

东亚夏季大气环流和气候对冬季 海温异常的邻响应和遥响应*

李崇银 龙振夏

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘要 本文通过 IAP-GCM 的数值模拟, 研究了全球大气环流对黑潮海域和赤道东太平洋冬季 SST 异常的响应, 并着重比较东亚大气环流和气候对黑潮区 SSTA 的响应 (邻响应) 和对赤道东太平洋 SSTA 的响应 (遥响应)。首先, 无论是黑潮区 SSTA 引起的邻响应还是赤道东太平洋 SSTA 所引起的遥响应对东亚大气环流和气候变化的影响都是明显而重要的。由于在大气中低频振荡被激发出来, 其响应将持续较长时间。进一步分析表明, 东亚大气环流对黑潮区或赤道东太平洋冬季正 SSTA 的响应都将造成华北地区夏季的多雨, 其数值模拟结果与观测相一致。另外, 赤道西太平洋地区大气的异常 (尤其是对流活动) 对于东亚地区大气环流和气候变化有重要作用。

关键词 邻响应 遥响应 外强迫 数值模拟 低频振荡

1 引言

赤道东太平洋的正海温异常 (El Nino 事件) 往往在全球范围造成不少地区的干旱和洪涝灾害, 已是 10 多年来各国科学家关心的重要科学问题。分析研究已清楚地表明, 东亚地区的大气环流和气候异常也与 El Nino 的发生有密切关系, 例如华北地区的汛期 (6~8 月) 降水量就与 El Nino 有明显相关, El Nino 年华北汛期降水量平均偏少, 而 La Nina 年华北汛期降水量平均偏多^[1, 2]。进一步的分析还表明, 在 El Nino 事件的下一年, 中国东部地区的汛期降水量往往偏多^[3]。人们普遍将 El Nino 所引起的大范围大气环流和气候的异常归结为大气对赤道东太平洋海温异常 (SSTA) 的强迫响应 (即所谓遥响应) 的结果。Horel 和 Wallace 通过资料分析发现, 在暖的赤道东太平洋 SSTA 的强迫下, 北半球可出现类似 PNA 的异常流型^[4], 而 Blackmon 等用 GCM 所做的关于赤道东太平洋 SSTA 所引起的 1 月气候异常的数值模拟也表明, 北半球 500 hPa 高度场异常形势同观测到折 PNA 型极其相似^[5]。肖子牛和李崇银用 GCM 所做的数值模拟不仅表明赤道东太平洋 SSTA 对激发产生 PNA 型遥相关波列有重要作用, 而且还能激发产生欧亚-太平洋 (EUP) 遥相关波列^[6]。因此, 大气对赤道东太平洋 SSTA 的遥响应已被认为是大气环流及气候异常的重要原因之一。

另一方面, 资料分析也表明, 冬季黑潮区域的海温异常同我国东部地区的汛期降水有密切关系, 特别是华北地区汛期降水的年际变化同黑潮海温异常存在着很好的正相

1995-10-10 收到, 1996-02-28 收到修改稿

* 本文得到国家自然科学基金部分资助

关,黑潮冬季 SST 增暖后,华北地区汛期降水量亦增多,反之则减少^[7]。黑潮海域邻近中国,如果将那里的海温异常视为一种外强迫,那么从大尺度海气相互作用的角度,也就可以认为华北汛期降水的异常是东亚大气环流和气候对 SSTA 的一种邻(域)响应的结果。

本文将针对华北汛期降水量的异常,通过 GCM 数值模拟研究冬季黑潮区域 SSTA 及赤道东太平洋 SSTA 所引起的大气邻响应及遥响应特征。

2 模式及有关模拟试验

本文的数值模拟采用中国科学院大气物理研究所的两层大气环流模式(IAP-GCM2),它是一个格点原始方程模式,其格距为 5° (经度) $\times 4^{\circ}$ (纬度),这个模式包括了较全面的物理过程,并且已证明有较好的气候模拟能力^[8,9]。

为了模拟大气环流和模式气候对外源强迫(SSTA)的响应,需要有两类数值模拟。其一是所谓对照试验,它表示某种气候平均情况;其二是异常试验,即存在一定异常情况的气候情况。本文中对照试验是取 IAP-GCM2 长时间积分(25 年)中的第 20 年的模式结果,记为 F_c 场。异常试验有两个,它们都是在对照试验的 1 月份将其海温再加上一个异常海温场(SSTA)所得到的模式积分结果,但 SSTA 分别位于赤道东太平洋和黑潮海域,它们分别记为 F_{A1} 和 F_{A2} 。异常海温的分布如图 1 所示,对于赤道东太平洋的 SSTA,是在 $(90^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{W}, 6^{\circ}\text{S}\sim 6^{\circ}\text{N})$ 地区有最大海温异常, $\text{SSTA}=2.5^{\circ}\text{C}$;在最强增暖区之外直到 $(80^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{W}, 10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N})$ 范围, $\text{SSTA}=1.5^{\circ}\text{C}$;最外围到 $(70^{\circ}\sim 175^{\circ}\text{W}, 14^{\circ}\text{S}\sim 14^{\circ}\text{N})$,其 $\text{SSTA}=0.5^{\circ}\text{C}$ 。对于黑潮海域的温度异常,我们用在 $(120^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}, 20^{\circ}\sim 48^{\circ}\text{N})$ 范围有 1.8°C SSTA 表示。上述海域 SSTA 的取值基本上反应了冬季两个海区的中强级的 SST 异常情况。在数值试验中上述 SSTA 只在 1 月份存在,而其余积分时间 SST 都同对照试验一样为随时间变化的气候平均值。

