

国际上年代际到世纪时间尺度 气候变化的研究*

咸 鹏 李崇银

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 系统介绍国际上关于年代际和世纪时间尺度气候变化的最新研究, 并就其主要科学问题进行了概括, 以促进中国在这个领域的进步。

关键词: 年代际到世纪时间尺度; 气候变化

1 引言

地球气候一直处于变化之中, 其变化的时间尺度可以从季到千年, 甚至更长。10年到世纪时间尺度的气候变化可以导致持续的干旱或洪水, 可使重大的天气现象的发生和分布维持多年异常。它也可以影响短期事件的特征, 如 El Niño 的发生频率、持续时间和强度。这些气候的长期变化对社会的政治和经济的影响有可能大大超过短期变化。它可严重影响到农业、能源、渔业、保险业和运输等各个经济领域。而且, 水源、水质、空气质量、人类健康和自然生态环境也会因之受到重大影响。20 世纪七八十年代, 非洲持续 20 年之久的干旱使许多国家出现严重的粮食危机, 上百万人处于饥荒之中; 美国 20 世纪 30 年代持续时间长且影响范围广的干旱也是年代际气候变化给人类社会带来巨大影响的著名事件。除了气候的自然变化外, 人类活动也在逐渐影响着气候的长期变化, 特别是工业生产和人类生活造成的大气中温室气体含量的急剧增加所引起的全球增暖。

目前, 对季-年际时间尺度的研究和预报已取得了丰硕的成果, 这给人们以勇气和信心来研究和预报更广空间尺度和更长时间尺度的气候变化。通过对古气候的研究、考古资料、大气和海洋资料的分析, 人们扩展了年代际到世纪时间尺度变化的记录。通过对观测的分析和对气候系统的模拟, 人们提高了对年代际到世纪时间尺度气候变化的认识。本文从以下几个方面综述国际上年代际到世纪时间尺度气候变化的研究。

2 年代际到世纪时间尺度气候变化型

2.1 大气中的气候型

(1) 北大西洋涛动型 (NAO 型): 通常由海平面气压 (Sea Level Pressure, SLP)

2000-01-28 收到, 2001-03-17 收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040903 和中国科学院创新项目 KZCX2-203 共同资助

来定义。它有一基本固定的空间型,其振幅和位相变化的时间尺度从季节内到年代际,最大振幅一般出现在冬季。NAO 指数经常定义为冰岛低压和亚速尔高压之间的气压差。一般来讲,指数高时冰岛低压强,北冰洋冷气团对北美东海岸的影响增强,并使得西风在冬季携带更暖更湿的气团进入欧洲西部。因此,NAO 异常与下游如欧洲、俄罗斯和西伯利亚冬季的气温和降水有关。它还与北大西洋热盐环流(Thermohaline Circulation, THC)的变化、欧洲冰盖的平衡、印度季风和北非尘土的大气输送有关。

(2) 太平洋-北美遥相关型(PNA 型):它代表了北太平洋和北美大气的大尺度遥相关。在 500 hPa 高度上,有 4 个中心:夏威夷附近,北太平洋、加拿大的艾伯塔和美国的湾流海岸。PNA 指数是根据这 4 个中心的 500 hPa 异常来定义的。PNA 同时也反映在 SLP 上,人们据此定义了北太平洋指数 NPI^[1]。人们推测 PNA 和 NPI 的年代际变化与赤道太平洋的年代际变化有关。

(3) 其他区域型:如北太平洋涛动(NPO)、西太平洋(WP)涛动、西大西洋(WA)型和太平洋 10 年涛动,这里就不一一介绍了。

(4) Cold Ocean-Warm Land (COWL):Wallace 等^[2]提出的 COWL 并不是一个气候变化的基本型,也不是一个特殊的气候现象。它只是简单地代表一个特殊的近表面气温异常的地理分布,主要反映海洋和陆地间热惯性的对比。可以说 COWL 型是一个北半球的冬季现象——大陆气团在冷季对平均地表气温的影响。尽管 COWL 型显出短期记忆,但也有大尺度的变化,这对过去 20 年全球变暖特别重要。COWL 型的低频变化似乎与北美西北部和欧洲大陆同时的长期地表增暖有关,并且与 PNA 型和 NAO 型的位相一致有关系。

2.2 气候系统中的协同变化:耦合型

(1) 热带大西洋变化:研究^[3]表明,热带大西洋海表温度(SST)异常与北非的土壤湿度、反照率、地表粗糙度有强相关;非洲和巴西的热带降雨大部分也可归因于 SST 异常。热带大西洋在 SST 变化上表现出一致的结构。由经验正交函数分析得到的 SST 主分量经常表现为热带北大西洋是个暖池,而热带南大西洋则是个冷池,反之亦然。两中心的活动在 10 年尺度上是一致的,但在较短的时间尺度上变化是独立的。许多人简单地把它称作热带 SST10 年变化,但这种现象有时还是被称为热带大西洋偶极子。

(2) 北大西洋变化:Kushnir 考查了北大西洋 SLP、SST 和海表风速的观测记录中的多年代际变化,发现了 20 世纪的两个冷、暖期;每个时期都超过了 10 年^[4]。暖期,南格陵兰附近 SST 呈正异常,而沿美国东海岸 SST 呈负异常。同时的 SLP 和风异常表明冰岛低压的位置偏南,副热带信风减弱,并且 NAO 减弱。Kushnir 认为,观测记录中这些多年代际的变化受到大尺度的大洋环流和大气间海盆尺度的相互作用的控制。准 10 年循环中 SST 和风异常的空间关系与海-气耦合的理论是一致的。同时,还有一件非常引人瞩目的事件,即始于 1968 年拉布拉多海的盐度高度异常事件(人们称之为 GSA),它导致了在更长时间尺度上影响大气的海洋 THC 的变化。

(3) 太平洋类似 ENSO 的年代际型:Tanimoto 等^[5]和 Zhang 等^[6]的研究把全球 SST 场的 EOF 主分量的时间变化分为两部分:一部分与 ENSO 变化一致,主要反映了

年际变化; 另一部分是线性独立的“剩余”部分(即全球 EOF 减 ENSO), 主要表现出 10 年到世纪时间尺度的变化(见图 1, 均为标准化变量)。两部分在全球 SST、SLP 和环流上表现出相似的空间信号。剩余型的 SST 场不像年际型那样在东太平洋被限定在赤道附近, 它的影响范围大一些, 且在北太平洋有较大的温带信号。这一类似 ENSO 型的 SST 与北太平洋中纬大气及海洋的异常看来是遥相关的。类似 ENSO 的年代际异常穿越热带, 与热带大西洋和印度洋 SST 同步的变化也是遥相关的。由于其巨大的空间影响力和与短时间尺度 ENSO 现象的明显关系, 近来得到了广泛的关注。

