

冬季风异常对西北太平洋海温影响的区域性特征

秦正坤 孙照渤

南京信息工程大学 气象灾害和环境变化重点开放实验室, 南京 210044

摘要 分析东亚冬季风异常对西北太平洋海温的影响, 结果表明其影响存在显著的区域性特征。冬季风强(弱)年, 黑潮流域及我国近海区出现明显的降温(升温), 而太平洋暖池区北部和亲潮区海温出现一定的上升(下降)趋势。进一步的物理机制分析和数值模式的结果表明, 东亚冬季风对影响西北太平洋海温变化的热力因子与动力因子都有十分显著的影响, 区域性特征的成因主要是各海区的大气和海洋对冬季风异常的响应方式存在差异。

关键词 冬季风异常 西北太平洋海温 区域性特征

文章编号 1006-9895(2006)02-0257-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

Influence of Abnormal East Asian Winter Monsoon on the Northwestern Pacific Sea Temperature

QIN Zheng-Kun and SUN Zhao-Bo

Key Laboratory of Meteorological Disaster and Environmental Variation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The strength of cold air acts as an intense signal of midlatitude air-sea interaction and represents a primary feature indicating the difference from the counterpart at lower latitudes. Researchers have shown that East Asian winter monsoon anomaly (WMA) leads to an abnormal mode of the tropical Pacific sea surface temperature (SST) on a synchronous and subsequent basis, and the anomaly would persist beyond one season, so that it would obviously impose great influence on atmosphere circulations in the following season. As a result, based on the WMA, a study of the relationship between the monsoon and SST has been the topic of great interest for a large number of meteorologists. East Asian winter monsoon and Pacific SST are innegligible factors for the rainy-season precipitation in the Yangtze River and the Huaihe River valleys of China. And the monsoon exerts remarkable influence on the precipitation in a season-spaced way.

It has been shown that the SST effect links the monsoon with the season-spaced rainfall. Further researches point out that the northwestern Pacific SSTA is particularly important to the Yangtze River and the Huaihe River valleys rainfall, because of its proximity to the Asian mainland.

The SSTA of the western Pacific near-equatorial warm pool, Kuroshio and Oyashio currents produces different impact on the rainfall in the studied basins, indicating that SSTA both in large and small mainland-close areas shows its pronounced effect on the basin precipitation. Using simulation and statistic analysis, the authors investigate the regional characteristics of East Asian WMA influencing the Northwestern (NW) Pacific SST. The WMA with its effect on the NW Pacific SST has been addressed both statistically and via modeling.

Statistic analysis indicates that in years of intense WMA, up to the depth of 300 m, the NW Pacific SST exhibits remarkable variation on a regional basis, with its decrease thought the Kuroshio area in sharp contrast to the rise

in the warm pool and Oyashio on both sides, and vice versa in years of weak WMA.

As demonstrated by further statistics and simulation, the regional variation depends largely on varying-degree responses of the air and waters there to the WMA for its formation. Amplified winter monsoon brings plenty of dry, cold air from the north, with the wind field exhibiting pronounced singularity. The Kuroshio area is covered by the anomalies of stronger northerly wind and an anomalous intense anticyclonic circulation shows up in the middle of the North Pacific, with its impacts reaching as far as the western equatorial Pacific.

No doubt, the anomaly of the wind field is the cause of the abnormality of oceanic currents. As a result, an extraordinary anticyclonic oceanic current occurs in the eastern part of the Kuroshio and a weaker (stronger) counterpart in the southern part of the warm pool (the west of the North Pacific), with the characteristics of the oceanic currents in rough correspondence to those of low-level wind fields.

On the basis of WMA-caused anomalous features of the atmospheric and oceanic fields, it is showed that during the strong monsoon the dry, cold air and northerly abnormal winds give rise to the great intensification of sea-air heat fluxes, leading to the drop of Kuroshio SST due to excessive loss of heat, and remarkable temperature decrease also can be found in the deep levels in virtue of convergent sinking of cooled surface water. As revealed by researchers, in years of strong winter monsoon there occurs apparent rise in sea water temperature in the equatorial warm pool due dominantly to the winter monsoon-caused abnormal cyclonic oceanic currents that lead to convergent sinking of water for warming. This study has reached the same conclusion. But the sea water warming in the north of the warm pool is due to other reasons, where sea-air heat flux reduces on account of moist, warm flows of the south-western part of the cyclone wherein sea-air flux is diminished, other being the cause of reduction of latent heat from condensation resulting in weakened heat loss from water in this region, which is supported by observations.