同已有的大气响应数值模拟一样,我们可以用异常试验的积分结果与对照试验的积

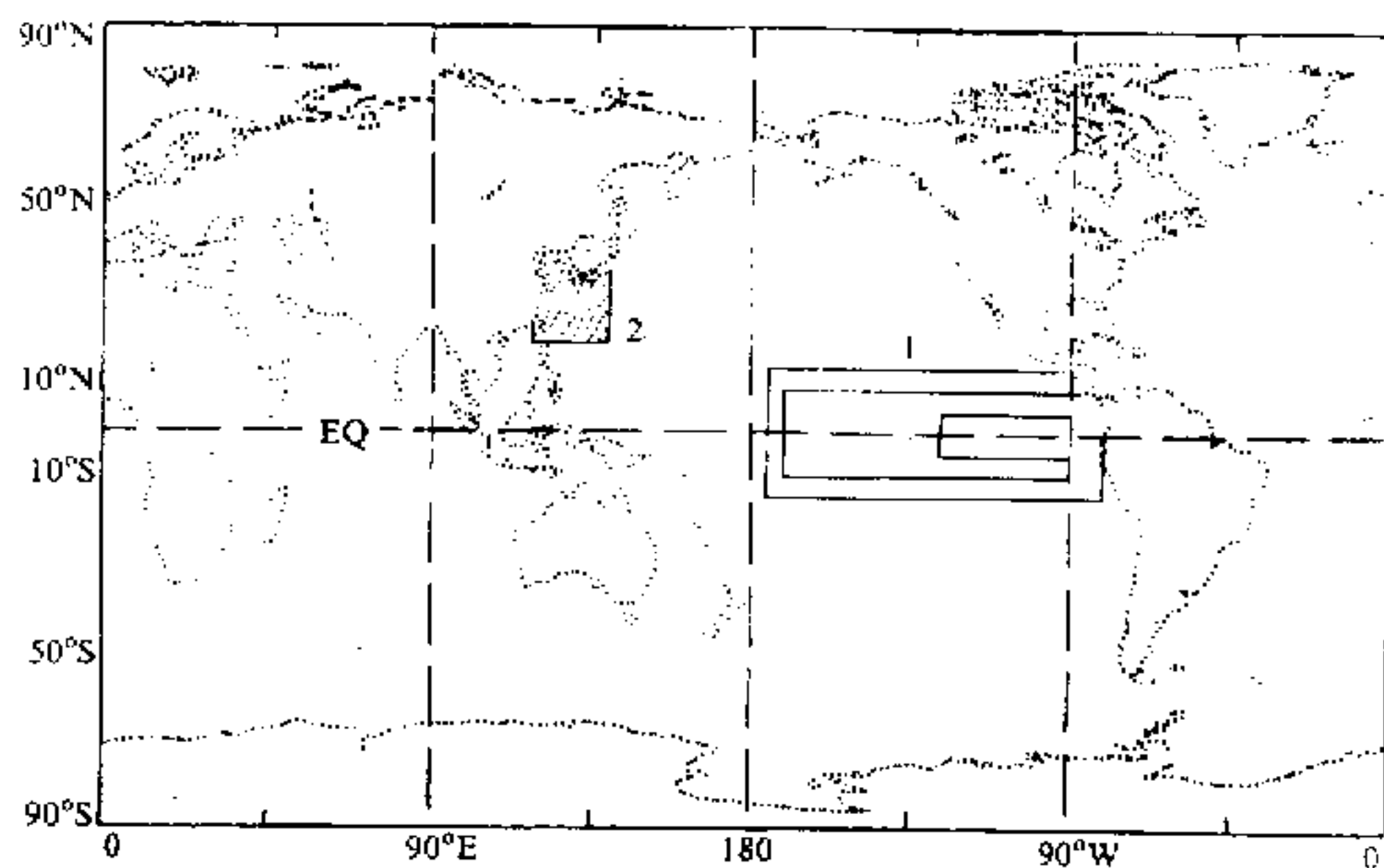


图 1 两个异常试验的 SSTA 场。单位: $^{\circ}\text{C}$

分结果之差记为 $\Delta F_{Ri} = F_c - F_{Ai}$ ($i=1, 2$), ΔF_{Ri} 分别表示大气对赤道东太平洋和黑潮海域冬季 SST 异常的响应。我们将对 5 天(候)平均的 ΔF_{Ri} 进行分析, 从而讨论大气响应的性质及活动特征。对于东亚这个特定地区来讲, ΔF_{R1} 和 ΔF_{R2} 可视为遥响应和邻响应的情况。

3 主要模拟结果

首先, 通过分析全球 500 hPa 高度响应场, 我们清楚地看到, 无论是赤道东太平洋的 SSTA 还是黑潮海域的 SSTA 在冬季 (1、2 月) 都引起了全球大气的响应, 而且在北半球都出现了类似 PNA 和 EUP 波列的结构特征 (图略)。到了夏季, 1 月份的上述两个区域的 SSTA 也都仍然在全球大气中激发出清楚的遥响应。图 2 分别给出了赤道东太平洋和黑潮海区 1 月份 SSTA 所激发的 7 月份 500 hPa 高度响应场形势。很显然, 两个海区的冬季海温异常都在全球大气中激发出了相当强的遥响应, 其最大值分别超过 260 m 和 240 m。