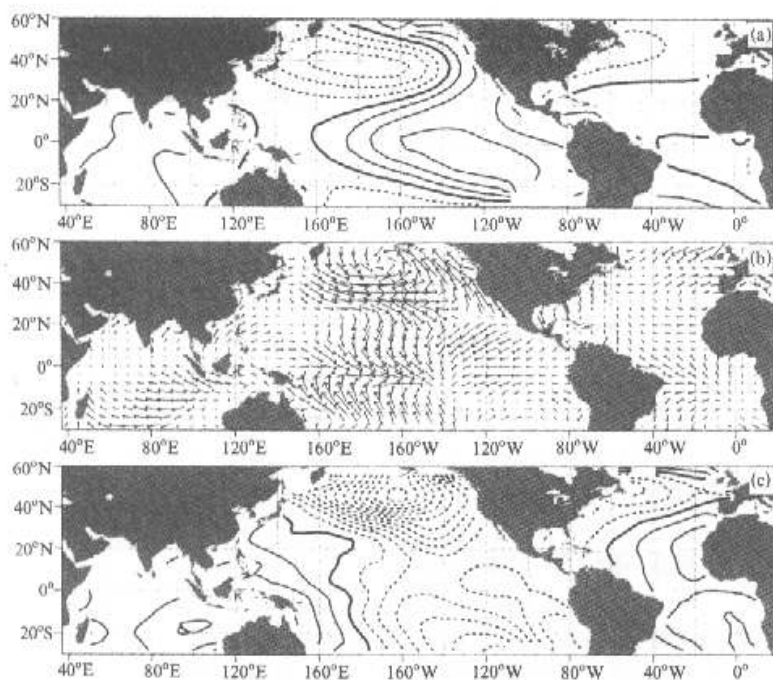


图 1 类似 ENSO 的 SST 型 (a)、风应力 (b) 和海平面气压 (c) [6]
(a) SST 等值线间距为 0.1 K; (b) 风应力最长的矢量代表 $8.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$; (c) 海平面气压等值线间距为 0.1 hPa, 负值极点在阿留申低压附近, 值为 1.3 hPa (虚线代表负值, 加粗线为零值线)

(4) 太平洋夏季变化: 研究^[7]指出, 1952~1981 年期间, 北太平洋夏季 SST 有长期变化趋势, 且 SST 的变化与海上层云的长期趋势呈强烈的负相关。这种强相关与气候平均的 SST 梯度在区域上吻合, 它可能部分起因于持续的从冬至夏的 SST 异常。

(5) 北冰洋变化: Walsh 等^[8]考查长期的北冰洋 SLP 资料时, 发现 20 世纪 80 年代中后期, 年平均的 SLP 下降了很多, 且 SLP 的低异常一直持续到 1994 年(资料的最后)。北冰洋中部的异常最大。异常全年存在, 冬季最强。Thompson 和 Wallace^[9]发现北冰洋大气环流和 NAO 的大趋势在过去 30 年里是相关的。他们认为最好用变化的行星尺度模来描述这些大尺度 10 年趋势, 即用区域范围延伸到北大西洋的北冰洋涛动 AO 来描述。

(6) 南极变化: 南大洋有一完全不同的包括海冰、表面风、SST 和 SLP 在内的气

候型。特别是南极绕极波,它以沿南极极锋的月平均偏差协同变化为特征^[10]。它也与 ENSO 和印度洋季风的时间变化^[11]有很好的相关。

3 年代际到世纪时间尺度气候变化的机制

3.1 外强迫

太阳辐射的变化、火山爆发、有机物燃烧及工业生产排放的气溶胶、排入大气的有辐射活性的气体都属于外强迫的范畴。若强迫本身不可预报,则由它们引起的大气变化也不可预报。

3.2 内强迫

我们可以把年代际变化的内部强迫机制分为 3 种:气候系统的慢成分被快变成成分(大气高频)强迫引起的;由海洋、大气、冰雪圈、生物圈的缓慢内部变化而引起的;由气候系统的组成部分所耦合引起的。

3.3 耦合作用

太平洋上大尺度的年代际变化在热带地区表现为 SST 有类似 ENSO 的特征,在北太平洋 SST 有强烈的反相变化。虽其变化机制还未弄清楚,但许多人提出了不同的原因,包括 ENSO 本身固有的非线性机制^[12]、ENSO 与季节循环间的相互作用^[13]、ENSO 与其他不稳定的海-气耦合模之间的相互作用^[14]、线性稳定的耦合系统的随机强迫^[15]、可导致年际 ENSO 变化的振幅和频率改变的浅的热带 THC 的低频变化^[16]。根据海洋和海-气模式对气候 10 年至 100 年变化机制的模拟,已提出了一些理论,包括随机强迫、耦合的海-气模^[17,18]和 ENSO 变化。

4 大气环流的年代际变化及机制

4.1 大气环流的年代际变化

大气是气候系统中反应最快的元素,其环流或运动系统是最活跃的。它的运动在时间和空间尺度上都很广。

全球和半球平均气温都有年代际变化。Jones 等^[19,20]用相对较短的记录(135 年的长度)发现了 15~25 年的近似周期,后来又用有年分辨率的较长的代用资料^[21,22]以及最长的器测气温资料(335 年的局地气温)^[23]证明了这种周期性变化。大气环流 10 年变化的一个显著例子是:全球平均气温在 1950~1959 和 1980~1989 两个 10 年段都是暖期,但在地表气温异常的地理分布上来说,两个时段却非常不同,这说明大气环流显著地改变了。有人描写了南半球大气环流年际变化的两个主导模,这两个模态的指数表明两模态在过去 90 年中表现出明显的 10 年变化^[24]。

在热带,海-气相互作用导致了特殊的气候信号——ENSO,它有显著的年际变化,而且近年来其十年至更长时间尺度的变化也得到关注。特别是东赤道太平洋 SST 的持续暖期和南方涛动指数负值使人们对热带十年际变化的产生、热带变化和中纬大气环流之间的联系有多种推测。由于 ENSO 对全球气候的指示性,我们应努力弄清热带的年代际变化。其他重要的热带年代际变化的例子是季风和萨赫勒降水的长期变化。

中纬大气环流的低频变化, 像 SLP 和位势高度的异常分布反映出的那样, 显示了不同的空间型。与 PNA、NAO 等遥相关型有关的气压波动调整着其影响区域内气温的径向分布、水分的平流和对流, 在冬季尤其清楚。这些遥相关型也有 10 年和更长时间尺度的变化。例如, 阿留申低压区的冬季 SLP 在 1977~1988 年间一直维持在较低的水平。

在北大西洋, 自 20 世纪 60 年代以来, 冰岛低压区的 SLP 一直在下降, 而亚速尔高压中心的 SLP 在升高^[25]。

4.2 机制

控制大气环流变化的主要因子有 3 个: 外强迫 (太阳、火山、人类活动等)、大气与气候系统其他要素 (海洋、陆地、冰雪圈、生物圈) 间的相互作用、大气内部相互作用 (瞬变与瞬变、瞬变与平均及其他非线性相互作用)。