Also, under the effect of warmer airflow in the northeastern part of the cyclone, the sea-air heat fluxes are markedly decreased over the Oyashio and under the impacts of divergent extraordinary cyclonic oceanic currents, low-latitude warm water goes poleward, which serves as an noteworthy factor for water warming. Besides, the convergent sinking of warm water in the western boundary layer is the most important cause of the warming in the deep levels of Oyashio area.

In summary, due to the difference in the anomaly of air-sea heat fluxes and sea current which result from the WMA, opposite SST variation is found in the Kuroshio vs the NW Pacific and Oyashio. Because SST acts as a link between winter monsoon and season-lagged SST, the present study is of significance to in-depth study of the WMA effect on summer rainfall over the Yangtze River and the Huaihe River valleys in China.

Key words abnormal winter monsoon, the northwestern Pacific temperature, regional characters

1 引言

我国地处东亚季风区, 东亚季风变异严重影响着我国东部的旱涝等灾害性天气、气候的发生。近年来, 人们渐渐注意到冬季风在全球环流变化中的重要性。冬季风控制面积大, 影响时间长, 它的异常易带来冷害、大风等灾害天气, 而且冬季风也是北半球冬季最活跃的环流系统。

孙淑清等^[1]根据统计分析的结果指出, 东亚冬季风与我国夏季江淮流域旱涝之间存在较好的相关关系, 早年前冬, 东亚冬季风强劲, 寒潮活动频繁, 而涝年前冬的环流比较平直, 东亚冬季风较弱, 寒潮活动也少。陈隽和孙淑清^[2]进一步指出海温是冬、夏季隔季相关的联系纽带。赵永平等^[3]和倪冬

鸿等^[4]的研究指出, 黑潮及其附近海域海温异常能够对全球气候产生重要的影响。因此, 研究冬季风异常与西北太平洋海温的关系有明确的气候意义。吴国雄等^[5]的试验表明, 大气对海洋有最直接影响的是大气风场的变化, 冬季风异常能够驱动海流并产生海流异常, 并通过海水辐合辐散导致其海温发生相应的变化。同时, 赵永平等^[6]还进一步指出海气相互作用的强信号, 在热带海域主要是海表温度(SST)异常, 而在中纬度海洋则主要是冷空气的强度, 二者完全不同。忽视中低纬度海气相互作用强信号的明显差异, 是长期以来中纬度海气相互作用研究进展缓慢的根本原因。所以, 冬季风对中纬度海洋的影响是研究中纬度海气相互作用的重要方面, 这也引起了众多学者的注意。李崇银等^[7]通过

模拟得出, 持续的冬季风强(弱)异常将引起后期赤道中东太平洋海表水温的明显正(负)异常, 其分布类似观测到的 El Niño(La Niña)事件。穆明权^[8]的研究也得出了基本相似的结论。陈隽等^[9]通过统计研究也发现强冬季风年所对应的同期冬季海温异常是东太平洋偏冷, 而赤道西太平洋特别是暖池区偏暖, 亚洲沿岸至南海北部则偏冷。两者的异常海温型持续的时间尺度都是季节性的, 必将对后期环流产生影响。这也证明了进一步研究冬季风异常与海温关系的必要性。

海温是冬季风产生隔季影响的中介, 所以进一步揭示东亚冬季风与海温的耦合关系对于了解冬季风的隔季相关是非常必要的, 然而, 以往对两者之间关系的研究多集中在冬季风与热带海温的关系, 或者注重两者整体相关关系的研究, 对于区域性特征和两者关系形成的物理机制研究较少。