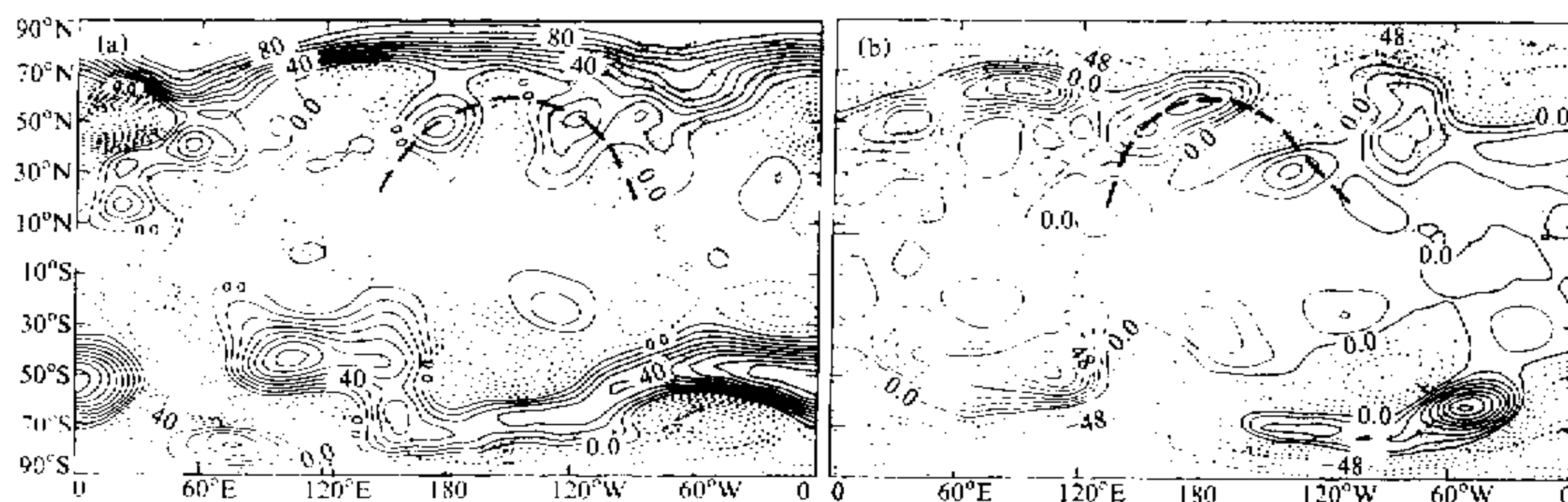


图 2 7 月份全球 500 hPa 高度响应场形势
(a) 赤道东太平洋 1 月 SSTA 异常, (b) 黑潮海区 1 月 SSTA 异常

从 500 hPa 高度响应场的正负区的分布可以发现, 对于两种海温异常, 500 hPa 高度上都出现了大致相近的遥相关波列形势。特别是在北太平洋地区, 两个响应场都显示出类似 PJ 遥相关型^[10]的波列 (图中粗虚线所示)。有关 PJ (亦称为 EPA: 东亚-太平洋-北美) 遥相关型的研究表明, 菲律宾附近地区夏季对流活动的异常对其起着十分重要的作用^[11]。这些资料分析结果同本文数值模拟试验所得到的热带降水的异常分布 (图略) 大致相近, 意即两个海区的 SSTA 所导致的赤道西太平洋地区对流活动的异常在中高纬度大气的响应中有相当重要的作用。

对于两个海区的海温异常, 500 hPa 高度响应场的最大差异在北半球高纬度地区, 赤道东太平洋的 SSTA 使其高度增加, 而黑潮海区 SSTA 使其高度降低。但是对于两种 SSTA 情况, 中国东部地区都出现了弱的高度负距平, 这种大体类似的 500 hPa 高度响应形势是汛期华北降雨量异常的重要原因。

图 3 是北半球 0~180°E 区域夏季 (6~8 月) 平均的 850 hPa 响应风场。很显然,

无论对于上述哪个地区的海温异常,对流层低层风场都有清楚的响应,最强达到 10 m/s 左右。对于不同的 SSTA, 对流层低层风场的响应出现了不小的差异,但是同 500 hPa 高度响应场相对应,图 3a 表明在中国东部有一明显的气旋性环流存在;图 3b 表明在中国东部有一明显的气流辐合区存在。气旋性环流和低层辐合区都是有利的降水形势,对流层低层风场的这两种响应形势必将导致中国东部(尤其是华北地区)汛期多雨。