4.2.1 外强迫

大气环流与辐射外强迫间的关系还未完全明确。一些研究^[26]试图把大气环流变化与太阳周期性活动 (如 11 年和 22 年周期) 联系起来。卫星观测 (只有一个半太阳黑子周期那么长) 表明太阳黑子活动极大期的太阳辐射只比太阳黑子活动极小期的强一点。但因低层大气只吸收一小部分太阳辐射, 除非气候系统中存在正反馈, 否则难以看到这样的弱信号能影响气候, 所以这种机制并未得到完全证实^[27]。

火山爆发向对流层和平流层底部释放大量的气溶胶。平流层的气溶胶存在时间长一些, 且因为平流层风的影响而使之分布于全球。这些气溶胶导致一系列的辐射过程, 包括对太阳和陆地辐射的吸收, 而这些又对气候有重要影响。然而许多研究表明, 单个的强烈火山爆发只会影响大气较短的时间 (1~2 年)。

有人分析了全球气温与大气中二氧化碳浓度在年代际尺度上的相关, 认为二氧化碳在气候的年代际变化研究中也意义, 但还未找到合理的机制^[28]。

4.2.2 大气与气候系统其他要素间的相互作用

许多复杂的大气内部相互作用和大气与其他气候系统要素间作用会引起许多反馈, 或放大或减弱外强迫的影响。如大气环流决定着水汽、云、有辐射活性的气体、气溶胶的垂直和水平分布。这些成分的垂直和纬向分布影响地球的辐射强迫, 进而大气环流的变化又直接影响着全球平均气温及其水平和垂直分布。气温的变化反过来又影响风的分布和其辐合型, 导致蒸发和大气中水汽含量及其分布的变化, 并最终改变辐射强迫。

一般认为若大气不与气候系统其他要素发生作用, 则其变化的谱能量的增加不会超过一年。虽然这种说法有争论, 但大气环流不因外强迫而引起的 10 年到 100 年变化最可能是由大气与气候系统中的慢成分相互作用引起的。如海-气相互作用引发 ENSO 事件, 可能再通过遥相关引发中纬太平洋的 10 年变化^[29]。中纬直接的海-气相互作用也为人们所注意^[30]。Latif 把年代际海-气变化分为 4 种: 热带年代际变化, 包括热带和温带的年代际变化; 中纬包括风生大洋环流的年代际变化; 中纬包括 THC 的年代际变化^[31]。

大气环流对外强迫和气候系统要素相互作用的响应是遵守动力学规律的。一些特殊动力、热力机制可用来解释大气中的型和遥相关。有人认为 ENSO 的全球影响, 特别是对赤道外地区的影响是由于稳定的行星波在热带被深对流层加热所强迫而使能量分散

到中纬的结果^[32]。

4.2.3 大气内部的相互作用

大气中季节内、年际和年代际变化有相似的空间型表明：至少有一些型与大气内部变化的基本模有关。有人认为这些普通的空间型时间尺度的多样性可归因于大气边条件的变化影响一个或多个天气体系发生的频率这一事实^[33]。Horel 和 Mechoso 也为此提供了有力证据^[34]。

5 海洋及水循环的年代际到世纪时间尺度变化

5.1 海洋在气候变化中的作用

海洋在地球气候的形成和变化中起着举足轻重的作用，被认为是气候系统的最重要的组成部分。海洋的表层直接影响气候，因为海洋过程通过海气界面的交换影响着大气。而循环系统如风生环流和 THC 又把表层水和深层水联系起来，所以深层水也可以影响气候。最终我们要知道的是表层循环和 THC 系统如何单独及其同影响海洋表层和海洋内部特征是如何影响海洋表层。海洋通过三种途径参与气候系统：与大气、冰雪交换热量、水汽、CO₂；在热量、水、CO₂ 进入大气前，长时间地把它们存储在海洋深层；通过大尺度大洋环流（包括表层和深层）对热量、淡水、CO₂ 重新分配，从而影响这些成分在大气中的分布。因此，海洋通过这三种途径直接或间接地影响气候特征。

5.2 海洋年代际到世纪时间尺度变化的证据

海洋 10 年到世纪时间尺度的变化可以从对单站记录、分散的多站记录的分析得到，也可以从对珊瑚、海底沉积物、冰核、海边树木等代用资料的分析得到。但可惜的是，这些资料的时间长度有限，而且资料分散，不完整。几个大洋相较而言，大西洋的资料时间较长、密度较大，尤其是北大西洋，因此人们对大西洋的研究相对多一些。

5.2.1 大西洋

(1) 海温：大西洋 SST 在 10 年到世纪时间尺度上的变化是连续的。在北大西洋，与 NAO 长期变化一致的冷、暖期的时间尺度是多年代际的。在亚热带大西洋，南北偶极子的振荡周期近似于 10 年^[35]。近来，有一点越来越明确了：北大西洋的变化与亚热带偶极子的变化是同步的，大西洋宽度的振荡也许是存在的。从图 2 中可以看出这些海盆宽度的模态之间的联系^[36]。这种带状型与巴西东北部的降水强相关。

表面以下海水的温度也被记录下来。Levitus 于 1989 年发现 500 m 深处相隔 5 年的两个年平均之间的差别超过 0.5°C^[37]，有人也得出相似的结论^[38]。自 20 世纪 70 年代以来，百慕大附近上层海水的热容量有所增加，THC 也相应地移动了^[39]。这些观测反映了上层水团的性质和容积的多年代际变化，这是对动力（风强迫和 THC）及热力（表面浮力通量和相关的对流）变化的反应。

应当指出，年代际变化不只是限定在边缘海和边界流中。Levitus 等^[40]发现北大西洋副极地涡旋和亚热带涡旋内部深层和表层都有明显的年代际变化。这些变化说明北大西洋在年代际尺度上发生了热量和盐分的重新分配。

(2) 盐度：因为盐度并不是常规测量的，所以估计海表盐度的年代际变化要比 SST 难。然而，有一个著名的几乎有 20 年生命史的低盐事件，人们称之为 GSA

(Great Salinity Anomaly)。它首先在 1968 年于拉布拉多海被观测到, 于 1971 年达到盛期^[41]。GSA 从拉布拉多海向东移出, 进入亚极地涡旋南部并溶入冷的亚热带涡旋, 并在 20 世纪 80 年代早期于格陵兰和拉布拉多海附近再次出现。GSA 的产生是由于通过弗莱姆 (Fram) 海峡的海冰的交换增加, 且其随后的融化增加的缘故, 但这仍是一个有争论的问题。