王谦谦等^[10]的研究表明, 在降水的气候预测中, 既要注意大的海温距平区, 还须注意尺度较小, 且直接与大陆毗邻的海温距平区。而西北太平洋海温异常的区域性分布特征对我国降水的影响也是早有研究。早在 1950 年, 吕炯等^[11]就研究过海水温度与中国水旱关系问题, 并指出不同的海温距平分布对应着中国雨季不同的雨带。中国科学院大气物理研究所的专家^[12]曾经分析过黑潮海表温度异常(SSTA)与我国汛期降水的关系。吴仪芳等^[13]的研究进一步指出不仅是黑潮区, 亲潮区前期海温异常变化也对我中国尤其是江淮区域降水产生显著的影响, 江淮涝年前冬二月亲潮区会呈现出负距平的异常海温分布。而张启龙等^[14]的研究则清楚地指出黑潮区和西太平洋暖池海温对我中国降水的影响区域是不尽相同的。陈烈庭等^[15]认为西北太平洋海温异常可能是通过副高南北振荡作用影响我国夏季雨带分布, 对应不同雨型, 无论同期或前期西北太平洋海温距平分布的基本形势都有明显不同的特点, 而且西北太平洋黑潮暖流区的海温与其周围(呈“>”型)的海温存在反相的变化。这些研究都充分证明邻近亚欧大陆的较小尺度海温异常对我中国降水的影响, 也表明研究西北太平洋较小尺度海温异常成因的重要性。因此, 在统计分析和数值模拟的基础上, 本文通过分区域的方式研究冬季风在西北太平洋海温异常区域性特征形成中的作用及其物理机制, 这对于进一步深入了解东亚冬季风异常在中

纬度的影响、小区域海温异常的形成以及在冬、夏季隔季相关中的作用有一定的益处, 也能对我中国降水预报提供一定的帮助。本文的研究重点是在冬季风引起的同期冬季西北太平洋海温的异常变化, 暂不研究后期海温异常的发展。

2 冬季风异常对海温影响的观测分析

2.1 资料简介

本文所用资料中, 大气资料是由 NCEP/NCAR 提供的 1949 年 1 月到 1999 年 12 月再分析月平均海平面气压场、气温场、表面风场和热通量场(感热、潜热和长波辐射), 以及 NOAA 提供的向外长波辐射($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格)。统计所用海温资料是 NOAA 提供的 1854 年 1 月到 2002 年 11 月延长重构的月平均海表温度场资料($2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 网格), 取其中 1949 年 1 月到 1999 年 12 月。数值分析中用到的温盐资料是来自 Levitus(1998)气候月平均温盐资料。

2.2 观测分析

为了研究的需要, 本文用季风指数来表征冬季风的强弱, 这里选取的冬季风指数计算方法是由郭其蕴^[16]提出, 经施能等^[17]改进的计算方法(图 1), 并根据绝对值大于 1.0 的标准从中选取强、弱季风年各 9 年, 分别为: 强冬季风年 1956、1961、1962、1966、1967、1973、1976、1980、1983 年; 弱冬季风年 1951、1953、1968、1972、1978、1987、1988、1989、1991 年。冬季定义为当年 12 月, 次年 1、2 月的平均。

首先, 为了分析冬季风与西北太平洋海温的协同变化情况, 这里通过合成分析的方法来检验冬季风异常强年和弱年西北太平洋海温的变化情况。为了讨论的方便, 用季风强年与弱年的差值代表强季风年的异常情况(下同)。

西北太平洋海区存在三个具有显著特征的海区, 即西太平洋暖池区、黑潮区和亲潮区。由上述研究可以发现, 这三个海区海温异常都会对我中国汛期降水产生显著的影响。这里主要的研究区域为($10^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$)。图 2 是强、弱冬季风年该区域海表温度的差值, 从图中可以清楚地看出, 冬季风异常年西北太平洋海温产生明显的变化, 而且变化具有显著的区域性特征。冬季风强年, 黑潮和我中国近海区海温明显降低, 降温区向东可以扩展到 180°E , 其区域覆盖整个黑潮及其续流