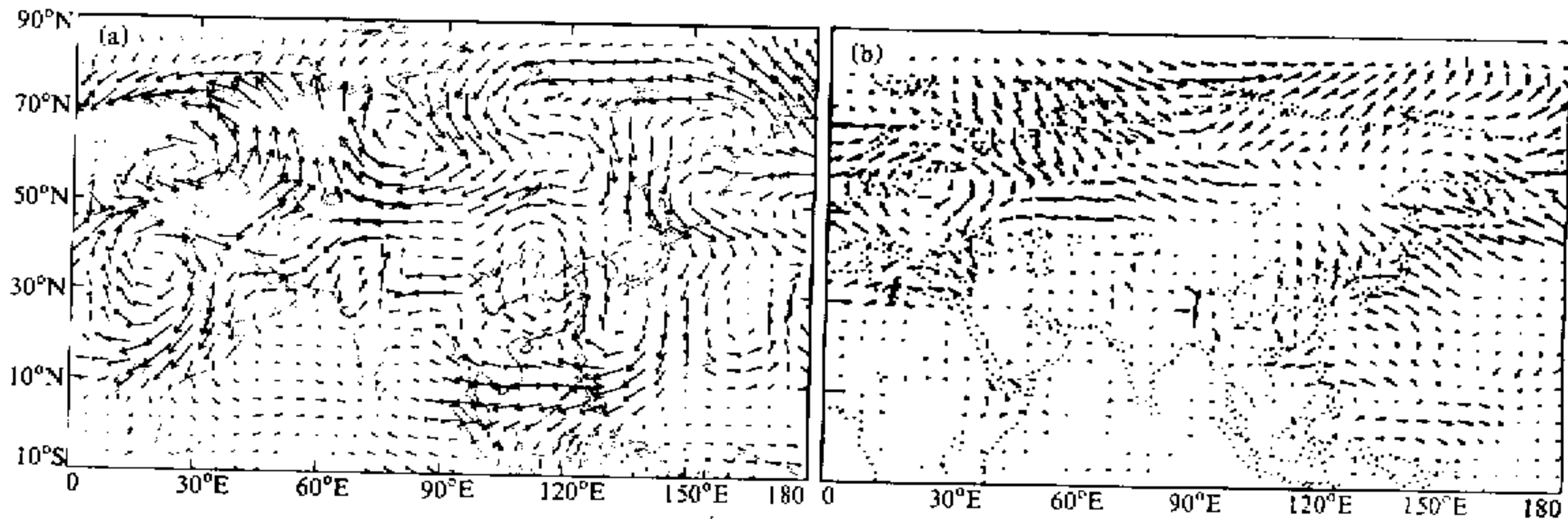


图 3 (0~180°E, 10°S~90°N)区域 850 hPa 风场对赤道东太平洋 SSTA(a) 及对黑潮海区 SSTA(b)的强迫响应形势。图中最长箭头分别表示 12 m/s (a)和 8 m/s (b)风速

上述数值模拟和分析表明赤道东太平洋和黑潮海区的冬季海温异常都在全球范围激发了大气环流的遥响应场,直到夏季这种遥响应仍然十分明显。对于中国东部地区夏季大气环流而论,对赤道东太平洋 1 月的 SSTA 的遥响应及对黑潮海区 1 月 SSTA 的邻(域)响应都产生了 500 hPa 高度负距平和 850 hPa 气旋性辐合流场形势。

4 大气响应的低频特征

分析大气响应场的时间演变可以清楚地看到,无论在热带地区还是在中高纬度地区, SSTA 这种外强迫在大气中所激发产生的响应有明显的低频变化特征,主要是 30~60 天低频遥响应。为了清楚地反映响应场的低频特征,我们用一般分析中采用的 30~60 天带通滤波办法,可以得到一系列低频(30~60 天)响应场。图 4 分别给出了两个海区 SSTA 在热带(6°S~6°N)大气中所激发的 400 hPa 纬向风的时间-经度剖面。图 4 清楚地表明了 30~60 天低频振荡的特征;而且它们与未滤波的场相比较,形势基本相似,其振幅为原响应场振幅的 60%~70%。因此可以认为,赤道东太平洋和黑潮海区的冬季 SST 异常都可以在全球热带大气中引起低频(30~60 天)遥响应。

同影响热带大气运动一样,上述两种 SSTA 的强迫也都将在中高纬度大气中主要激发出 30~60 天低频遥响应。图 5 分别给出的是高纬度地区 500 hPa 位势高度响应的时-经度剖面,不仅 30~60 天振荡的活动十分清楚;而且与图 4 不同, 30~60 天响应(振荡)的西移特征更为显著,其规律同实际大气中观测到的 30~60 天振荡的活动相当类似。

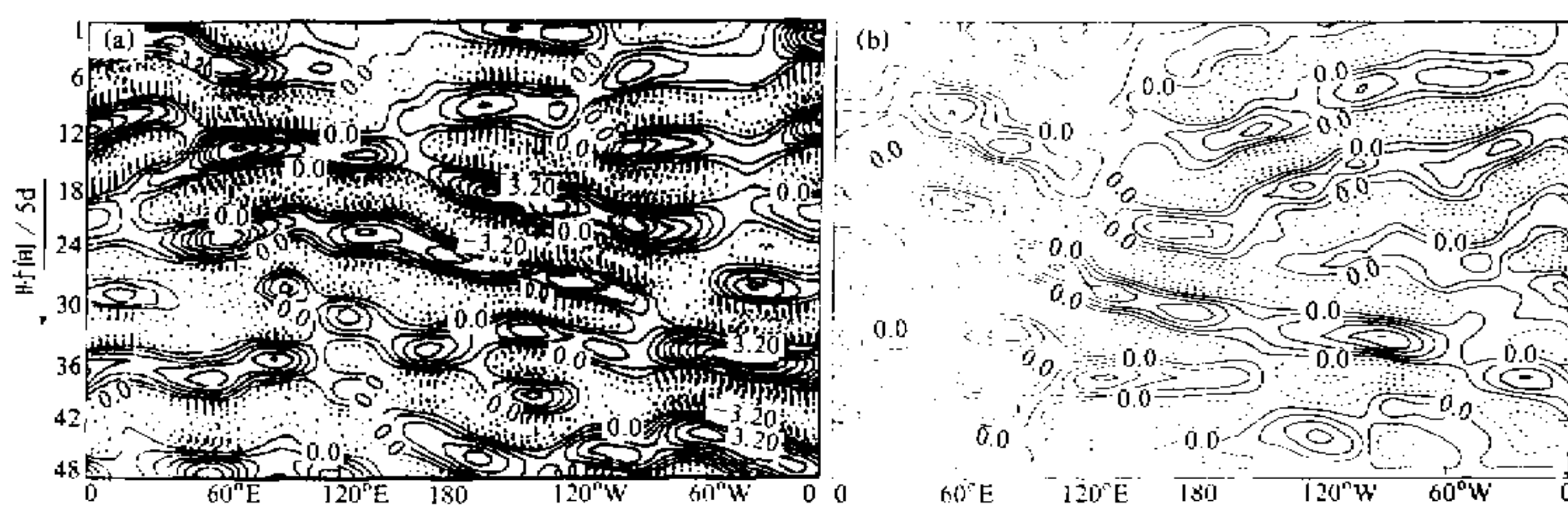


图4 热带(6°S~6°N)大气400 hPa纬向风响应场(已经过30~60天带通滤波)的时间-经度剖面。(a)对于赤道东太平洋SSTA,等值线间隔为0.6 m/s;
(b)对于黑潮海区SSTA,等值线间隔为0.9 m/s