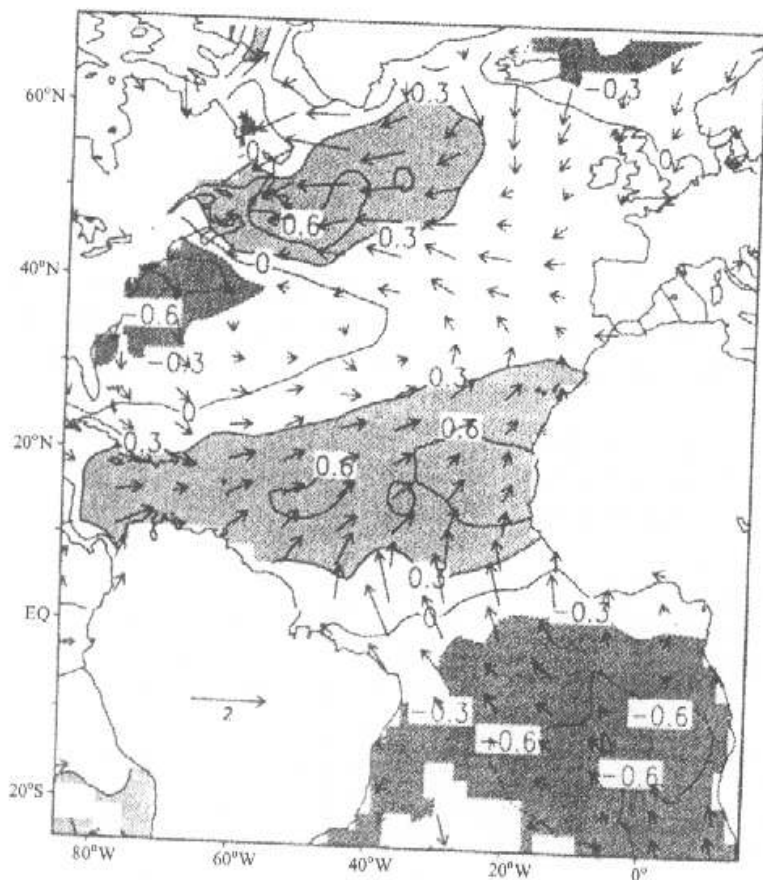


图2 热带偶极子指数 (定义为 10°N 和 15°S 区域间 SST 的差) 高的 6 年 (1969, 1970, 1978, 1980, 1981, 1982) 和指数低的 6 年 (1972, 1973, 1984, 1985, 1986) 海盆宽度年平均的 SST ($^{\circ}\text{C}$) 和风速 (m s^{-1}) 异常之差^[36]

Swift 讨论了近几十年北大西洋深层和上层水变淡的问题, 并推测这与风生洋流输送的长期变化有关^[42]。

(3) 热盐环流: 人们通过反复的剖面调查和站点的时间序列观测, 记录了拉布拉多海盆中水柱的年代际变化, 显示出 1992 年的对流要比 1966 年的强且深得多^[43]。图 3 的拉布拉多海温的时间序列也揭示了年代际特征^[44]。图 3 中也有 NAO 的时间演变, 总的来说, 它的变化与拉布拉多海的年代际过程是反相的。

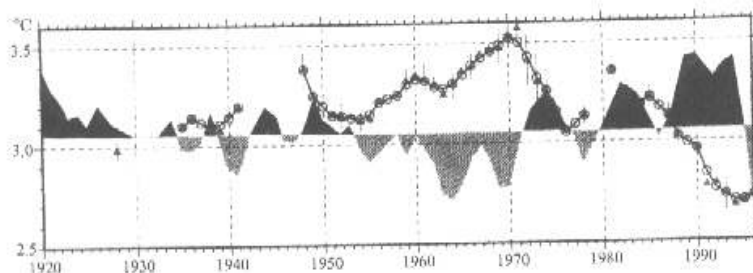


图3 低通滤波后的 NAO 指数 (阴影部分) 和拉布拉多海水的位温
(从海面到海底 2000 m 的平均位温, 用圈点线表示)^[44]

少量的观测也记录了南半球深层和底层水形成区的年代际变化。

(4) 海冰: Mysak 等^[45]分析了北冰洋和格陵兰、冰岛海上冰盖近 90 年的海冰密度和冰的边界资料, 发现海冰面积的 10 年尺度变化, 尤其在格陵兰和冰岛海, 并提出这种波动与北冰洋的其他过程在一个“负反馈圈”中相联系。Mysak 后又重温了这种自维持的气候振荡的证据, 并提供了加强其结论的新证据, 还认为北极圈与较低纬度年代际变化间有联系^[46]。

Dickson 描述了爱尔兰哥 (Irminger) 海和通过丹麦海峡的物理量交换和输送的年代际变化^[47]。他的工作是说明年代际变化对局地、区域和全球有各种不同影响的一个很好的例子, 也说明了海洋年代际变化的重要性。

5.2.2 太平洋

(1) 海温: 太平洋主要的 SST 变化前面已提到。图 1 中太平洋 SST 的年代际型与 PNA 型在年代际时间尺度上有强相关, 它可能是一个更大的包括印度洋甚至大西洋西北部的型的一部分。年代际型比 ENSO 型在热带有更宽的径向 SST 异常分布, 且中纬的 SST 比 ENSO 型明显要强一些。分析表明, 年代际型在热带和中纬有大小相当的强异常, 且其影响面积要比年际变化的大。因为这种模态在中纬的表现特别强, 所以称之为 PDO (Pacific Decadal Oscillation), 即太平洋年代际振荡。PDO 指数与北太平洋气压指数协同变化, 当北太平洋水温低时, 阿留申低压深厚, PNA 型变强。次表层水温有年际至 10 年际变化, 且随水的深度加深, 10 年际变化越来越明显。人们认为海水从高纬冷池沉入北太平洋亚热带涡旋的过程的时间尺度为 10 年或更长。

印度尼西亚海是太平洋和印度洋之间唯一的暖水通路。从印度洋 1900 年以后的资料分析中发现有明显的 SST 异常年代际变化^[48]。有人怀疑这种信号是太平洋通过印度尼西亚海传过来的^[49]。

(2) 大洋环流: 北太平洋副热带涡旋也有年代际变化。从 1970 年到 20 世纪 80 年代, 黑潮和北赤道洋流输送逐渐增强, 这表明风应力强迫增强了^[50]。有人发现, 1978~1982 年的副热带涡旋比 1939~1942 年的要强, 这也证明了风应力强迫的增强^[51]。有人总结了 1976~1988 年间北太平洋大气和海洋的年代际变化证据, 也证明了这一点, 并认为变化的可能原因在于北太平洋年代际时间尺度的变化与热带太平洋和印度洋的变

化之间的密切联系以及 El Niño 和 La Niña 事件的强度和频率的变化^[52]。示踪法的结果表明, 沉入北太平洋东部亚热带涡旋的海水被输送到热带太平洋的时间尺度可以是年代际的^[53], 而且可以在与 ENSO 有关的暖池和冷池下部找到这些海水。

因为太平洋的 THC 较大西洋的浅, 强度也不如大西洋的强, 而且资料也不很充足, 所以人们对它不如对大西洋 THC 那样关注, 研究也少得多。

5.2.3 南大洋

南大洋连接着世界三大洋, 使得全球尺度的环流存在, 为大洋间气候异常的热量和水分输送提供了一个海上通道。南大洋深处充满了极冷的大洋底水, 对全球温跃层以下的海水起到冷却作用, 还通过冷的、低盐极地表层水的下沉作用决定着南半球斜温层的结构。所以南大洋水团的形成和运动以及大洋间水团交流的变化都会对气候产生一定影响。

