

李丽平, 靳莉莉, 管兆勇. 2010. 北太平洋次表层海温异常对中国夏季降水影响的可能途径 [J]. 大气科学, 34 (5): 988-1000. Li Liping, Jin Lili, Guan Zhaoyong. 2010. The possible influence channel of sub-surface sea temperature anomaly in the North Pacific on China summer rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 988-1000.

北太平洋次表层海温异常对中国夏季降水影响的可能途径

李丽平 靳莉莉 管兆勇

南京信息工程大学 教育部气象灾害省部共建实验室和大气科学学院, 南京 210044

摘要 利用 Godas 月平均次表层海温资料, 分析了冬、春季和夏季北太平洋次表层海温层际相似性特征, 据此对次表层海温进行分层。在此基础上研究了 500 hPa 位势高度场、北太平洋次表层海温、中国夏季降水三者之间的时滞相关关系, 发现春季北太平洋次表层海温场是联系前、后期大气环流的关键因素。前期冬季大气环流对春季北太平洋次表层海温场影响最显著, 春季北太平洋次表层海温场又持续影响同期及后期夏季大气环流异常。异常的夏季大气环流与同期表层、次表层海温相互作用, 共同造成夏季长江流域与华北、华南降水出现相反异常的分布型式。

关键词 北太平洋 次表层海温异常 大气环流异常 中国夏季降水异常

文章编号 1006-9895 (2010) 05-0988-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Possible Influence Channel of Sub-surface Sea Temperature Anomaly in the North Pacific on China Summer Rainfall

LI Liping, JIN Lili, and GUAN Zhaoyong

Ministry of Education Key Laboratory of Meteorological Disaster of Cooperation of Ministries and Provincial Governments, and College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract By use of Godas monthly sub-surface sea temperature (ST), the similarity of ST among different layers is analyzed, and ST is layered in the North Pacific region for winter, spring, and summer. The time-lag correlations among the 500-hPa geopotential height field, sub-surface sea temperature field in the North Pacific, and the summer rainfall in China are further studied. Results show that the sub-surface ST in spring is an important factor linking the anterior and posterior atmospheric circulation. Atmospheric circulation in winter has a most remarkable influence on the ST in the North Pacific in spring, and the ST in spring also has persistent effects on atmospheric circulation for the corresponding period and the later summer. The interactions between atmospheric circulation and the sea surface, sub-surface temperature anomalies respectively lead to the opposite anomalous pattern of precipitation for the Yangtze River basin with North China and South China in summer.

Key words North Pacific, sub-surface sea temperature anomalies, atmospheric circulation anomalies, China rainfall anomalies

收稿日期 2009-06-24, 2010-04-06 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划项目 2007BAC29B02, 留学归国人员基金项目 80185

作者简介 李丽平, 女, 1971 年出生, 博士, 副教授, 主要从事区域气候和海陆气相互作用、低频振荡方面的研究。

E-mail: liliping@nuist.edu.cn

1 引言

由于海洋具有强的“记忆力”，人们一直把它视为影响短期气候变化不可缺少的因子。关于太平洋海温异常对中国降水异常的影响已有较多研究。许多学者对与中国降水密切相关的特定海区进行讨论，如赤道东太平洋海区（陈烈庭，1977；李麦村等，1987；李超，1992；杨芳林和袁重光，1995；苗秋菊等，2002；梁萍等，2008；钱维宏等，2009）、西太平洋暖池区（黄荣辉，1990；吴迪生，1996；张启龙等，1999；简茂球等，2004；闵锦忠等，2005；黄荣辉等，2006）、黑潮区（吴仪芳和李麦村，1983；唐佑民，1993；李忠贤和孙照渤，2004；张天宇等，2007；吴志彦等，2008；宗海锋等，2008）、亲潮区（吴仪芳和李麦村，1983；杨素雨和严华生，2007；宗海锋等，2008）和西风漂流区（唐佑民，1993；于淑秋和林学椿，1997；孙安健和郭艳君，2003；杨素雨和严华生，2007）。中国是最早对中高纬海气相互作用进行系统研究的国家之一。早在1950年代初，吕炯（1950）就注意到西北太平洋海温异常与后期我国长江中下游旱涝的联系。1970年代末，归佩兰（1978）用归类的方法将北太平洋海表温度异常进行了分类，发现北太平洋海表温度异常存在很明显的中北太平洋南北振荡型和东北太平洋东西振荡型，且归纳了对应的大气环流异常型；林学椿（1978）也进行了类似的研究；吴国雄和王敬芳（1997）研究了冬季中高纬500 hPa高度场和海表温度异常场特征及其相关，指出与中高纬度500 hPa高度场太平洋北美型（PNA）明显相关的是中高纬度东北太平洋和赤道东太平洋的海表温度。他们的结果都表明，中高纬度海气之间最强的相关在海气异常对应的空间位置上，而且这种区域性或邻域性的海气相关呈正相关，暖海表温度异常对应正高度异常，冷海表温度异常对应负高度异常。

近年来，不少学者将海表温度异常与大气环流异常联系起来，获得了与中国夏季气候异常、前期海温异常相联系的大气遥相关波列，从而揭示了前期海温异常通过影响大气环流异常再影响中国气候异常的具体过程。林学椿（1999）研究了北太平洋海表持续加热对夏季中国降水及大气环流的影响，指出海温的太平洋北美遥相关型指数距平累积和与

江淮流域夏季降水有密切的相关，也指出该指数与PNA遥相关型有较好的相关。朱乾根等（2000）研究了北太平洋中纬度海温异常对中国东部夏季降水影响的可能途径，指出前期3月北半球中纬度关键海区与中国东部夏季降水相关区域中，长江江北区为显著正相关区。他还指出，前期关键区海温首先对其同期850 hPa风场斜压波列施加影响，该斜压波列又对其后期斜压波列施加影响，最后此斜压波列影响中国东部夏季降水异常。王慧和王谦谦（2002）研究指出，正是由于北太平洋大范围持续的海温异常引起了次年夏季大气环流的异常，导致了淮河流域夏季降水异常。

早期由于海洋资料的时间和空间局限性，关于海温异常对大气环流异常以及中国降水异常的影响的大多数研究都基于海表温度。随着海洋探测技术的发展和资料年限的积累，次表层海洋资料逐渐丰富和可用。与海表相比，次表层受外部因素的影响较小，其稳定性较高，因而近年来次表层海洋对气候影响的研究逐渐引起了气象学者的关注（朱乾根等，2000）。黄荣辉和孙凤英（1994）分析了热带西太平洋表层与次表层海温的年际变化，指出西太平洋暖池海温异常可以引起大气环流异常的遥相关波列进而影响长江中下游夏季降水。翁学传等（1996）研究表明，热带西太平洋暖池次表层水热含量变化与我国东部汛期降水和副高有较好的相关关系。祁丽燕等（2007）研究了北太平洋冬季热状况的变化特征，在此基础上研究我国东部地区夏季气候与前期冬季北太平洋热容量之间的耦合关系。但总的来说，在对次表层结构了解的基础上考虑次表层变化与中国气候之间关系的研究还不多，而考虑北太平洋次表层变化对中国气候影响的研究则更少。刘秦玉（2004）指出，我们应该充分利用新的观测资料和历史资料，集中力量研究西北太平洋副热带环流的气候特征及形成机制，研究西北太平洋副热带环流在我国和全球气候变化中的地位和作用。为此，本文基于最新的Godas次表层海温资料，将北太平洋海区作为一个整体，研究近30年该海区次表层海温的季节变化特性，在此基础上，进一步研究前期（冬、春季）和同期（夏季）北太平洋次表层海温及大气环流场与中国夏季降水的时滞相关关系，揭示北太平洋次表层海温影响中国夏季降水的可能途径。

2 资料和方法

本文使用了如下几类资料:

(1) Godas 全球逐月次表层海温 (sub-surface sea temperature, 简记为 ST), 覆盖时段: 1980 年冬季~2008 年 12 月; 水平分辨率 $\Delta\lambda \times \Delta\varphi = 1.0^\circ \times 0.333^\circ$; 垂直方向共 40 层, 根据需要选用前 28 层, 即 5、15、25、35、45、55、65、75、85、95、105、115、125、135、145、155、165、175、185、195、205、215、225、238、262、303、366、459 m。根据李丽平等 (2003) 已有研究结果, 取 ($20^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{W}$) 为要研究的北太平洋区域。

(2) 中国 160 站逐月降水资料, 覆盖时段: 1951 年 1 月~2008 年 12 月。

(3) NCEP/NCAR 的全球月平均 500 hPa 高度场资料, 覆盖时段: 1948 年 1 月~2008 年 12 月。本文选取 ($20^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{W}$) 范围内资料进行研究。

统一上述三类资料的时段, 选取 1980 年 1 月~2008 年 12 月资料进行研究, 其中冬、春、夏季分别为 12 月~次年 2 月、3~5 月、6~8 月的平均。主要使用自然正交函数 (EOF) 分析方法、相似和相关、合成分析、奇异值分解 (SVD) 及其蒙特卡罗检验方法。

3 北太平洋次表层海温场相似性分析

首先, 根据次表层各层海温气候场以及对各层海温异常场进行 EOF 分析所得结果的相似性进行分层。

图 1 给出了冬季、春季和夏季北太平洋次表层海温气候场沿 27.5°N 的深度-经度剖面。可见, 冬季 95 m 以上、春季 85 m 层以上基本为海温比较均匀的混合层; 夏季的混合层非常薄, 基本限于表层, 从第二层向下直到 120 m 左右为海温梯度较大的斜温层。

对冬、春和夏季 28 层次表层海温场分别进行 EOF 分析, 计算第一模态特征向量层际间的相似系数、时间系数的相关系数。图 2 给出了各季第一模态特征向量层际间的相似系数和时间系数相关系数分布图, 图中粗实线以内的值通过了显著水平为 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 阴影区为空间相似系数大于等于 0.9、时间相关系数大于等于 0.8 的区域。

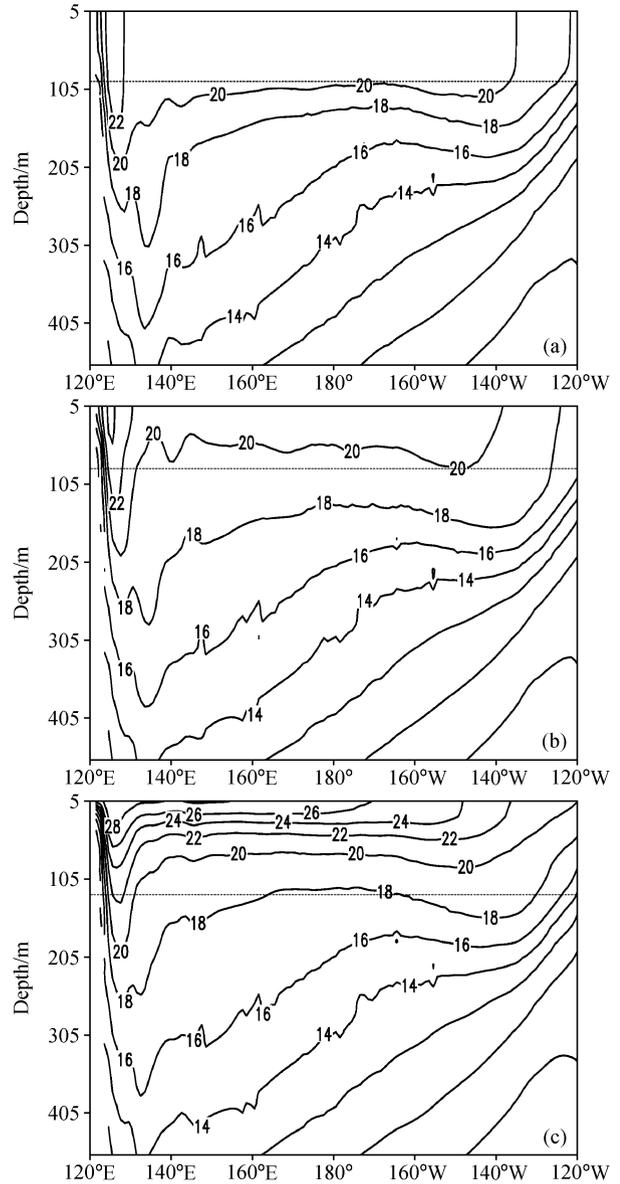


图 1 北太平洋次表层海温气候场沿 27.5°N 的深度-经度剖面 (单位: $^\circ\text{C}$): (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季
Fig. 1 Depth-longitude cross sections of climatological fields of sub-surface sea temperature ($^\circ\text{C}$) along 27.5°N in the North Pacific; (a) Winter; (b) spring; (c) summer

从图 2a、b 可以看出, 冬季前 10 层次表层海温特征向量相似系数均在 0.9 以上, 时间相关系数均在 0.8 以上, 第 10 层与第 11 层之间有明显减小, 11 层与 13 层之间为过渡层, 13 层以下至 20 层相似和相关又进一步增强。据此并结合气候场 (图 1a) 对冬季北太平洋的 28 层次表层海温重新进行分层, 将前 10 层合成为一层, 深度为 95 m。图 2c、d 表明, 春季前 10 层海温空间型之间的相似系数均在