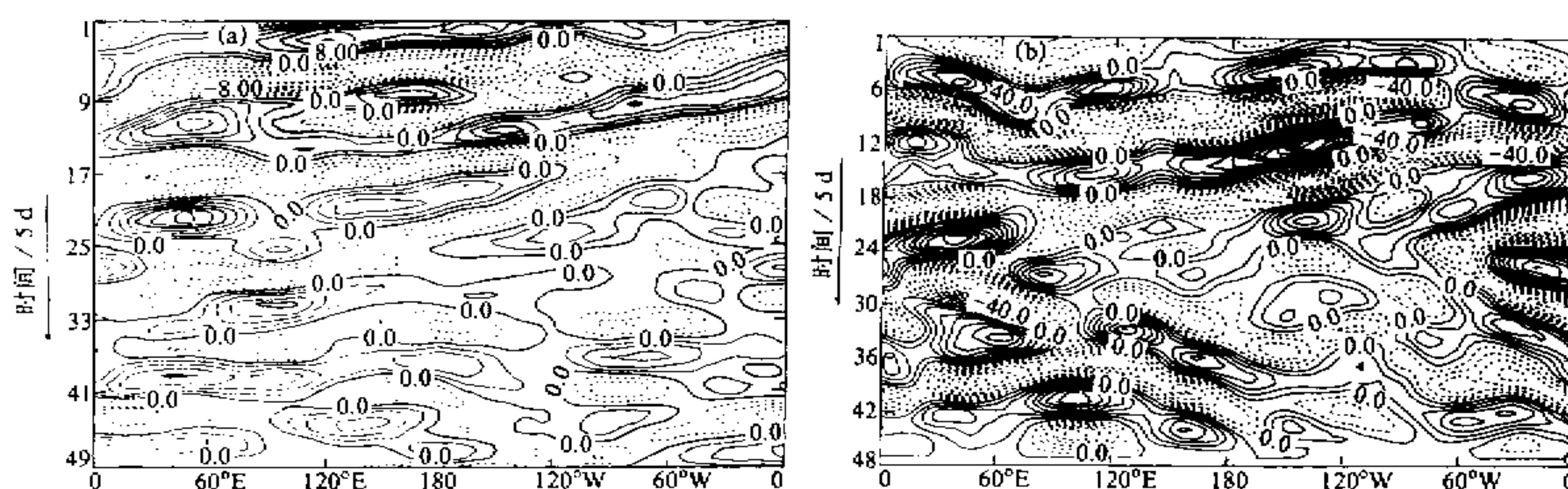


图5 (a)赤道东太平洋SSTA在66°N所激发的500 hPa位势高度响应场的时间-经度剖面,等值线间隔为20 m;(b)黑潮海区SSTA在54~62°N纬带所激发的500 hPa位势高度响应场的时间-经度剖面,等值线间隔为10 m

本节分析表明,SSTA作为一种外强迫,无论其在赤道东太平洋还是在黑潮海区,都将在全球大气中激发出遥响应,而且主要是30~60天低频遥响应。大气中30~60天低频振荡的被激发是十分重要的,说明通过大气内部的动力学过程,外强迫的影响将会在大脑中保持相当长的时间。

5 冬季SSTA引起的华北汛期降水异常

在引言中我们已经指出,观测资料的分析研究一方面表明冬季黑潮增暖(SSTA为正距平)同汛期华北降水量有很好正相关;同时在El Nino事件发生的第2年,华北汛期降水量一般也偏多。对于上述后一种情况,由于El Nino事件,一般在冬季赤道东太平洋的增暖达到最大,因此也可以认为是冬季赤道东太平洋的SSTA对汛期降水的影响。