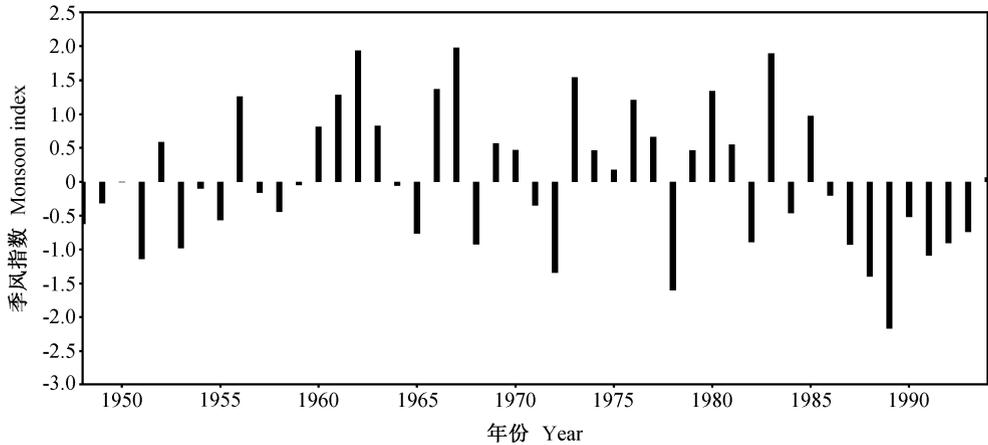
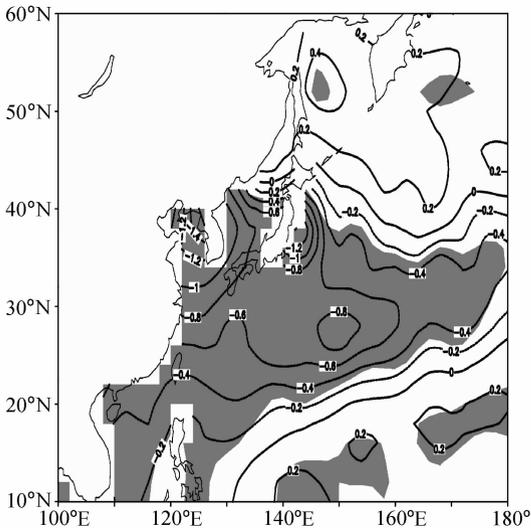


图1 1949~1994年东亚冬季风指数

Fig. 1 The index of East Asian winter monsoon from 1949 to 1994

图2 强、弱冬季风年海温差值(强-弱)(单位: $^{\circ}\text{C}$, 阴影区通过了0.05的信度检验)Fig. 2 Difference of sea surface temperature (SST) between strong and weak winter monsoon years (strong-weak) (units: $^{\circ}\text{C}$, the shaded areas: >0.05 confidence)

区, 主要降温大值区出现在我国近海和日本以东的亲潮与黑潮交界处。然而, 在其南面西太平洋暖池北部区域以及北面亲潮区域海温则升高。整个西北太平洋海温出现“十+”异常分布, 而且这三块区域都有部分区域通过了0.05的信度检验。这样明显的区域性特征形成的内在物理机制是一个值得研究的问题。因此, 以下主要对这方面作进一步的探讨。

3 区域性特征成因分析

海水温度变化的加速度取决于它的热量变化。

影响表层海洋热量的主要原因有太阳辐射、蒸发潜热、大气和海面间的感热交换、长波辐射、海洋平流热量输送以及海表与深层间的热量通量。由于太阳辐射变化较小, 所以不作考虑。因为热量变化特征是决定海温异常分布的主要因子, 所以这里以热量为出发点, 分析冬季风所引起的海水热量变化以及它们在海温变化中的作用。

冬季, 在中国大陆及沿海盛行由东北向西南的冬季季风, 冬季风带来的大量北方干冷空气及其强劲的风场都会给我国及沿海天气气候带来显著的影响。因此, 研究冬季风对海洋热量的影响也应该从冬季风的热力作用和动力作用这两个方面考虑。这里, 首先分析热力作用, 即冬季风异常引起的海气热交换的变化。同样, 依据上述季风指数对同期冬季西北太平洋海表感热、潜热和长波辐射进行合成分析(图3)。设定热量向上为正。

由图3可以清楚地看出冬季风异常强年引起的感热、潜热和长波辐射异常存在共同的特性, 主要的异常区域都在黑潮和我国近海海区, 且都是正值区域, 即冬季风增强时, 黑潮和我国近海海表感热、潜热和长波辐射通量都大幅增长。这主要是由于冬季风增强会引起冬季寒潮和冷涌的出现, 北方冷空气南下, 导致东亚和黑潮地区的气温产生剧烈的下降, 由于海温变化的滞后性, 海气温差增加, 同时在风速增大的共同作用下, 海气间的热量交换产生了显著的变化, 感热、潜热和长波辐射都大幅增加, 这样海水易过分散热, 从而海温降低。冬季风弱年正好相反, 海洋散热较少, 与正常年份相比海温易出现上升的趋势。