南半球高纬水文和气象资料相对缺乏, 建立南大西洋、南太平洋、南印度洋次表层变化的概念要比北半球难。尽管这样, 从有限的资料还是可以得到其年代际时间尺度变化的证据的。例如, 亚极地海域、塔斯曼海的中层、南太平洋和南印度洋都观测到与北大西洋深处量级相当的温度、盐度变化。南极绕极波是一种在 SST、SLP、海冰和表面风应力上都有表现的扰动, 它主要周期是年际的, 但在相对短的记录时段还是显出长时间尺度变化的成分。尽管有人认为它是局地现象, 但也有人认为它是全球性的, 并与 ENSO 有关。南极绕极波可能会影响中层和深层水的形成, 从而改变副热带涡旋的 THC 的特性, 并影响低纬, 扩大其影响的时空尺度。

5.3 海洋年代际到世纪时间尺度变化的机制

海洋在气候变化中的参与可以是被动的即只对大气强迫有反应, 也可以是主动的即通过海-气交换、潜没过程和对热量、水分、CO₂ 的重分配影响大气。

(1) 全球海洋过程: 与大气相比, 巨大的热量、动能和化学容量使得海洋是个慢变元素, 可以对有快速反应能力的大气进行慢调整。有些地方, 海-气交换只限定在近表层, 允许有快一些的过程。在季节和年际时间尺度上, 海洋对大气变化的反应基本上是同相的, 这反映了在短时间尺度上热量收支的局地平衡, 海洋近似可看作是被动的。然而, 对于更长的时间尺度来说, 情况就不是这样了, 海洋对异常的输送改变了热平衡, 进而影响大气变化的位相甚至方向。

表面温度和深层水温度有着巨大差异的 THC 及风生环流都从赤道向极地输送着热量, 它们的变化会产生长时间尺度的影响。还有一种伴随着热量侧向重分布的洋盆尺度的影响对较长时间尺度很重要。对短时间尺度来说, 局地表面热量的存储主要由垂直辐散来平衡。而对长时间尺度来说, 表面温度变化的速率代表着一种侧向平流和辐散之间的平衡^[54], 即表面异常被大洋表面缓慢、稳定的流动侧向化了, 这一热量的侧向重分布吞噬了局地热量的不平衡。

海洋热输送的能力是很显著的。在北纬 24°N, 海洋与大气净经向热输送的量大致相当^[55], 而海洋输送的效率大约是大气的两倍。另外, 调查研究表明, 对这一纬度热量的经向输送来说, 北大西洋的效率要比北太平洋高大约三倍^[56]。

(2) 淡水的输送: 海洋补充了大气对水汽的经向输送, 是水循环中的重要元素。不同大洋的净水通量有着显著的不同。例如, 北太平洋比北大西洋接收的降水多得多, 因

此, 北太平洋是个较淡的大洋, 不利于深水的形成和强的 THC 的维持。这就限制了它通过大量深水运输热量的能力。相反, 较咸的大西洋同时拥有深层水和中层水的发源地, 维持着有力的 THC, 使得更多的经向热量输送成为可能。大气中的水汽含量及其变化既是气候变化的表征之一, 又会对气候产生重要影响。海洋是大气中水汽的主要源地, 因此, 不同的海洋状况通过蒸发和凝结会对气候及其变化产生影响。

(3) 碳的输送: 海洋是碳的大储库, 调节着 CO_2 的变化和全球碳分配。通过影响大气 CO_2 的浓度, 海洋间接影响地球的辐射收支和气候系统的能量平衡。海洋通过两种方式吸收 CO_2 : 溶解吸收和生物吸收。伴随着局地、区域和全球大洋动力和热力变化的反馈过程使得大洋吸收 CO_2 的量很难确定。

(4) 局地海洋过程: 海洋在年代际到世纪气候变化中的作用包括 3 个局地机制: 首先, 海洋对强迫史作了完整的记录。沿表层或 THC 的路径向下越深, 记录就越久远。随着带有气候信息的水下沉, 后又返回水面, THC 暂时储存了气候状况并影响到将来气候变化的演变。这可以理解为海洋的记忆能力。其次, 在一些地区, 混合层的水文状况潜入 THC, 这个过程重组了垂直分层, 改变了平流场和平流作用区的物理性质分布, 从而调整了海洋的热量、水分、 CO_2 分布。这种混合层水的潜在海洋影响气候变化中很重要。第三是使次表层水重新进入混合层的过程。因此, 经过一段时间的潜没, THC 储存的物理属性如热量等通过混合层重又进入海-气交换。这些都是海洋主动去影响大气的过程。

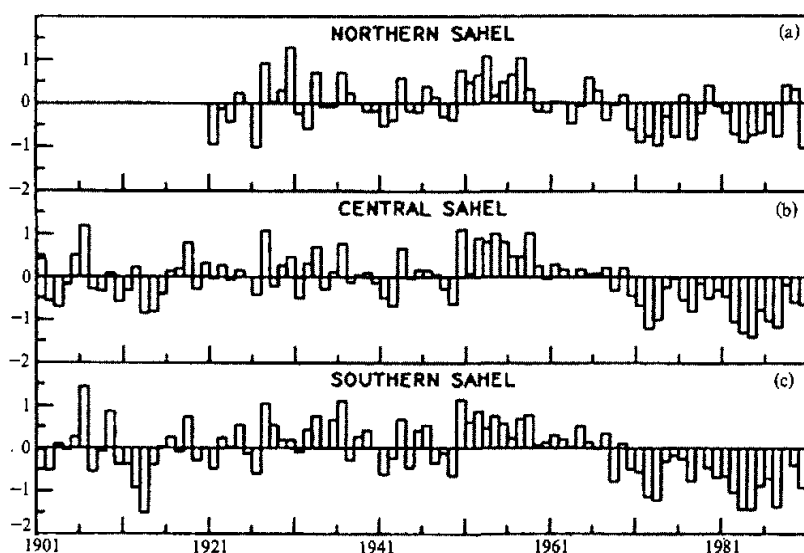
(5) 内部海洋变化机制: 在海洋模式中, 有一些纯的、无大气参与的海洋内部的相互作用也显示出年代际变化。单纯海洋机制大多包括到达海水源地并且改变了海水密度的异常, 从而这些异常也影响了深层水形成的速度。有人提出了这类年代际变化的纯平流机制^[57]。还有一些气候变化机制包括了耦合的海洋和大气, 但海洋在其中扮演了主要角色。Chang 等于 1997 年对热带大西洋的 SST 偶极子年代际振荡提出了一个热力机制: 由风引起的潜热异常可以引发并维持跨赤道 SST 偶极子的热通量异常^[58]。

5.4 其他水分的年代际变化及机制

(1) 水分的年代际变化: 很多证据表明在中纬度地区, 气温、降水及径流的季节性都经历了明显的 10 年到世纪时间尺度的变化^[59]。尽管一些增暖和变湿的年循环的强度和时间与 ENSO 活动有关, 但仍有一些 10 年到世纪时间尺度的变化趋势人们尚不能解释。