通过上面指出的两种大气对外强迫响应的数值模拟试验,在得到风场和位势高度场响应的同时,也可以得到降水量的响应,亦即两类SSTA所引起的降水量异常(距

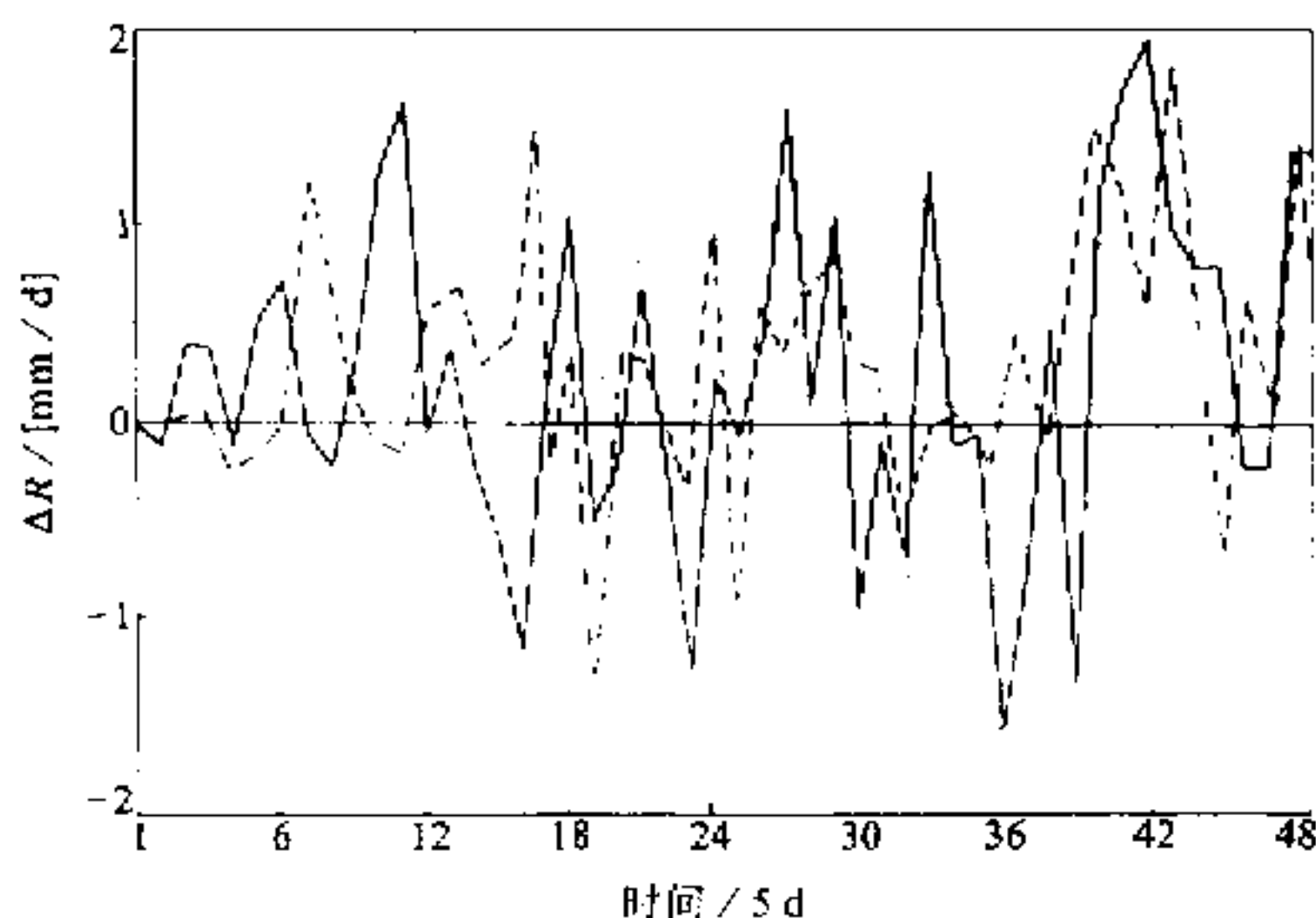


图6 模拟的华北(110~125°E, 34~40°N)地区汛期降水量异常(距平) ΔR 的时间演变。实线表示冬季赤道东太平洋 SSTA 的影响结果, 虚线表示冬季黑潮区 SSTA 的影响结果

平)。图6分别给出了冬季赤道东太平洋和黑潮海区 SSTA 所引起的华北地区(110~125°E, 34~40°N), 模式降水量异常的时间变化曲线。首先可以清楚地看到, 无论 SSTA 处于什么地方, 华北地区的降水量并非一直为正异常或一直为负异常, 而是正负异常相继出现, 显示出准周期性变化特征, 而且以 30~60 天低频变化为主。华北地区降水量的这种 30~60 天低频变化可以认为正是大气环流 30~60 天低频响应的结果, 就如天气尺度的晴雨过程都与一定形势的大气环流系统相配合一样。同时还

不难发现, 图中两条曲线虽有不同的演变形式, 然而在汛期(第 30~48 候)平均来讲都显示出了降水量的正距平为主的特征。也就是说, GCM 的数值模拟得到了同观测资料分析相类似的结果, 冬季赤道东太平洋 SST 正异常 (El Nino) 或者冬季黑潮海区的 SST 正异常都对华北汛期降水量有明显影响, 使其降水量偏多, 尤其是在 7、8 月份。

需要特别指出的是, 图6给出的降水量距平(候平均)同实际降水量相较显得偏小, 但模式的对照试验(相当于气候平均)中的降水量也比较小(这是不少 GCM 的普遍问题), 对于华北地区夏季其极大值也只有 3~5 mm/d。因此, 图6所表示的降水量距平同模式气候相比较是可以清楚地显示出冬季太平洋 SSTA 对华北汛期降水的影响。

为什么冬季的海温异常同华北汛期的降水量有很好的正相关呢? 本来大气对于外强迫的“记忆”并不长, 但是在外强迫的激发下, 大气通过其内部动力过程而产生了低频振荡及一定形式的遥相关型, 从而使得在经典意义上的大气“记忆”得到延续, 这样, 外强迫的影响也就可以持续相当长的时间。因此, 我们可以初步认为, 冬季太平洋 SSTA 可以影响华北汛期降水量的一个重要原因就在于大气低频振荡及相应遥相关型的被激发。当然, 其动力学机理还有待深入研究, 但孙淑清和孙柏民的研究结果^[12], 在一定程度上支持了我们的上述意见。因为他们针对江淮流域夏季的旱涝情况分析前冬的大气环流形势发现, 江淮汛期的旱年和涝年的前冬环流形势差异非常明显, 甚至是完全反相的。这说明冬季大气环流形势对来年夏季气候有相当重要的影响。冬季大气环流出现某种形势, 在某种意义上也可视为外源强迫而形成的, 这种环流形势将按自身的演变规律变化, 到了夏季将造成一定的气候特征, 例如多雨或少雨等。

还需指出, 可以认为华北(或东亚)地区的大气环流和气候异常(例如位势高度和风场以及降水等)既有黑潮海区 SSTA 的邻(域)响应的影响, 也有赤道东太平洋 SSTA 的遥响应的影响。本文上面的分析讨论表明, 大气对于外强迫(SSTA)的邻响应和遥响应都对东亚夏季环流和气候的变化和异常有重要作用。实际上邻响应和遥响应