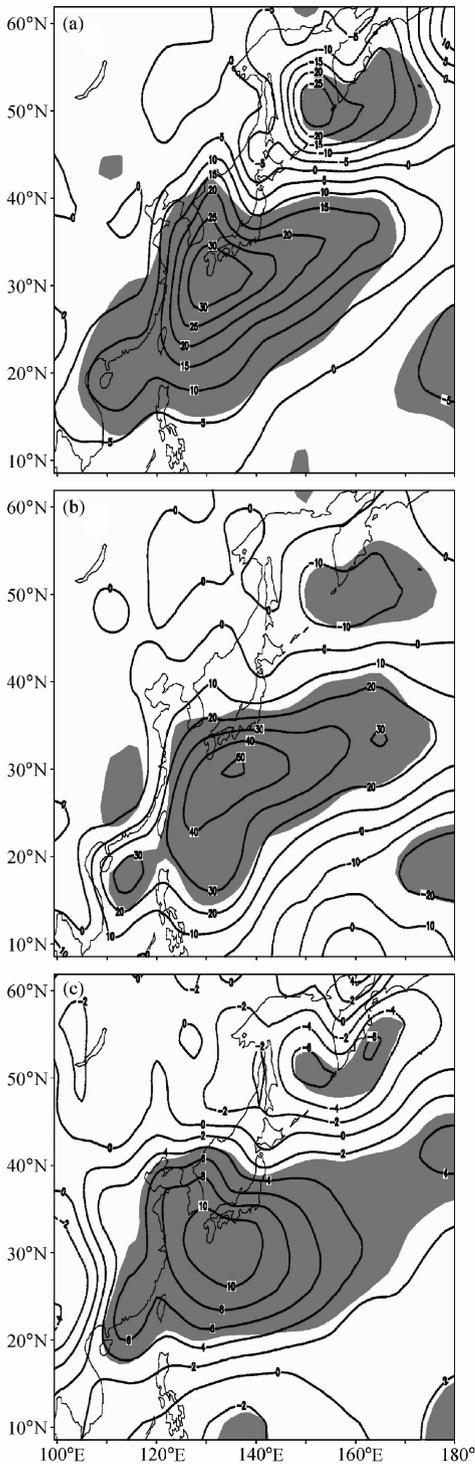


图3 同期冬季海表热通量的合成分析(强-弱)(单位: W/m^2 , 阴影区通过了 0.05 的信度检验): (a)感热; (b)潜热; (c)长波辐射

Fig. 3 The composite difference of heat flux on the sea surface in winter (strong-weak) (units: W/m^2 , the shaded areas: > 0.05 confidence): (a) sensible heat; (b) latent heat; (c) long-wave radiation

同时,热通量的变化也存在独立的特征,在亲潮和西太平洋暖池区出现与黑潮区相反的变化。强冬季风年,在亲潮区三种热通量都是负异常,而且都有部分海区通过 0.05 的信度检验,西太平洋暖池北部主要热量变化是潜热减少。这也体现了中、低纬度海气热通量变化方式的差异。热量变化与图 2 中两处海温随冬季风增强而升温的现象是相对应的,但是热量的变化强度比黑潮区弱。冬季风强年,乌拉尔高压、东亚大槽、太平洋高压脊均较强,大气环流经向度变大,由强弱季风年风场合成图(图略)中可以看出,在中纬度北太平洋中部形成了一个明显的气旋性异常流场,来自西北的强冷空气在中纬度由于受到气旋的阻挡,只能影响 $140^{\circ}E$ 以西的地区,而亲潮区由于受到气旋东北部暖湿气流的影响,气温有明显的上升,海气温差降低,海水散热亦减小,从而海水升温。同样是由于该气旋性异常流场的作用,在西北太平洋暖池区北部出现由南向北的异常流场,带来了南方的暖湿气流,使得暖池区北部海气温差减小,海表空气湿度增加,但是由于暖池区海气温差本身较小,所以暖湿气流主要导致海水蒸发潜热减少。

这里,用向外长波辐射的强度来表示低纬对流活动的强弱。图 4 给出强、弱冬季风年向外长波辐射的差值分布。在 $10^{\circ}N$ 到 $20^{\circ}S$ 之间, $150^{\circ}E$ 以西地区出现成片的负值区,中心分别位于 $10^{\circ}N$ 和 $10^{\circ}S$,表明我国南海及菲律宾以东地区为较强的对流区。而在 $150^{\circ}E$ 以东地区则是普遍的正值区,即西太平洋暖池东侧对流减弱,这证明该海区蒸发潜热的减少。结果与孙淑清等^[1]的结论基本一致。