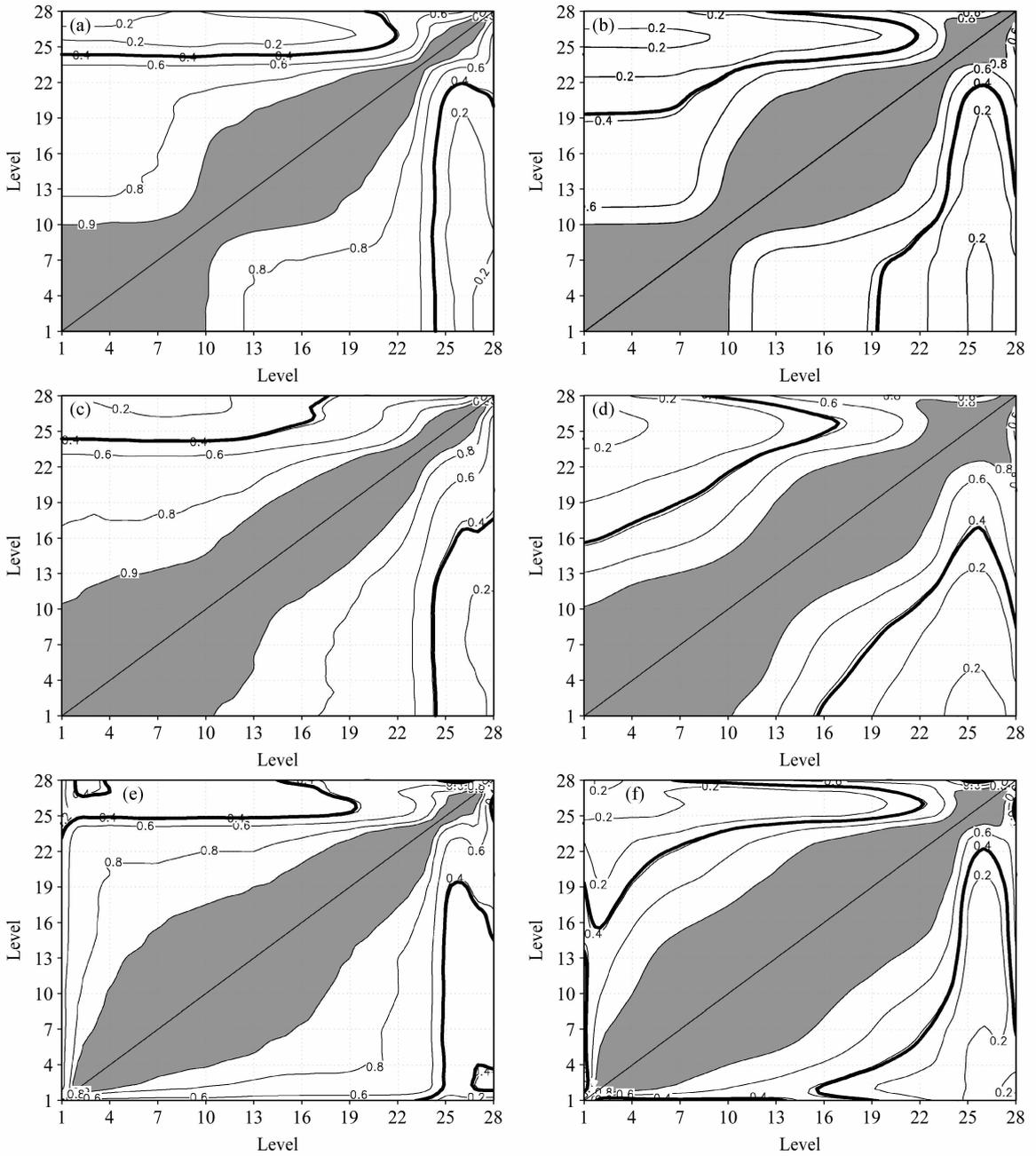


图 2 北太平洋次表层海温的 EOF 第一模态层间 (a、c、e) 空间相似系数和 (b、d、f) 时间相关系数图：(a、b) 冬季；(c、d) 春季；(e、f) 夏季。横、纵坐标为各层序号

Fig.2 (a, c, e) Spatial similarity coefficient and (b, d, f) temporal correlation coefficient between different levels for the first EOF mode of sub-surface sea temperature in the North Pacific: (a, b) Winter; (c, d) spring; (e, f) summer

0.9 以上，前 9 层海温各层时间系数之间的相关系数在 0.8 以上，并参照海温气候场 (图 1b) 垂直结构特征，可将春季 28 层海温第 1~9 层合成为第一层，深度为 85 m。夏季次表层海温的相似、相关系数图显示 (图 2e、f)，第一层与其它层的相似、相关都不通过显著性检验，可单独作为一层，深度为

5 m；第 2 层以下的大多数层之间的相似系数都能超过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验，2~13 层的相关系数都能通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。结合气候场 (图 1c) 垂直分布特征，把第 2~13 层即 5~125 m 合成为第二层。

对次表层海温场合成的计算公式为

$$T_s = \frac{1}{H'} \sum_{k=1}^m \frac{\Delta T_k + \Delta T_{k+1}}{2} (Z_{k+1} - Z_k), \quad (1)$$

其中, T_s 为合成的次表层海温距平; H' 为海水总深度; m 在冬季为 10、春季为 9, 夏季第二层中为 12; ΔT_k 为第 k 层海温距平; Z_k 为第 k 层深度。据此, 算出冬季、春季第一层和夏季第二层次表层海温合成距平场。夏季第一层单独作为一层, 故不采用 (1) 式计算。下面分析中, 冬季、春季主要分析第一层合成海温场, 夏季分析第一层和第二层合成场。

4 北太平洋次表层海温与高度场及我国夏季降水的关系

气候异常是由大气环流异常引起, 而大气环流异常与海温异常之间又是相互作用的 (Namias, 1963; Davis, 1976; Namias and Cayan, 1981; 赵永平等, 1997)。为了研究北太平洋海温异常对中国夏季降水异常的影响, 本文采用时滞奇异值分解 (SVD) 方法, 首先研究北太平洋次表层海温异常与大气环流异常之间的时滞相关关系, 在此基础上, 进一步研究大气环流异常以及北太平洋海温异常对中国夏季降水的影响, 旨在探寻影响中国夏季降水异常的可能因子及影响途径。用 500 hPa 位势高度场反映大气环流的状况, 做 SVD 的异常场都进行了标准化处理, 下面给出分析结果。

4.1 方差分析

表 1 给出了 500 hPa 位势高度场、北太平洋次表层海温场和中国夏季降水场三者之间做时滞 SVD 分解所得第一模态协方差平方和贡献率 (SCF), 其中, 冬季超前于春季、夏季, 指的是前冬。由表 1 可见, 冬季大气环流场与同期 (冬季) 和后期 (春、夏季) 次表层海温场第一耦合模态的 SCF 均通过显著水平 $\alpha=0.01$ 的蒙特卡洛显著性检验, 与后期春季次表层海温场的第一耦合模态 SCF 最大, 达 54.5%, 与夏季次表层海温场第二层的第一耦合模态 SCF 也达 54.0%, 说明冬季大气环流异常对同期及后期次表层海温异常存在显著影响, 特别对后期春季次表层海温异常的影响最显著。许多观测分析和数值试验研究表明, 中高纬海域海气相互作用主要表现在大气对海洋有较强的驱动作用 (Palmer and Sun, 1985; Wallace and Jiang, 1987; Deser and Timlin, 1997), 冬季最强 (温娜, 2006)。

根据上文可见, 北太平洋区域冬季大气对次表层海温的驱动作用很强, 但对春季次表层海温的驱动作用达到最强, 结论差异可能主要在于本文考虑的是次表层海温, 而非表层海温。

表 1 SVD 第一模态协方差平方和贡献率 SCF

Table 1 Squared covariance fraction of the first singular value decomposition (SVD) mode

	500 hPa 高度场			夏季降水
	冬季	春季	夏季	
冬季海温	48.76%	39.06%	33.51%	33.37%
春季海温	54.46%	44.43%	42.88%	33.42%
夏季第一层海温	37.66%	34.10%	49.35%	24.23%
夏季第二层海温	53.95%	48.01%	40.29%	29.37%
夏季降水	32.31%	28.97%	23.77%	

进一步对春季次表层海温场与同期及后期夏季大气环流场进行时滞 SVD 分析, 得到第一模态的 SCF 分别为 44.4% 和 42.9%, 通过显著水平 $\alpha=0.01$ 的蒙特卡洛检验。中纬度大气内部变化非常强, 大气内部动力学的持续时间大约低于 1 个月, 故春季海温场对同期大气环流的影响中不排除大气自身内部作用的影响, 但春季次表层海温场与夏季大气环流的显著耦合关系, 时滞时间远大于大气自身变化的时间, 故可认为春季次表层海温场异常持续影响同期及后期大气环流异常。

夏季北太平洋第一层海温与同期大气环流的相互作用较第二层更强 (SCF 49.4% 大于 40.3%), 那么它们对中国夏季降水分布型式的影响是否相同? 下文给出具体分析。

4.2 冬季 500 hPa 高度场和春季海温场耦合时空特征

图 3 给出了冬季 500 hPa 高度场与春季北太平洋次表层海温场 SVD 分析的第一耦合模态。其时间系数 (图 3c) 显示二者呈显著正相关, 相关系数为 0.75。结合奇异向量和时间系数可见, 当冬季 500 hPa 高度场阿留申地区的槽加深、位置偏南、偏东, 副热带高压偏强, 相应春季北太平洋次表层海温场 45°N 以南的北太平洋中部区域异常偏冷, 冷中心位于西风漂流区; 在 45°N 以北、140°W 以东及黑潮区域海温均偏暖, 最强暖中心位于北美沿岸的阿拉斯加湾海域。这是由于冬季阿留申地区的槽加深, 位置偏南、偏东, 其后部西北气流干而冷,