是相对的, 黑潮海区的 SSTA 对东亚大气环流和气候变化的影响可归于邻响应, 而它对距黑潮海区较远地区 (例如北美或欧洲) 大气环流和气候变化的影响当属遥响应问题。本文的数值模拟试验清楚地表明, 大气对外强迫有邻响应也就有遥响应; 同样, 有遥响应也就有邻响应。这是较长时间尺度的大气环流变化所反映出的大尺度大气运动的整体性特征。

6 讨论及结语

关于大气强迫响应的研究表明, 位于低纬度的热力强迫会在中高纬度地区产生较强的大气环流遥响应, 而中高度地区的热力强迫在热带大气中却难于激发较强的环流遥响应^[13], 其原因可以从球面二维 Rossby 波的频散理论中找到^[14]。在本文数值模拟试验中, 中纬度 (黑潮海区) 1 月份的 SSTA 不仅在全球引起了明显的遥响应, 而且通过激发大气 30~60 天振荡使得 SSTA 的影响可以持续较长的时间。这里我们要特别指出, 本文的结果并不与已有结果相矛盾, 因为本文的数值模拟试验表明, 黑潮海区的 SSTA 首先在赤道西太平洋地区引起了大气运动 (尤其明显的是对流活动和降水) 异常, 这种热带大气的异常类似于在热带地区有新的强迫源, 进而在全球大气中引起明显的遥响应。下面用大气中强迫响应场的扰动动能的演变来说明上述情况, 图 7 给出了西太平洋地区不同纬度带 850 hPa 上响应场扰动动能的时间演变。首先, 动能变化都有准周期特征, 其周期约为 40~70 天, 进一步表明黑潮海区冬季的 SSTA 在大气中主要激发出了

季节内振荡。其次, 中纬度地区的扰动动能先向南传送到赤道附近地区, 然后则主要是赤道附近地区的扰动动能向北传送给中纬度大气。可见, 热带大气扰动的产生, 尤其是 30~60 天振荡的被激发, 对于全球大气遥响应有重要作用。

外源强迫可以引起大气环流的明显响应, 说明了外强迫对大气环流和气候变化的重要性; 但是大气中遥响应的发生, 尤其是出现什么形势的响应场, 大气的基本气候态 (基本气流) 也起重要的作用。Simmons 等的研究表明, 对于同一种基本气候态, 初始扰动虽处于不同的地理位置, 却得到了相当一致的第 10 天的遥响应形势^[15]。对于赤道东太平洋 1 月的 SSTA 和黑潮海区 1 月的 SSTA, 本文都在夏季中国东部地区