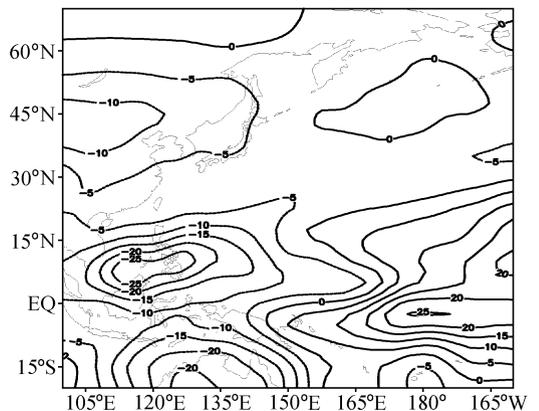


图4 强、弱冬季风年 OLR 差值(强-弱)(单位: W/m^2)

Fig. 4 Differential of OLR between strong and weak winter monsoon years (strong-weak) (units: W/m^2)

从逐月热量异常场的变化来看,热通量异常形式从 12 月到次年 2 月存在先增强后减弱的过程,这也表明热通量异常是先于海温变化,即海气热通量异常是导致海温变化的原因之一。从季风指数与热通量的相关图(图略)中可以看出,相关系数的分布也是与合成分析相似的区域性分布,而且相关都较好,尤其是黑潮和亲潮海区,主要相关区相关系数都可以达到 0.6 以上。

当然,由于引起海水热量变化的原因多样性,仅仅通过海气热通量的变化来解释海温异常的形成原因显然是不够的。海水的异常辐合辐散和平流所引起的水体内部的热量交换也是海温变化的一个不容忽视的因素。冬季风的风速异常产生的异常风应力肯定会对海洋的流场产生一定的影响,导致海水出现异常的辐合辐散和平流,并影响海洋表层乃至深层的温度。但是这方面的观测资料存在一定的不足,因此为了具体的分析流场异常对海温变化的影响,这里采用数值模拟的方法进行进一步的研究。

4 冬季风影响的数值分析

4.1 模式简介

文中使用的模式是 POM (Princeton Ocean Model, 普林斯顿大学海洋模式)。该模式已被国内

外广泛地应用于近海研究,并取得了丰硕的成果^[18~20]。模式垂直采用 δ 坐标,依靠水柱深度来确定垂直坐标。水平上是正交曲线坐标,采用“Arakawa C”差分格式。水平时间差分格式是显式,而垂直上是隐式。模式保留自由表面,为了节约计算时间,还采用了内外模时间分离技术。模式尽可能包含热动力影响因子,并且内嵌 Mellor-Yamada 2.5 阶矩湍流封闭子模型^[21]来提供垂直混合系数。模式的详细说明可参考文献^[22]。

因为从国际互联网上下载的模式是一个理想的海盆模式,所以对原模式进行适当的补充,主要是增加了太阳辐射、海表热通量的计算和真实的海底地形,以及前置和后置处理程序,从而使得模式能够适用于中国近海的长时间模拟。

为了能真实反映北赤道流的季内变化和太平洋内部的 Rossby 波传到西边界对黑潮的影响,模式计算区域取 $(20^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E}\sim 290^{\circ}\text{E})$,模式水平网格 $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$,垂直方向上分为 20 层,最大深度取为 1000 m。内外模时间步长分别为 120 s 和 3600 s。初始条件为冷起动,即 $u=v=w=0$ 。东、西边界为陆地;北边界取为 60°N ,这基本上是海陆交界的位置,因此,可近似认为该纬带经向输送为零;在南边界处,采用 NCEP 年平均观测流场作为