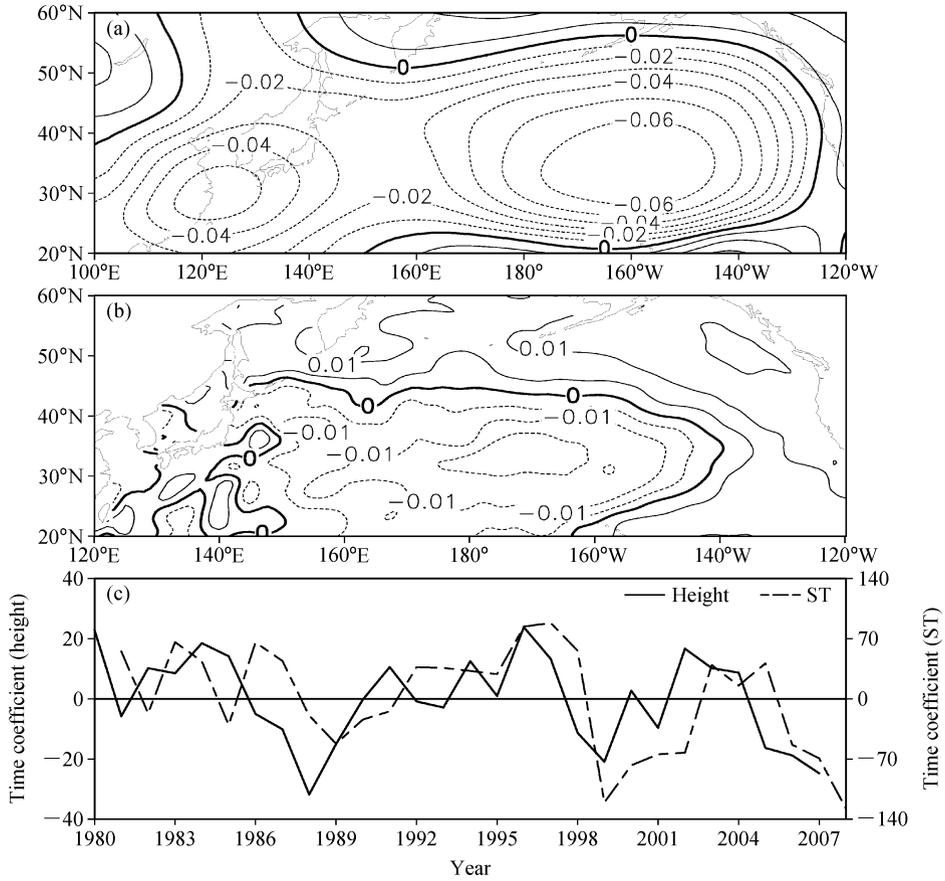


图3 冬季 500 hPa 高度场与春季海温场的 SVD 第一模态时空分布图：(a) 高度场（等值线间隔：0.01）；(b) 海温场（等值线间隔：0.005）；(c) 时间系数（实线：高度场，虚线：海温场）

Fig. 3 The temporal and spatial patterns of the first SVD mode for 500-hPa height field in winter and ST in spring: (a) Height field (contour interval; 0.01); (b) ST (contour interval; 0.005); (c) time coefficients

导致局低气温降低，由于海温变化的滞后性，海气温差增加；低层偏强的阿留申低压和副高，导致中纬度西风异常增强，使北太平洋中部海水易大量散热而降温；另一方面，北太平洋中部低层的气旋性环流可能会引起次表层海流辐散，冷海水上翻也可能导致北太平洋中部海温降低。低层阿留申低压西北部的偏东气流阻碍了北太平洋西北部冷空气的侵袭，使得亲潮区北部气温上升，海洋散热减少并升温；黑潮区由于大陆反气旋环流东侧干冷的东北气流偏东，导致黑潮延体区海温降低，但大陆沿岸的黑潮区域则为正异常；北美沿岸为来自低层气旋环流的温暖西南气流，不利于该区域海温降低，故这一区域次表层海温为正异常。

4.3 春、夏季海温场与夏季 500 hPa 高度场耦合时空特征

由表 1 可知，春季次表层海温场与春季及其后

夏季 500 hPa 高度场之间均存在强的海气相互作用。这里主要分析春季海温场和夏季 500 hPa 高度场第一对模态（图 4）特征，二者同期耦合特征与此类似，但高度场中副高的位置偏东（图略）。可见，次表层海温场在西风漂流区、阿拉斯加湾区域的负、正异常都明显增强，结合时间系数可见，当春季北太平洋中部及黑潮区域次表层海温场偏冷，阿拉斯加及周围的扇形区域偏暖，夏季 500 hPa 中纬度阿留申地区的槽、贝加尔湖附近的槽偏深，位置也较气候位置偏东、偏南，引导北方冷空气南下；副高加强西伸且较气候位置偏南。西太平洋副高西北部暖湿的西南气流与北方的冷空气交汇于长江流域，有利于造成这一地区降水偏多。可见，春季次表层海温场对后期大气环流的持续影响有利于形成长江流域降水偏多（或反位相）的分布型式。

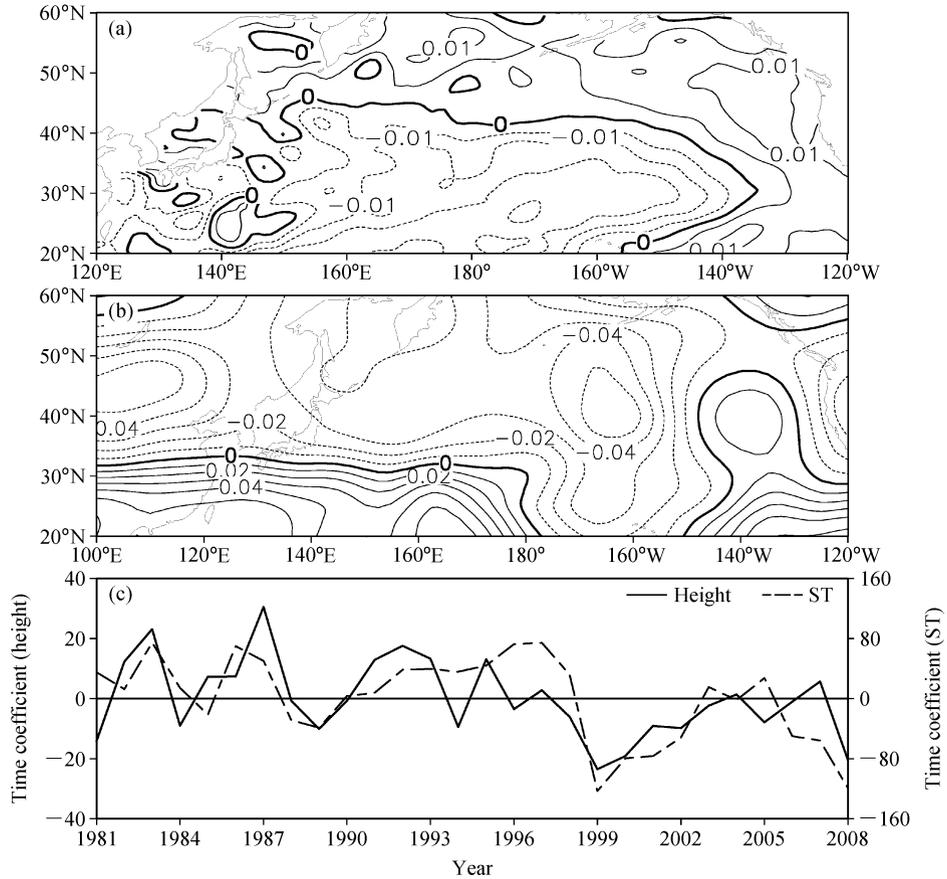


图4 春季海温场与夏季500 hPa高度场的SVD第一模态时空分布图:(a)海温场(等值线间隔:0.005);(b)高度场(等值线间隔:0.01);(c)时间系数(实线:高度场,虚线:海温场)

Fig. 4 The temporal and spatial patterns of the first SVD mode for ST in spring and 500-hPa height field in summer: (a) ST (contour interval: 0.005); (b) height field (contour interval: 0.01); (c) time coefficients