世界陆地上水的年代际变化最明显的地方是萨赫勒和美国。在美国, 这种变化不仅表现在降水上, 还表现在径流量和水储量上, 大量的古气候代用资料也证实了这一点。Nicholson 的研究表明萨赫勒地区降水的高频变化不明显, 而 7 年或更长时间尺度的变化很显著, 干季和湿季都趋于维持 10~20 年 (见图 4), 且年代际异常的特征在以前的世纪中也存在^[60]。

(2) 水循环的变化有其内部的、耦合的和外部的机制。考虑到后者, 一般认为温室气体进入大气后, 会引起地表升温, 从而加速水循环, 全球总的蒸发和降水都会增加。这是模式中对温室增温模拟的一致结论。耦合机制影响水循环的例子很容易举出, 如萨赫勒和美国降水的变化。其他地区如巴西 Nordeste 和澳大利亚的降水也是因为这种机制^[61]。以萨赫勒为例, 其降水与热带大西洋的 SST 变化相关^[62], 大部分 SST 的变化似

图4 萨赫勒区域平均的标准化降水时间变化图^[60]

乎又与大西洋赤道辐合带 (ITCZ) 平均位置的偶极子的振荡有关^[63]。大西洋中一些在年际尺度上影响 ITCZ 位置的与 SST 有关的过程似乎在年代际尺度上也有影响。为什么海洋中主要是年际尺度的变化会在更长时间尺度上影响萨赫勒的降水是一个有待弄清的问题。已有的两种可能解释是: 一, 萨赫勒的降水和植被可能由一负反馈联系起来; 二, 地球上其他地区, 特别是印度洋, 的 SST 变化时间尺度可能比大西洋更长, 对萨赫勒的降水产生了年代际的调节^[64]。水循环速度的变化影响着降水和蒸发的收支, 这两个过程的联系可以产生变化的内部模。但人们对它的认识还较浅薄, 复杂的内部机制还有待于进一步研究。径流量在北冰洋气候和 THC 中起重要作用; 复杂的大尺度反馈圈把大气对流、环流与水循环、北冰洋径流、海冰的形成、淡水的输送及 THC 联系起来。这种关系还需要更彻底的调查研究。

地下水对气候变化的反应尺度为 10 到 1000 年。一些人为过程 (对地下水的抽取) 和自然过程 (地下水和表层水系统的交换) 在 10 年到世纪时间尺度上影响着地下径流。全球水在大气、海洋、地表、次表面的暂时分布会因地下水被抽取而受到影响, 但该过程对水汽、降水和云的影响还不清楚。

6 年代际到世纪时间尺度气候变化的可预报性

变化机制的特性决定着年代际变化是否可预报。目前, 一些最令人瞩目的年代际现象的机制还不是很清楚。如果自然年代际变化是外强迫引起的, 则不能提前 10 年把它们预报出来, 因为其强迫被认为是不可预报的。如果 Hasselmann 理论正确, 则预报尺

度限定在系统慢成分（通常为海洋的自相关）时间尺度上。Hasselmann 理论认为大气通过不同种类的不稳定，产生高频变化，当慢成分（如海洋）与之相遇并受它强迫时，高频部分阻尼为缓变成分，即该理论认为大气在年代际变化中起主导作用^[65]。如果海洋是长期气候系统变化的驱动者，则其环流有惰性的事实给初始化的年代际时间尺度预报一些希望：低分辨率耦合模式的最初试验表明加在北大西洋初始状态上的偏差增长很慢，SST 和海平面高度是可提前 10 年预报的^[66]。以下将分别论述外强迫、大气环流、海洋及其他水循环的可预报性。

6.1 外强迫

太阳辐射、火山爆发和人类活动释放的温室气体和气溶胶都是气候系统变化的外部因子。目前，除了太阳黑子可预报外，其他暂时都不可预报。如，温室气体预报的不确定性来自释放地点的不确定和我们对许多反馈过程的认识以及模式模拟的能力的局限。

6.2 大气环流

对热带的研究有了丰硕的成果，那就是 ENSO 可以提前一年或更长时间做出预报。对一些季节尺度的大气现象如热带气旋和半干旱地区的降水的预报也显示出有一定的技术。但是，对更长时间尺度的预报能力还不得而知。20 世纪 90 年代早期，ENSO 预报准确度的下降使人们意识到 10 年和更长时间尺度的气候变化的重要性。人们假定，太平洋海—气系统的 10 年变化导致了近来 ENSO 特性的改变^[67]。尽管最近的模拟结果显示，直接关联到大气环流和 PNA 型的北太平洋 SLP 型有望提前 5~6 年做出预报，但对于气候在 10 年到世纪时间尺度上的可预报性我们知道的还很少。很明显，除非气候模式能够描写器测和代用资料中的年代际变化的范围，这一问题才能得到解决。

6.3 大洋环流

对长时间尺度海洋演变的预报来说，还需要增进对海洋输送热量的过程、影响 SST 的耦合过程和热量、水分、CO₂ 的辐散（净通量）过程的了解和模拟，需要进一步认识这些过程在时间、空间尺度上如何变化及它们依赖什么而变化，并提高对它们的模拟。大洋环流年代际变化的预报本身有一个难题，那就是：考虑到越来越长的时间尺度，需要包括的海洋信息就越来越多，与此同时，还必须处理小尺度过程，因此，有着不同时间、空间尺度的大量的分散过程必须并入预报模式中。这对计算能力是个巨大的挑战。例如，THC 的速度、容量、特性和路径对控制对流地点、深度和速度及对流的混合程度的区域过程很敏感，同时对边界层的处理也很敏感。在很大程度上强迫着上层海洋的中层水也受到细微的局地过程如对流、海洋边缘过程的影响。除了提高对这些过程的认识和模拟外，还必须正确模拟大尺度型的变化和协同变化以及正确捕捉海洋变化的演变和一般的统计特征。

最有希望的初始化预报是用海—气耦合模式。预报的结果依赖于耦合的程度和对决定涛动时间尺度的海洋内部现象的模拟。

6.4 其他水循环

成功的预报需要提高对那些控制大气中水汽含量的复杂过程和大气反馈机制的认识。目前，还不能说在预报水循环对外强迫引起的变化的反应中会如何地成功，因为对水循环现有功能的认识还不完全。相互作用的生态、水和气候系统中一些元素间反馈的方向依旧是人们讨论的问题。机制的多尺度特征使之更加复杂。然而，对于依赖 SST

变化的陆地降水的变化, 有希望提前几年预报。如果模式中海洋能被准确地初始化并且大气的“噪音”不能完全遮盖产生于海洋深处并能最终达到海洋表面的信号, 则这种类型的 SST 的预报是有可能实现的。赤道太平洋上大气的“噪音”较小, 并且这一区域的 SST 影响到美国的降水和气温, 很多人利用这一点做美国的降水和径流的预报。其他对水循环的预报很重要的因素是云物理过程和云辐射反馈过程。尽管云过程(如云的形成和结构的变化)发生在很短的时间内, 但其系统特征的变化可以有长时间尺度的影响, 应进一步了解其时间、空间分布和内部特征。

7 尚待研究的几个问题

由以上的介绍可以看出, 近些年来, 国际上关于年代际气候变化的研究取得了很大进展, 但是, 这些研究还只是初步的, 还有许多问题尚待进一步研究。

(1) 关于年代际变化的时间、空间型及机制: 各种型的寿命及它们的时间、空间变化是怎样的? 描写已知型的最好方式是什么? 是否还有其他令人感兴趣的型存在? 产生、维持和改变这些型的机制又是什么?