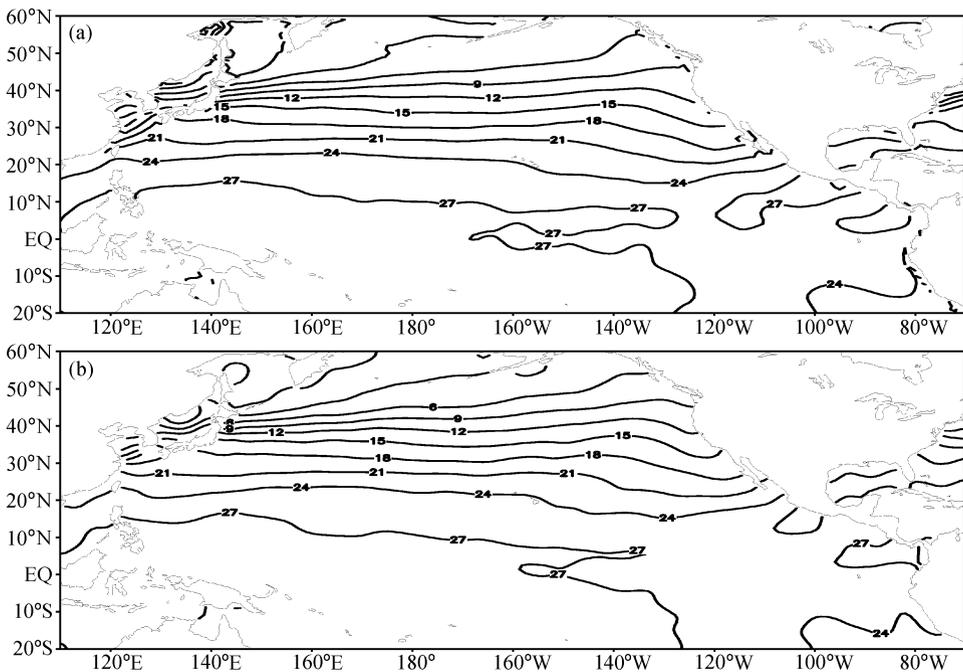


图 5 观测和模拟的 2 月海表温度气候平均值(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 观测; (b) 模拟

Fig. 5 The observed (a) and simulated (b) mean SST for February (units: $^{\circ}\text{C}$)

强迫场,开边界条件处理采用 Mellor^[23] 给出的辐射边界条件。

4.2 试验设计

从上面的研究可知,季风异常引起的各区海气热通量变化不同,因此数值试验的目的主要是明确不同的热通量异常以及季风动力作用如何影响海温,以进一步明确区域性特征的形成机制。为了研究需要,设计了如下的试验。

(1) 控制试验 模式以多年平均 12 月温盐资料作为初值,先在定常的风场、温度和盐度强迫下积分 10 a,得到基本流场后,再加入多年平均的 1、2 月风场和各月的热力强迫,积分 60 d 后,分析最后 30 d 平均的结果。因为缺乏降水资料和蒸发资料,而且短期内温盐环流的影响较小,因此设表面盐度通量为零,异常试验也是相同。

(2) 异常试验 I 模式以同样的方法得到基本流场后,再加入强(弱)季风时的风场和热力强迫,在异常风场与异常热通量的共同作用下,积分 60 d 后,分析最后 30 d 的平均流场和温度场。

(3) 异常试验 II 模式得到基本流场后,加入强(弱)季风年的异常风场,热力强迫保持各月气候平均值,仅在异常的风场作用下,积分 60 d,分析最后 30 d 的平均结果。

(4) 异常试验 III 模式在基本流场的基础上,加入强或弱季风年的异常热力强迫场,风场强迫保持各月气候平均值不变,仅在异常的热通量场作用下,积分 60 d,同样分析最后 30 d 的平均结果。

4.3 模拟结果分析

4.3.1 控制试验结果分析

比较 2 月多年平均海表温度的观测值(图 5a)与模拟值(图 5b),可以看出模式基本再现了整个北太平洋 2 月份海表温度的大致分布。海温分布大致与纬度平行,但是随着主要海流的流向变化,海温等值线也有同趋势的温度槽脊出现。海温由南向北递减,赤道水温最高,尤其是赤道西太平洋海区海温可达 28℃ 以上,温度等值线在中纬度海洋最密集,其北部近极地附近的温度梯度较大,尤以西部最为显著。