由上面分析可知,春季海温异常持续影响大气环流场异常,有利于形成长江流域多雨或者相反分布型式,夏季北太平洋海温与同期大气环流又是如何相互作用?由于夏季北太平洋次表层海温可以分为两层,分别分析了第一层和第二层海温与大气环流场的相互作用模态,发现二者与同期大气环流的相关模态都为显著,由SCF知第一层海温与大气环流场相互作用更大。第二层海温与大气环流场的相关模态与图4类似,再次反应了次表层海温持续影响夏季大气环流;第一层海温与大气环流的相关模态中,除了黑潮再循环区和北美沿岸,几乎整个北太平洋区域均为负距平,大气环流场模态类似图4b,只是 160°W 以东的负距平区范围略大(图略)。巢纪平和王彰贵(1993)指出,深厚混合层与弱海气相互作用相联系,也即混合层薄的区域和季节,海气相互作用会更强。从图1c可以看出,夏季

北太平洋混合层最浅,这可能是这一季节大气环流和第一层海温场相互作用比和第二层海温更强的原因之一。

4.4 春、夏季北太平洋海温场与夏季中国降水场的耦合时空特征

图5a、b给出了春季海温场与夏季降水场的SVD第一对耦合模态,时间系数(图5c)显示二者呈显著正相关。图5a与图4a类似,图5b中国东部江淮下游、山东半岛和华南沿海地区为负异常,其他区域均为正异常。结合时间系数和奇异向量场可见,当春季北太平洋中南部偏冷, 40°N 以北的中纬度太平洋偏暖时,中国夏季东部长江中、上游、黄河流域和东北降水偏多,江淮下游、山东半岛及华南降水偏少。

由4.3节可知,夏季大气环流场与第一层海温的相互作用要大于与第二层海温的相互作用,有必

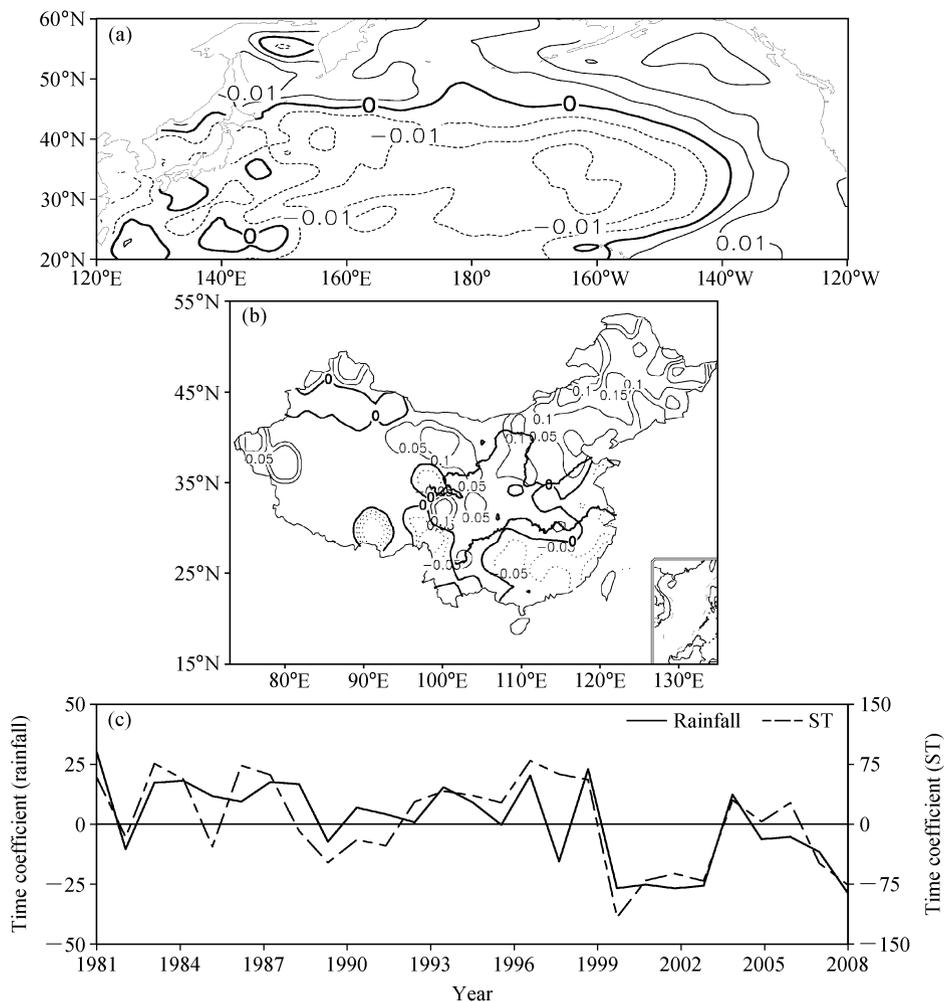


图5 春季海温场与夏季降水场SVD分析的第一模态时空分布图:(a)海温场(等值线间隔:0.01);(b)降水场(等值线间隔:0.05);(c)时间系数(实线:降水场,虚线:海温场)

Fig. 5 The temporal and spatial patterns of the first SVD mode for ST in spring and precipitation in summer: (a) ST (contour interval: 0.005); (b) rainfall (contour interval: 0.05); (c) time coefficients

要进一步分析夏季北太平洋第一、二层海温异常与中国夏季降水异常的关系。第二层海温异常与中国夏季降水异常分布形态与图5类似(图略),说明次表层海温对中国夏季降水的影响一直持续到夏季。图6a、b给出了夏季北太平洋第一层海温异常与降水异常的SVD第一对奇异向量及其时间系数(图6c)。可见,当夏季除黑潮再循环区和北美沿岸外,整个北太平洋表层海温以负异常为主时,长江流域、东北降水将偏多,华北和华南降水将偏少。比较可知,夏季第一层海温与降水相关模态的SFC要小于第二层海温对应的SFC,究竟最终夏季降水型式应该类似图5b(主要由第二层海温决定)还是图6b(主要由第一层海温决定)?因为气候异常通

常直接由大气环流异常造成,由4.3节知夏季大气环流场与第一层海温的相互作用大于与第二层的结论推测,中国夏季降水分布形态可能更接近图6b的分布形势,是否如此呢?下节分析夏季大气环流场与同期降水场的相关模态。

4.5 夏季500 hPa高度场与夏季中国降水场耦合时空特征

图7a、b是夏季500 hPa高度场与夏季降水场的SVD第一奇异向量场,通过显著水平 $\alpha=0.01$ 的Monte-Carlo检验。时间系数呈显著正相关(图7c),其相关系数达到0.8。结合时间系数和奇异向量场分析可见,阿留申地区的槽和青藏高原北部的大槽加深,西北太平洋副热带高压加强、西伸,有