(2) 自然的 10 年到世纪时间尺度的变化与观测到的全球变暖的关系如何? 为检测人类活动引起的变化, 关于自然变化我们需要知道些什么? 由于自然和人类引起的变化掺杂在一起, 各种耦合和相互作用使之复杂, 而且目前观测资料的长度有限, 各部分引起的变化难以准确量化, 所以这一问题还不清楚。

(3) 关于自然和人类强迫的变化如何影响气候的 10 年到世纪时间尺度的变化: 它们通过什么机制来影响以及影响的程度如何? 如: 温室气体在年代际时间尺度上如何变化? 这与气候变化有何联系? 器测和古气候记录中, 年代际变化在多大程度上与太阳能输出的变化相关, 气候对太阳辐射变化反应的机制又如何?

(4) 气候组成各部分间的相互作用在产生和维持 10 年到世纪时间尺度变化中的作用是什么?

(5) 关于 10 年到世纪时间尺度气候变化的可预报性: 这有赖于气候系统各要素的可预报性。

总之, 气候年代际时间尺度的变化还存在着许多需要解决的问题, 这些问题正吸引着各国学者的注意。目前, 国际上正在实行 CLIVER 计划, 它是 21 世纪的气候变化及其可预报性的研究计划, 其三个子计划之一 CLIVER-DenCen 计划就是研究 10 年到世纪时间尺度的问题, 且特别突出海洋对气候变化的作用。可以预言, 通过 CLIVER-DenCen 计划的实施, 人们对于年代际到世纪气候变化的认识将会有更加深入。

参 考 文 献

- 1 Trenberth, K., Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1990, 71, 988~993.
- 2 Wallace, J. M., Y. Zhang and J. A. Renwick, Dynamic contribution to hemispheric mean temperature trends,

- Science*, 1995, **270**, 780~783.
- 3 Nicholson, S. E., Long-term changes in African rainfall, *Weather*, 1989, **44**, 46~56.
 - 4 Kushnir, Y., Interdecadal variations in North Atlantic Sea surface temperature and associated atmospheric conditions, *J. Climate*, 1994, **9**, 1208~1220.
 - 5 Tanimoto, Y., N. Iwasaka, K. Hanawa and Y. Toba, Characteristic variations of sea surfaces temperature with multiple time scales in the North Pacific, *J. Climate*, 1993, **6**, 1153~1160.
 - 6 Zhang, Y., J. M. Wallace and D. S. Battisti, ENSO-like decadal-to-century scale variability: 1900-93, *J. Climate*, 1997, **10**, 1004~1020.
 - 7 Norris, J. and C. Leovy, Interannual variability in stratiform cloudiness and sea surface temperature, *J. Climate*, 1994, **7**, 1915~1925.
 - 8 Walsh, J. E., W. L. Chapman and T. L. Shy, Recent decrease of sea level pressure in the central Arctic, *J. Climate*, 1996, **9**, 480~486.
 - 9 Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, The Arctic oscillation signature in the winter-time geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**, 1297~1300.
 - 10 White, W. B. and R. Peterson, An antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature, and sea ice extent, *Nature*, 1996, **380**, 699~702.
 - 11 Yuan, X., M. A. Cane and D. G. Martinson, Climate variations: cycling around the south pole, *Nature*, 1996, **380**, 673~674.
 - 12 Munnich, M., M. A. Cane and S. E. Zebiak, A study of self-excited oscillations of the tropical ocean-atmosphere system. II. Nonlinear cases, *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**, 1238~1248.
 - 13 Jin, F.-F., J. D. Neelin and M. Ghil, El Nino on the Devil's staircase: annual subharmonic steps to chaos, *Science*, 1994, **264**, 70~72.
 - 14 Mantua, N. J. and D. S. Battisti, Evidence for the delayed oscillator mechanism for ENSO: the "observed" oceanic Kelvin mode in the far western Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, **24**, 691~699.
 - 15 Penland, C. and P. D. Sardeshmukh, The optimal growth of tropical sea surface temperature anomalies, *J. Climate*, 1995, **6**, 1067~1076.
 - 16 Gu, D., S. G. H. Philander, Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics, *Science*, 1997, **275**, 805~807.
 - 17 Hirst, A. C., Unstable and damped equatorial modes in simple coupled ocean-atmosphere models, *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**, 606~630.
 - 18 Latif, M. and T. P. Barnett, Causes of decadal climate variability over the North Pacific / North American sector, *Science*, 1994, **266**, 634~637.
 - 19 Jones, P. D., S. C. B. Raper, R. S. Bradley, H. F. Diaz, P. M. Kelly and T. M. L. Wigley, Northern Hemisphere surface air temperature variations, 1851-1984, *J. Clim. Appl. Meteor.*, 1986, **25**, 161~179.
 - 20 Jones, P. D., T. M. L. Wigley and P. B. Wright, Global temperature variations between 1861 and 1984, *Nature*, 1986, **322**, 430~434.
 - 21 Quinn, T. M., T. J. Crowley and F. W. Taylor, New stable isotope result from a 173-year coral from Espiritu Santo, *Vanuatu. Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**, 3413~3416.
 - 22 Biondi, F., C. B. Lange, M. K. Hughes and W. H. Herger, Interdecadal signals during the last millennium (AD 1117-1992) in the varve record of Santa Barbara basin, California, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**, 193~196.
 - 23 Plaut, G., M. Ghil, and R. Vautard, Interannual and interdecadal variability in 335 years of central England temperatures, *Science*, 1995, **268**, 710~713.
 - 24 Karoly, D. J., Observed variability of the Southern Hemisphere atmospheric circulation, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington, D. C., 1995, 111~118.
 - 25 Hurrell, J. W., Decadal trends in the North Atlantic oscillation: regional temperature and precipitation, *Science*, 1995, **269**, 676~679.
 - 26 Lean, J., J. Beer and R. Bradley, Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**, 3195~3198.
 - 27 Hansen, J. and A. Lacis, Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change, *Nature*, 1990, **346**, 713~719.

