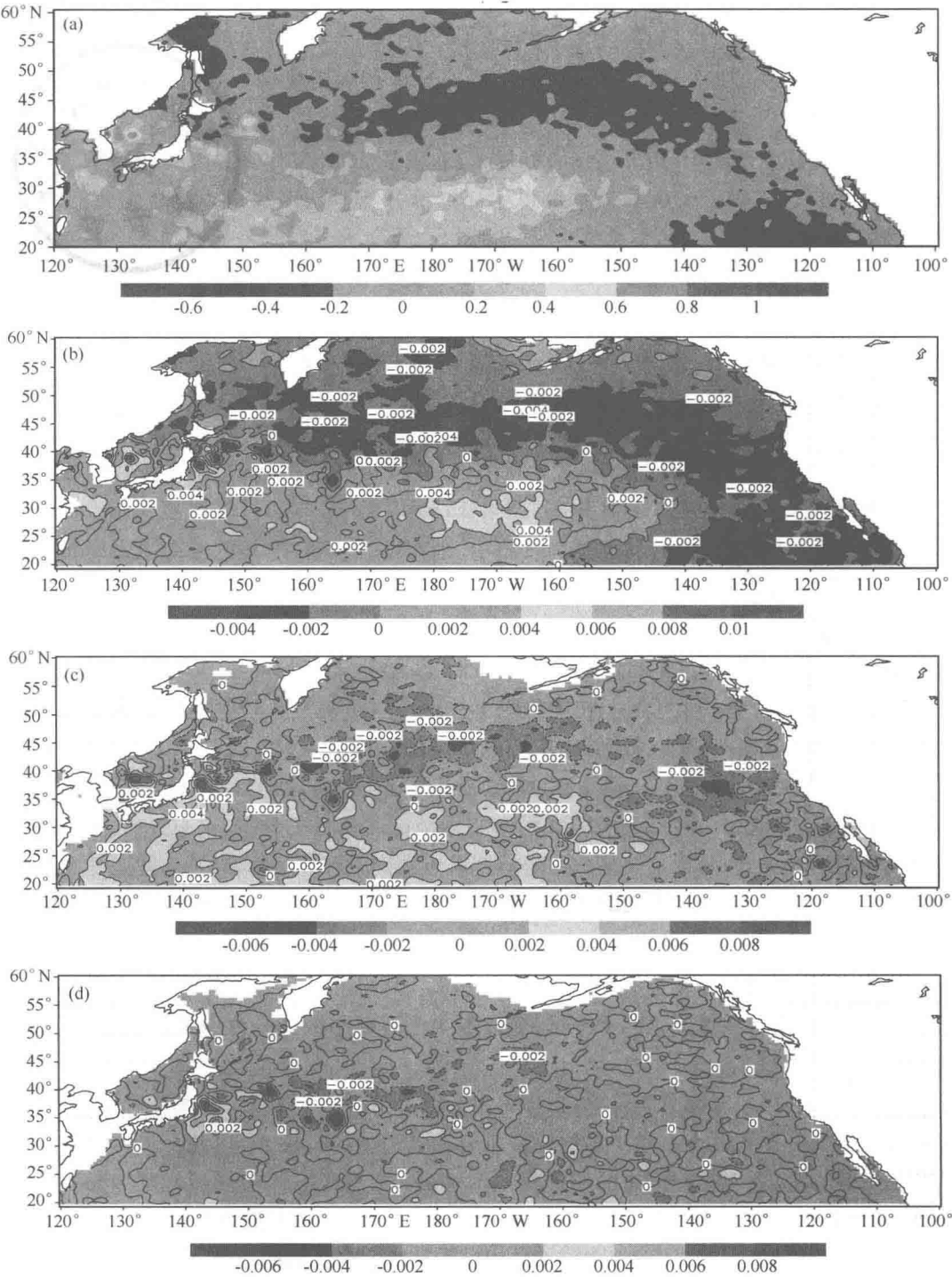


图 2.1 SSTA 对 NPGO 指数的回归系数场及上层海温 EOF 第二模态各深度的空间场
(a)回归系数场; (b)25.28 m; (c)112.32 m; (d)229.48 m