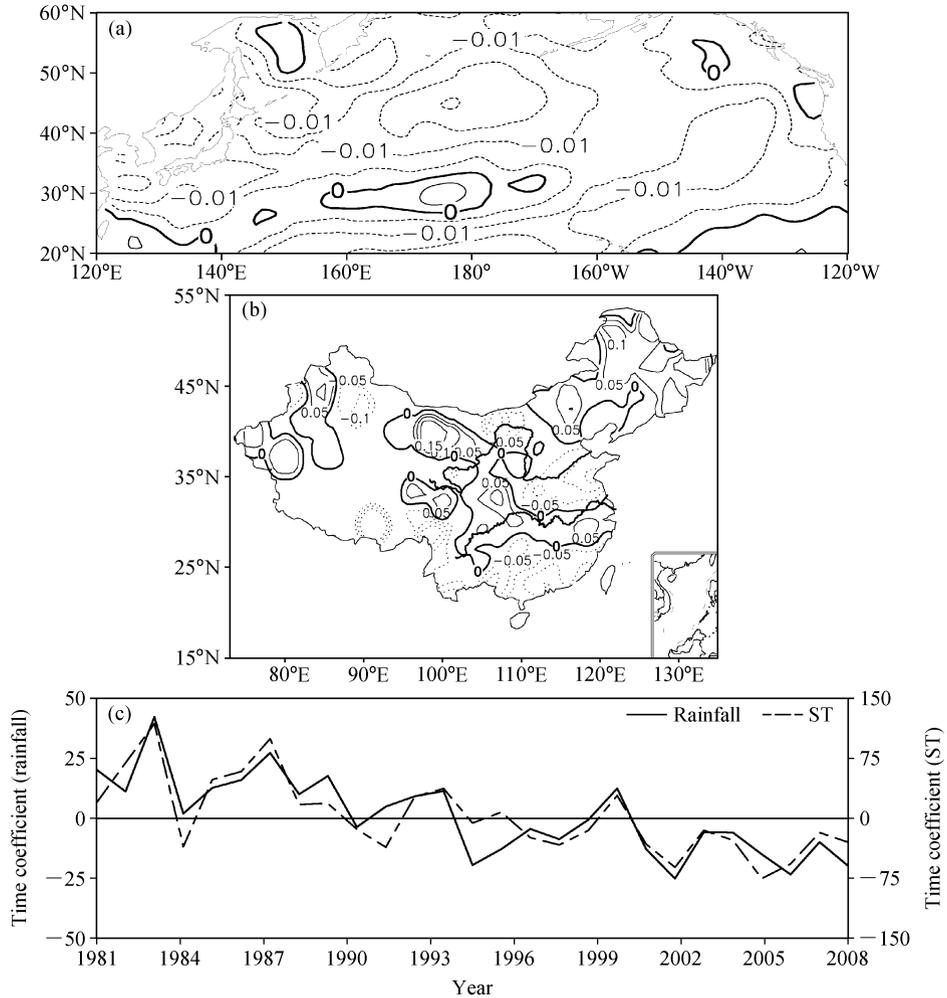


图 6 夏季第一层海温场与夏季降水场 SVD 分析的第一模态时空分布图: (a) 海温场 (等值线间隔: 0.01); (b) 降水场 (等值线间隔: 0.05); (c) 时间系数 (实线: 降水场, 虚线: 海温场)

Fig. 6 The temporal and spatial patterns of the first SVD mode for the first level ST and precipitation in summer: (a) ST (contour interval: 0.005); (b) rainfall (contour interval: 0.05); (c) time coefficients

利于将西南暖湿气流输送到我国长江流域, 造成长江流域降水偏多, 华南、华北降水偏少。图 7b 这样的降水分布型式确实类似图 6b, 证实了 4.4 节的推测。但也注意到, 图 7b 中长江流域降水正异常区域主体位于长江以北, 图 6b 中则位于长江以南, 再结合图 5b 中长江以北以正异常为主的特征, 可以认为, 图 7b 中这样降水的分布型是由大气环流异常以及与之相互作用的表层、次表层海温异常共同造成的。

进一步计算了图 4c 中夏季 500 hPa 高度场时间系数与图 7c 中夏季高度场时间系数的相关系数, 结果为 0.86; 类似地, 计算了图 6c 中夏季降水场时间系数和图 7c 中夏季降水场时间系数的相关系

数为 0.55, 二者均都通过显著性水平 $\alpha=0.001$ 的显著性检验。前者进一步说明春季海温对夏季高度场的影响与夏季高度场本身的变化非常相似, 也即春季海温场持续影响着同期及后期夏季环流场; 后者进一步说明夏季海温对夏季降水的影响与夏季大气环流异常对夏季降水场的影响相似, 也即夏季海温异常和大气环流异常相互作用, 共同造成了夏季降水场的异常形态。

综上, 冬季大气环流持续影响着同期和后期春季次表层海温异常, 且对春季次表层海温影响达最大。春季次表层海温异常又持续影响着春、夏季大气环流异常。夏季, 由于北太平洋海洋本身特性的变化, 该季节这一海域混合层变浅, 使参与海气相

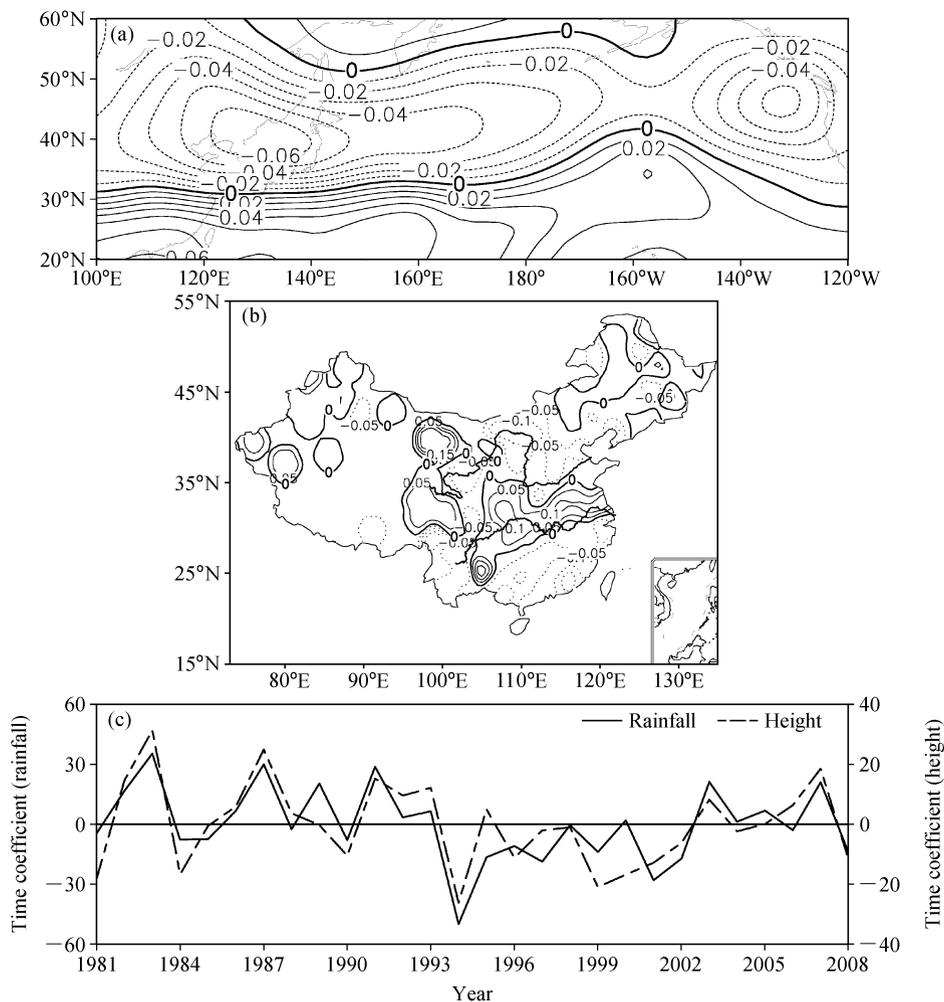


图 7 夏季 500 hPa 高度场与夏季降水场的 SVD 第一耦合模式时空分布图：(a) 高度场（等值线间隔：0.01）；(b) 降水场（等值线间隔：0.05）；(c) 时间系数（实线：降水场，虚线：高度场）

Fig. 7 The temporal and spatial patterns of the first SVD mode for 500-hPa height field and precipitation in summer: (a) Height field (contour interval; 0.01); (b) rainfall (contour interval; 0.05); (c) time coefficients

互作用的海洋第一层比第二层更显著，其与大气环流相互作用，最终造成长江流域、东北降水偏多，华北和华南降水偏少或与之反位相的降水分布型式，第二层海温与大气环流相互作用更有利于上述降水分布型式的形成。

5 结论

本文在分析北太平洋次表层海温层际相似性特征基础上，对次表层海温场进行重新分层，冬、春季主要考虑第一层，夏季考虑第一层和第二层。进一步采用时滞 SVD 方法，研究了大气环流场、北太平洋次表层海温场、中国夏季降水场三者之间的时滞相关关系，主要结论如下：

(1) 冬季大气环流持续影响着同期和后期次表层海温异常，且对春季次表层海温影响达最大；春季次表层海温又持续影响着同期和后期的大气环流异常，故春季北太平洋次表层海温场是联系前、后期大气环流的关键因素。