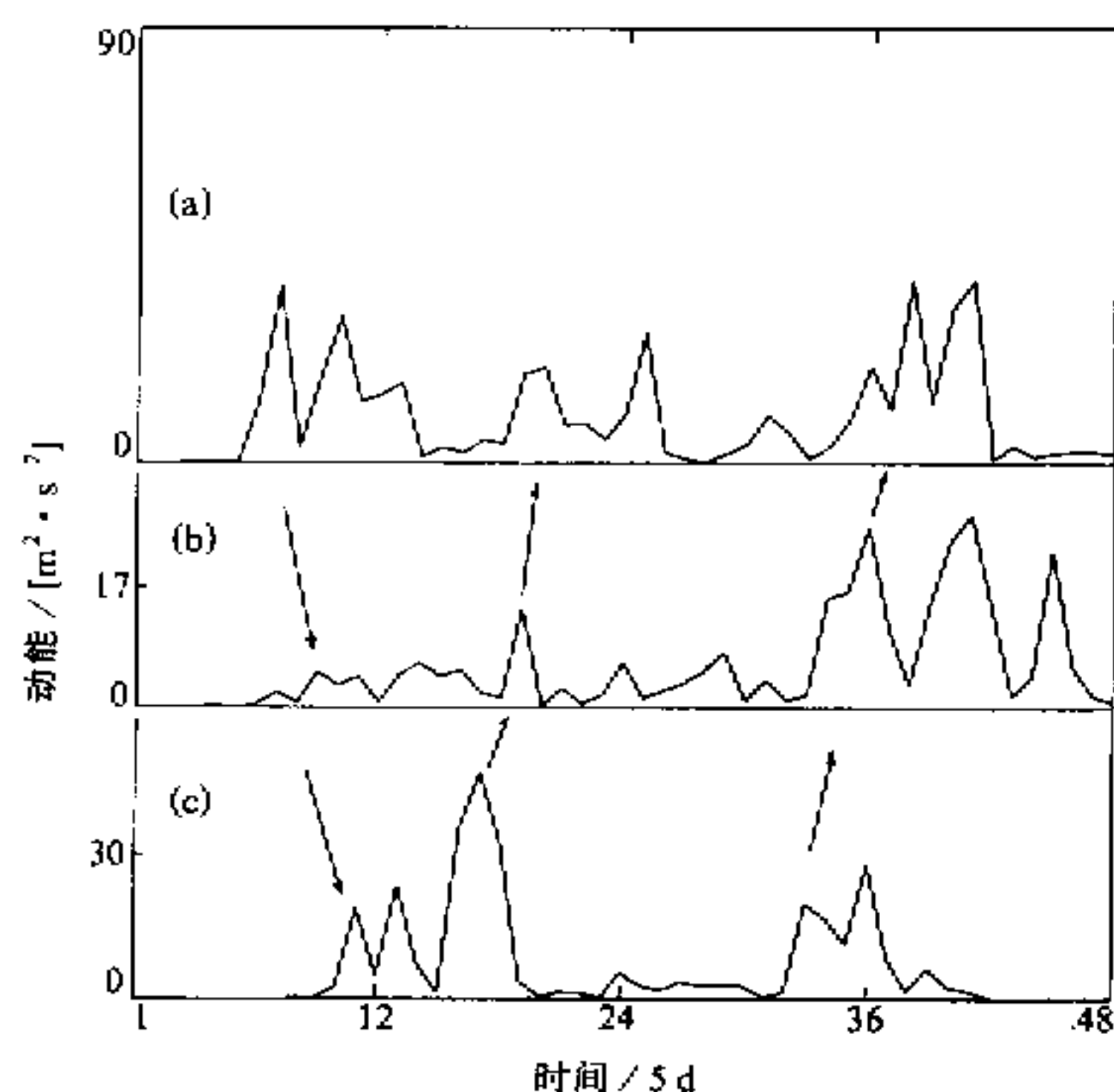


图 7 黑潮海区 1 月 SSTA 所引起的西太平洋地区 850 hPa 大气响应场扰动动能的时间变化。

- (a) (125~130°E, 30°N) 平均;
(b) (125~130°E, 18~22°N) 平均;
(c) (135~140°E, 2°N) 平均

得到了类似的大气环流异常形势和降水距平,这很可能也是冬季大气环流的基本特征所决定的。针对黑潮海区的 SSTA,我们还用另一冬季初始场进行了相同的数值积分,其响应场的结果虽有些小差异,但大气中 30~60 天振荡的被激发,夏季东亚的大气环流异常和汛期华北的降水距平仍有相近的结果。

本文的数值模拟试验和上述分析可归纳如下结论:

(1) 对于赤道东太平洋和黑潮海区 1 月份的 SSTA,全球大气都可以出现明显的遥响应,说明外源强迫对于大气环流和气候变化有重要的作用。对东亚地区的环流和气候异常来讲,赤道东太平洋 SSTA 引起的遥响应和黑潮海区 SSTA 引起的邻响应都有重要的影响。

(2) 由于外源强迫 (SSTA) 在大气中主要激发出低频 (30~60 天) 遥响应,其对大气的影晌可以持续较长的时间。冬季的赤道东太平洋 SSTA 或者黑潮海区的 SSTA 都能在夏季激发出明显的大气环流异常,同大气中被激发的季节内振荡的活动可能有重要关系。

(3) 赤道东太平洋 SSTA 和黑潮海区 SSTA 都造成了赤道西太平洋地区大气运动,尤其是对流活动的异常。这种赤道西太平洋对流活动的异常对于 EUP 型波列的产生以及东亚地区大气环流的异常有重要的影响。

(4) 赤道东太平洋冬季 SSTA 和黑潮海区冬季 SSTA 都可以引起华北地区汛期降水量异常,其原因在于大气环流对它们的响应及演变造成了夏季东亚大气环流有类似的异常形势。因此,对于某个地区的大气环流和气候异常来讲,既要考虑处于外源强迫的大气邻响应又要考虑对外源强迫的遥响应影响。

参 考 文 献

- 1 陈烈庭, 1977, 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响, 大气科学, 1, 1~12.
- 2 李崇银, 1992, 华北地区汛期降水的一个分析研究, 气象学报, 50, 41~49.
- 3 符淙斌, 1987, 埃尔尼诺/南方涛动现象与年际气候变化, 大气科学, 11, 209~220.
- 4 Horel, J.D. and J.M. Wallace, 1981, Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 813~829.
- 5 Blackmon, M.L. et al., 1983, A general circulation model study of January climate anomaly patterns associated with interannual variation of equatorial Pacific sea surface temperature, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1410~1425.
- 6 肖子牛、李崇银, 1992, 大气对外强迫低频遥响应的数值模拟, I: 对赤道东太平洋 SSTA 的响应, 大气科学, 16, 707~717.
- 7 大气物理研究所所长天气预报组, 1978, 冬季太平洋海水温度异常对我国汛期降水的影响, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第 6 号, 1~12, 科学出版社.
- 8 Zeng Qingcun, et al., 1989, Documentation of IAP two-level atmospheric general circulation model, DOE/ER/60314-HI.
- 9 曾庆存等, 1988, 季风和大气环流季节突变的数值模拟, 大气科学(特刊), 22~42.
- 10 Nitta, T., 1986, Long-term variations of cloud amount in the western Pacific region, *J. Meteor. Soc. Japan*, 64, 373~390.
- 11 黄荣辉、李维京, 1988, 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制, 大气科学(特刊), 107~116.
- 12 孙淑清、孙柏民, 1995, 东亚冬季风异常与中国江淮流域旱涝的关系, 气象学报, 53, 440~450.

- 13 Webster, P.J., 1982, Seasonality in the local and remote atmospheric response to sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 41~52.
- 14 Hoskins, B.J. and D.J. Karoly, 1981, The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179~1196.
- 15 Simmons, A.J., 1983, Barotropic wave propagation and instability, and atmospheric teleconnection patterns, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1363~1392.

The Border and Remote Responses of the Summer Circulation and Climate in East Asia to SSTA in Winter

Li Chongyin and Long Zhenxia

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract By using numerical simulation in IAP-GCM, the global atmospheric circulation responses to the SSTA in the Kuroshio region and in the equatorial eastern Pacific in winter are studied. In this paper, the focus is comparison of the responses of the East-Asian circulation and climate to the SSTA in the Kuroshio region (border responses) and in the equatorial eastern Pacific (remote responses). At first, for the atmospheric circulation and climatic variations in East Asia, both the border response and the remote response to SSTA are all obvious and important. Since exciting the low-frequency oscillation in the atmosphere, the responses will continue for a longer time. The further analyses show that the responses of the East-Asian Circulation to positive SSTA in the Kuroshio region or in the equatorial eastern Pacific in winter are all the same to cause more precipitation in Huabei region in summer. And these simulated results are consistent with the observations. The tropical atmospheric anomalies over the equatorial western Pacific seem to be important to the climatic variation in East Asia.

Key words border response remote response external forcing numerical simulation
low-frequency fluctuation