- 28 Keeling, C. D. and T. P. Whorf, Decadal oscillations in global temperature and atmospheric carbon dioxide, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington, D. C., 1995, 97~109.
- 29 Graham, N. E., Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results, *Climate Dyn.*, 1994, **10**, 135~162.
- 30 Barsugli, J. J. and D. S. Battisti, The basic effects of atmosphere-ocean thermal coupling on midlatitude variability, *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**, 477~493.
- 31 Latif, M., Dynamics of interdecadal variability in coupled ocean-atmosphere models, *J. Climate*, 1998, **11**, 602~624.
- 32 Hoskins, B. and D. J. Karoly, The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**, 1179~1196.
- 33 Ghil, M., S. Childress, Topics in Geophysical Fluid Dynamics: Atmospheric Dynamics, Dynamo Theory and Climate Dynamics, Springer-Verlag, New York, 1987. 485pp.
- 34 Horel, J. D. and C. R. Mechoso, Observed and simulated intraseasonal variability of the wintertime planetary circulation, *J. Climate*, 1988, **1**, 582~599.
- 35 Mehta, V. M. and T. Delworth, Decadal variability of the tropical Atlantic ocean surface temperature in shipboard measurements and in a global ocean-atmosphere model, *J. Climate*, 1995, **8**, 172~190.
- 36 Xie, S.-P. and Y. Tanimoto, A pan-Atlantic decadal climate oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**, 2185~2188.
- 37 Levitus, S., Interpentadal variability of temperature and salinity at intermediate depths of the North Atlantic Ocean, 1970-74 versus 1955-59, *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**, 6091~6131.
- 38 Parilla, G., A. Lavin, H. Bryden, M. Garcia and R. Millard, Rising temperatures in the subtropical North Atlantic Ocean over the past 35 years, *Nature*, 1994, **369**, 48~51.
- 39 Joyce, T. M. and P. Robbins, The long-term hydrographic record at Bermuda, *J. Climate*, 1996, **9**, 3121~3131.
- 40 Levitus, S., J. I. Antonov, Zhou Z., H. Dooley, V. Tsereschenkov, K. Selemenov and A. F. Michaels., Observational evidence of decadal-scale variability of the North Atlantic Ocean, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington D. C., 1995, 318~324.
- 41 Dickson, R. R., J. Meincke, S. A. Malmberg and A. J. Lee, The "Great Salinity Anomaly" in the northern North Atlantic 1968-1982, *Prog. Oceanogr.*, 1988, **20**, 103~151.
- 42 Swift, J. H., A few notes on a recent deep-water freshening, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington D.C., 1995, 290~294.
- 43 Lazier, J. R., The salinity decrease in the Labrador Sea over the past thirty years, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. Ghil, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington D.C., 1995, 295~302.
- 44 McCartney, M. S., R. G. Curry and H. F. Bezdek, The interdecadal warming and cooling of Labrador Sea Water. ACCP Notes IV, 1997, 1~11.
- 45 Mysak, L. A., D. K. Manak and R. F. Marsden, Sea ice anomalies in the Greenland and Labrador Seas during 1901-1984 and their relation to an interdecadal Arctic climate cycle, *Climate Dyn.*, 1990, **5**, 11~133.
- 46 Mysak, L. A., Decadal-scale variability of ice cover and climate in the Arctic Ocean and Greenland and Iceland Seas, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington, D.C., 1995, 253~261.
- 47 Dickson, R. R., The local, regional, and global significance of exchanges through the 51Denmark Strait and Irminger Sea, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington, D.C., 1995, 305~316.
- 48 Allan, R. J., J. A. Lindesay and C. J. C. Reason, Multidecadal variability in the climate system over the Indian Ocean region during the austral summer, *J. Climate*, 1995, **8**, 1853~1873.

- 49 Reason, C. J. C., R. J. Allan and J. A. Lindesay, Evidence for the influence of remote forcing on interdecadal variability in the southern Indian Ocean, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**, 11867~11882.
- 50 Qiu, B. and F.-F. Jin, Antarctic circumpolar waves: an indication of ocean-atmosphere coupling in the extratropics, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**, 2585~2588.
- 51 Bingham, F. M., Formation and spreading of subtropic model water in the North Pacific, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 11177~11189.
- 52 Trenberth, K. E. and J. W. Hurrell, Decadal climate variations in the Pacific, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington, D.C., 1995, 472~480.
- 53 Fine, R. A., W. H. Peterson and H. G. Ostlund, Penetration of tritium into the tropical Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, 1987, **17**, 553~564.
- 54 Moisan, J. R. and P. P. Niiler, The seasonal heat budget of the North Pacific: net heat flux and surface storage rates (1950~1990), *J. Phys. Oceanogr.*, 1998, **28**, 404~421.
- 55 Trenberth, K. E. and Solomon, The global heat balance: heat transports in the atmosphere and ocean, *Climate Dyn.*, 1994, **10**, 107~134.
- 56 Bryden, H. L., D. Roemmich and J. Church, Oceanic heat transport across 24 degrees N in the Pacific, *Deep-Sea Res.*, 1991, **37**, 297~324.
- 57 Weaver, A. J. and E. S. Sarachik, Evidence for decadal variability in an ocean general circulation model: an advective mechanism, *Atmos.-Ocean*, 1991, **29**, 197~231.
- 58 Chang, P., L. Ji and H. Li, A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions, *Nature*, 1997, **385**, 516~518.
- 59 Mann, M. E. and J. Park, Greenhouse warming and changes in the seasonal cycle of temperature: model versus observations, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **22**, 1111~1114.
- 60 Nicholson, S. E., Variability of African rainfall on interannual and decadal time scales, *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. G. Martinson, K. Bryan, M. M. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian and L. D. Talley (eds.), National Academy Press, Washington D.C., 1995, 32~43.
- 61 Ropelewski, C. F. and M. S. Halpert, Global and regional scale precipitation and temperature patterns associated with El Niño / Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**, 1606~1626.
- 62 Folland, C. K., T. N. Palmer and D. E. Parker, Sahel rainfall and worldwide sea temperatures 1901~85, *Nature*, 1986, **320**, 602~607.
- 63 Houghton, R. W. and Y. Touree, Characteristics of low frequency sea surface temperature fluctuations in the tropical Atlantic, *J. Climate*, 1992, **5**, 765~771.
- 64 Ward, M. N., Provisionally corrected surface wind data, worldwide ocean-atmosphere surface fields, and Sahelian rainfall variability, *J. Climate*, 1992, **5**, 454~475.
- 65 Hasselmann, K., Stochastic climate models: I. Theory, *Tellus*, 1976, **28**, 473~485.
- 66 Griffies, S. M. and K. Bryan, A predictability study of simulated North Atlantic multi-decadal variability, *Climate Dyn.*, 1997, **13**, 459~487.
- 67 Latif, M. and T. P. Barnett, Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability, *J. Climate*, 1996, **9**, 2407~2423.

A Review of Climate Variability with Interdecadal– Centennial Time Scale in the World

Xian Peng and Li Chongyin

*(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

Abstract With the scientific progresses and social development, the climate variability and predictability with the time scales over 10 years (*interdecadal–centennial time scale*) have been put on the agenda. Based on the recent research activities and results in climate variability with interdecadal–centennial time scale in the world, the major scientific issues and research surveys are introduced systematically in this paper. The goal is to let Chinese scientists understand those studies and take part in them, then, promote our scientific progress in this field.

Key words: interdecadal–centennial time scale; climate variability.