(2) 北太平洋次表层海温场影响中国东部夏季降水的途径主要是：当前期冬季阿留申地区的槽偏深、位置偏东、副热带高压偏强，相应后期春季北太平洋中南部区域异常偏冷，阿拉斯加附近的扇形区域异常偏暖。春季海温场的这种分布型式会使同期和后期夏季阿留申地区的槽更深，位置也较气候位置偏南，副高西伸加强且偏南，冷暖空气在长江流域交汇，有利于长江流域降水偏多。夏季，由

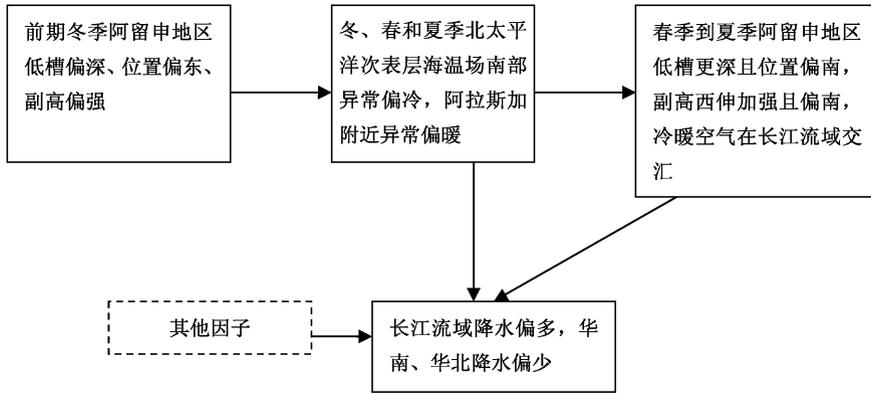


图 8 太平洋次表层海温场、大气环流场与我国夏季降水场三者关系示意图

Fig. 8 The schematic diagram showing the possible relations among the ST, atmospheric circulation, and summer rainfall in eastern China

于北太平洋混合层变浅，与大气环流场相互作用更显著的是北太平洋表层海温场，它们共同作用导致夏季长江流域降水偏多，华南、华北降水偏少或与之相反分布型式。春季次表层海温场对春、夏季大气环流的持续影响则有利于形成产生上述降水分布型式的大气环流异常。

综上，可以用图 8 中所给出的示意图描述三者之间相互作用的关系，即北太平洋冬季大气环流场影响其后特别是春季次表层海温场，春季次表层海温场对大气环流场有正反馈，持续影响春季及其后夏季大气环流场，异常的夏季大气环流场和异常的表层海温场共同作用，引起中国东部夏季降水异常。这些结论只是统计研究结果，还需要通过数值模拟等方法进一步验证。

参考文献 (References)

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 [J]. 大气科学, 1 (1): 1-12. Chen L T. 1977. The effects of the anomalous sea-surface temperature of the equatorial eastern Pacific ocean on the tropical circulation and rainfall during the rainy period in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1 (1): 1-12.

巢纪平, 王彰贵. 1993. 简单的热带海气耦合波——Rossby 波的相互作用 [J]. 气象学报, 51 (4): 385-393. Chao J P, Wang Z G. 1993. Simple air-sea coupled waves in the tropics—The interaction between Rossby waves [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 51 (4): 385-393.

Davis R E. 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean [J]. J. Phys. Oceanogr., 6: 249-266.

Deser C, Timlin M S. 1997. Atmosphere-ocean interaction on

weekly timescales in the North Atlantic and Pacific [J]. J. Climate, 10: 393-408.

归佩兰. 1978. 北太平洋海水表面温度特征及相应的大气环流型 [J]. 中国科学院大气物理研究所集刊: 海气相互作用与旱涝长期预报, 6: 13-26. Gui P L. 1978. Characteristics of sea surface temperature over the North Pacific and corresponding general circulation patterns [J]. Periodical of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences: Air-Sea Interaction and Long-Term Forecast of the Drought/Floods (in Chinese), 6: 13-26.

黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究 [J]. 大气科学, 14 (1): 108-117. Huang R H. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their physical mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 14 (1): 108-117.

黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. 大气科学, 18 (2): 141-151. Huang R H, Sun F Y. 1990. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (2): 141-151.

黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. 大气科学, 30 (4): 545-560. Huang R H, Chen J L, Huang G, et al. 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 545-560.

简茂球, 罗会邦, 乔云亭. 2004. 青藏高原东部和西太平洋暖池区大气热源与中国夏季降水的关系 [J]. 热带气象学报, 20 (4): 355-364. Jian M Q, Luo H B, Qiao Y T. 2004. On the relationships between the summer rainfall in China and the atmospheric heat sources over the eastern Tibetan Plateau and the western Pacific warm pool [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (4): 355-364.

- 李超. 1992. 埃尔尼诺对我国汛期降水的影响 [J]. 海洋学报, 14 (5): 45-51. Li C. 1992. The effect of El Niño on rainfall in floods season in China [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 14 (5): 45-51.
- 李麦村, 吴仪芳, 黄嘉佑. 1987. 中国东部季风降水与赤道东太平洋海温的关系 [J]. 大气科学, 11 (4): 365-372. Li M C, Wu Y F, Huang J Y. 1987. The relationship between the monsoon rainfall over eastern China and the eastern equatorial Pacific sea surface temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 11 (4): 365-372.
- 李丽平, 王盘兴, 李泓, 等. 2003. 北太平洋区域浅层海温与海平面气压场年代际异常关系的分析 [J]. 热带气象学报, 19 (4): 357-366. Li L P, Wang P X, Li H, et al. 2003. Analysis of interdecadal anomaly relations between sub-surface sea temperature and sea level pressure over the North Pacific [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (4): 357-366.
- 李忠贤, 孙照渤. 2004. 1 月份黑潮区域海温异常与我国夏季降水的关系 [J]. 南京气象学院学报, 27 (3): 374-380. Li Z X, Sun Z B. 2004. Relation between January Kuroshio SSTA and summer rainfall in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27 (3): 374-380.
- 梁萍, 丁一汇, 何金海. 2008. 长江下游夏季降水与东亚夏季风及春季太平洋海温的关系 [J]. 高原气象, 27 (4): 772-777. Liang P, Ding Y H, He J H. 2008. Relations between summer rainfall over the lower reach of Yangtze River and East Asian summer monsoon as well as sea surface temperature over the Pacific in spring [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 772-777.
- 林学椿. 1978. 北太平洋海水表面温度异常及其对东亚大气环流的影响 [J]. 中国科学院大气物理研究所集刊: 海气相互作用与旱涝长期预报, 6: 40-70. Lin X C. 1978. The sea surface temperature anomalies over North Pacific and its effect on East Asia general circulation [J]. Periodical of Institute of Atmospheric Physics of Chinese Academy of Sciences: Air-Sea Interaction and Long-Term Forecast of the Drought/Floods (in Chinese), 6: 40-70.
- 林学椿. 1999. 北太平洋海表持续加热对夏季中国降水及大气环流的影响 [J]. 热带气象学报, 15 (3): 258-266. Lin X C. 1999. The sea surface temperature sustained heating in the North Pacific influence flood season rainfall in China and general circulation [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 15 (3): 258-266.
- 刘秦玉. 2004. 北太平洋副热带海洋环流气候变化研究 [J]. 中国海洋大学学报, 34 (5): 689-696. Liu Q Y. 2004. Study on climate variability of the subtropical gyre in the North Pacific [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 34 (5): 689-696.
- 吕炯. 1950. 海水温度与水旱问题 [J]. 气象学报, 21 (1): 1-15. Lü J. 1950. The sea temperature anomalies and the problem of floods or drought [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 21 (1): 1-15.
- 苗秋菊, 徐祥德, 张雪金. 2002. 长江中下游旱涝的环流型与赤道东太平洋海温遥相关波列特征 [J]. 气象学报, 60 (6): 688-697. Miao Q J, Xu X D, Zhang X J. 2002. Characteristics of teleconnection wave train for circulation pattern of flood/drought in the middle and lower reaches of Yangtze River and sea surface temperature over equatorial eastern Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (6): 688-697.
- 闵绍忠, 李春, 吴芄. 2005. 夏季热带西太平洋对流与长江中下游降水关系的研究 [J]. 大气科学, 29 (6): 947-954. Min J Z, Li C, Wu P. 2005. A study of the relationship between summer tropical convection over the western Pacific and the rainfall in the middle lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 947-954.
- Namias J. 1963. Large-scale air-sea interactions over the North Pacific from summer 1962 through the subsequent winter [J]. J. Geophys. Res., 68: 6171-6186.
- Namias J, Cayan D R. 1981. Large-scale air-sea interactions and short-period climatic fluctuations [J]. Science, 214: 869-876.
- Palmer T N, Sun Z B. 1985. A modeling and observational study of the relationship between sea surface temperature in the northwest Atlantic and the atmospheric general circulation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111: 947-975.
- 祁丽燕, 孙照渤, 李忠贤. 2007. 北太平洋冬季次表层热状况及其与中国东部夏季气候的关系 [J]. 南京气象学院学报, 30 (2): 153-161. Qi L Y, Sun Z B, Li Z X. 2007. Winter subsurface layer thermal state character of the North Pacific and its relationship with the summer climate in the east of China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (2): 153-161.
- 钱维宏, 朱江, 王永光, 等. 2009. 江淮梅雨和赤道太平洋区域海温变化的关系 [J]. 科学通报, 54 (1): 79-84. Qian W H, Zhu J, Wang Y G, et al. 2009. Regional relationship between the Jiang-Huai Meiyu and the equatorial surface-subsurface temperature anomalies [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 54 (1): 79-84.
- 孙安健, 郭艳君. 2003. 我国西北地区春季旱涝气候特征研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 1-8. Sun A J, Guo Y J. 2003. A study of climate features of flood/drought during spring season in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 1-8.
- 唐佑民. 1993. 太平洋海温的季节演变与长江中下游及其以南地区夏季降水的关系 [J]. 海洋学报, 15 (5): 50-59. Tang Y M. 1993. The relation between the seasonal SST variation in the Pacific Ocean and the summer precipitation anomalies in the middle and lower reaches of the Yangtze River and its south area [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 15 (5): 50-59.
- Wallace J M, Jiang Q. 1987. On the observed structure of the interannual variability of the atmosphere/ocean climate system [M]// Cattle H. Atmospheric and Oceanic Variability. Royal Meteorological Society, 17-43.
- 王慧, 王谦谦. 2002. 淮河流域夏季降水异常与北太平洋海温异常的关系 [J]. 南京气象学院学报, 25 (1): 45-54. Wang H,

- Wang Q Q. 2002. Relationship between summer precipitation anomalies in the Huaihe basin and SSTA over the North Pacific [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 25 (1): 45–54.
- 温娜. 2006. 北太平洋、北大西洋中纬度海气相互作用的部分统计特征[D]. 中国海洋大学硕士学位论文. Wen Na. 2006. Some statistical properties of the mid-latitude ocean–atmosphere interaction in the North Pacific and the North Atlantic [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China.
- 翁学传, 张启龙, 颜廷壮. 1996. 热带西太平洋暖池次表层水热含量变化及其与我国东部汛期降水和副高的相关关系 [J]. *海洋科学集刊*, 37: 1–9. Weng X C, Zhang Q L, Yan T Z. 1996. Variation of the subsurface water heat content in the tropical western Pacific warm pool area and its relation to precipitation in eastern China and to the western Pacific subtropical high [J]. *Studia Marina Sinica* (in Chinese), 37: 1–9.
- 吴迪生. 1996. 热带西太平洋海—气热量通量研究 II. 热带气旋状况下海—气热量交换的特征 [J]. *大气科学*, 20 (5): 533–540. Wu D S. 1996. Atmosphere–ocean heat flux over tropical western Pacific. Part II: Atmosphere–ocean heat exchange under the condition of tropical cyclones [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20 (5): 533–540.
- 吴国雄, 王敬方. 1997. 冬季中高纬 500 hPa 高度和海表温度异常特征及其相关分析 [J]. *气象学报*, 55 (1): 11–21. Wu G X, Wang J F. 1997. Correlation in middle and high latitudes between winter sea surface temperature and 500 hPa geopotential height [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 55 (1): 11–21.
- 吴仪芳, 李麦村. 1983. 江淮旱涝时北太平洋海温异常演变 [J]. *海洋学报*, 5 (1): 19–27. Wu Y F, Li M C. 1983. The evolution of the North Pacific SSTA during the period of floods or drought in the Jianghuai basin [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 5 (1): 19–27.
- 吴志彦, 闵锦忠, 陈红霞, 等. 2008. 东海黑潮温、盐度与中国东部气温和降水的相互关系 [J]. *海洋科学进展*, 26 (2): 156–162. Wu Z Y, Min J Z, Chen H X, et al. 2008. Relationship between the Kuroshio temperature and salinity in the East China Sea and the air temperature and precipitation in the East China [J]. *Advances in Marine Science* (in Chinese), 26 (2): 156–162.
- 杨芳林, 袁重光. 1995. 夏季赤道东太平洋海温异常对全球及东亚短期气候变化影响的数值试验 [J]. *大气科学*, 19 (5): 535–544. Yang F L, Yuan C G. 1995. Numerical experiment on the influence of sea-surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific in summer upon the short-range climate changes over globe and in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (5): 535–544.
- 杨素雨, 严华生. 2007. 冬季北太平洋南海温异常对我国汛期雨带类型的影响研究 [J]. *应用气象学报*, 18 (2): 193–201. Yang S Y, Yan H S. 2007. Impact of the north and south SSTA in North Pacific on rainfall patterns of flood season in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 18 (2): 193–201.
- 于淑秋, 林学椿. 1997. 北太平洋海温的气候跃度及其对中国汛期降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 13 (3): 265–275. Yu S Q, Lin X C. 1997. Climatic jump of North Pacific SST and its effect on precipitation of floods season in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 13 (3): 265–275.
- 张启龙, 翁学传, 程明华. 1999. 华北地区汛期降水与热带西太平洋暖池和黑潮的关系 [J]. *高原气象*, 18 (4): 575–583. Zhang Q L, Weng X C, Cheng M H. 1999. Relationship between the precipitation in the rainy season in North China and the tropical western Pacific warm pool and Kuroshio [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 18 (4): 575–583.
- 张天宇, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2007. 春季黑潮区海温异常与我国夏季降水的关系 [J]. *热带气象学报*, 23 (2): 189–195. Zhang T Y, Sun Z B, Li Z X, et al. 2007. Relation between spring Kuroshio SSTA and summer rainfall in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 23 (2): 189–195.
- 赵永平, 陈永利, 翁学传. 1997. 中纬度海气相互作用研究进展 [J]. *地球科学进展*, 12 (1): 32–36. Zhao Y P, Chen Y L, Weng X C. 1997. Advances in the mid-latitude air–sea interaction research [J]. *Advance in Earth Science* (in Chinese), 12 (1): 32–36.
- 朱乾根, 滕莺, 徐国强. 2000. 北太平洋中纬海温异常对中国东部夏季降水影响的可能途径 [J]. *南京气象学院学报*, 23 (1): 1–8. Zhu Q G, Teng Y, Xu G Q. 2000. The possible mechanism of the effects of SSTA in North Pacific on East China summer rainfall [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 23 (1): 1–8.
- 宗海锋, 张庆云, 陈烈庭. 2008. 东亚—太平洋遥相关型形成过程与 ENSO 盛期海温关系的研究 [J]. *大气科学*, 32 (2): 220–230. Zong H F, Zhang Q Y, Chen L T. 2008. A study of the processes of East Asia–Pacific teleconnection pattern formation and the relationship to ENSO [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (2): 220–230.