4.3.2 异常试验结果分析

下面通过比较三组异常试验的强、弱季风年海表温差分布,进一步分析各区 SST 异常的形成过程中冬季风的作用方式。需要说明的是以下分析的

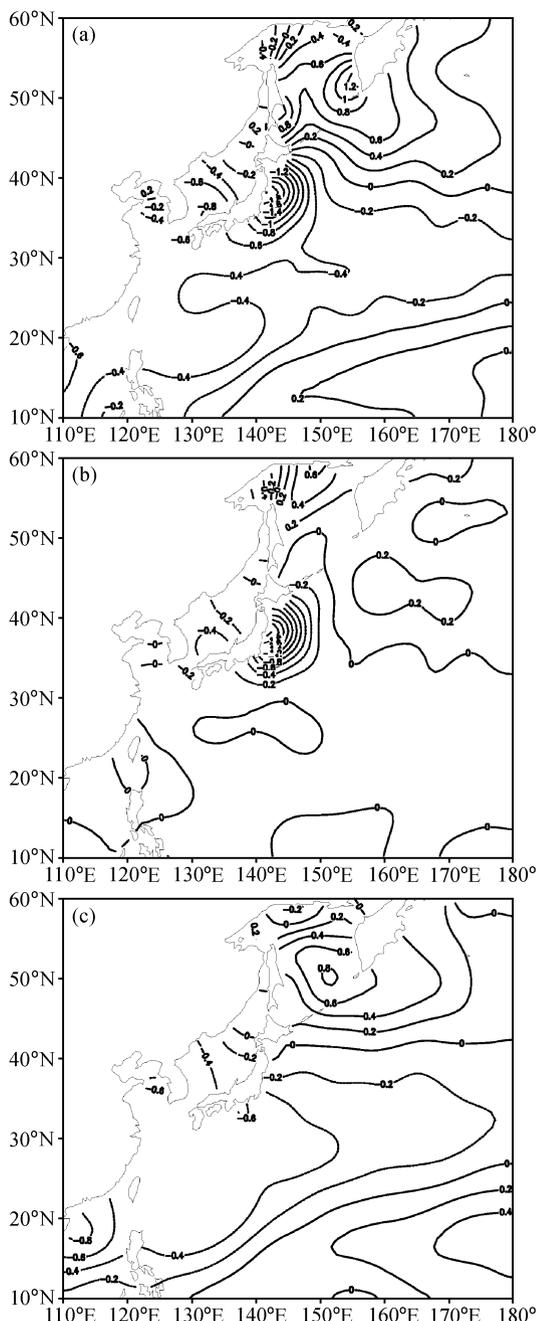


图 6 异常试验的海表温度差(强-弱)分布(单位:℃): (a) 试验 I; (b) 试验 II; (c) 试验 III

Fig. 6 distribution of SST difference (strong-weak) in the abnormal simulation (units: °C): (a) Experiment I; (b) Experiment II; (c) Experiment III

结果都是模式最后 30 d 的平均结果,即冬季 2 月份的平均值。

图 6 分别是三个异常试验的海表温差分布结果。试验 I(图 6a)的结果与统计分析中异常情况的合成(图 2)较为一致,其中黑潮与我国近海区海温

出现一致的下降趋势,而西太平洋暖池北部和亲潮的海温则出现一致的上升趋势,这也再次证明了模式的模拟能力。在试验 II(图 6b)中,异常现象出现了变化,海表温度异常区主要在亲潮区域,为明显的正异常,中心位于 45°N ,日本东部洋面海水依然出现异常降温,而在黑潮和暖池区海表温度未能出现明显成片的异常现象,这也表明虽然强冬季风能够导致沿西边界北上的暖流略有减弱,但是在同期冬季这样的较短时间内,这并不是黑潮海表降温的主要原因。试验 III(图 6c)的结果中,黑潮区出现明显的降温,同时在亲潮区域和暖池北部也都出现了增温的现象,其范围与统计分析较为一致,但是在日本以东洋面未能出现明显的降温,而且亲潮的增温中心位于 50°N ,比试验 I(图 6a)和试验 II(图 6b)略为偏北。

通过比较图 6a~c 可以看出,黑潮区海表温度的变化主要是受到海气热通量的制约,同时热通量的变化对暖池北部和亲潮西北区域海温也存在影响,而异常冬季风的风应力导致海洋环流异常所引起的海表温度变化主要出现在亲潮区域的南部和日本以东的亲潮与黑潮交界处,不难看出在亲潮区流场异常与热通量异常的作用并不相同。强冬季风不仅减弱了黑潮,而且加强了亲潮,使得较多的亲潮冷水在日本东部洋面与黑潮交汇从而引起海水显著降温。

以上是从表层海温的角度进行比较,初步明确了各海区海表温度变化的主要原因。但是,有研究表明海气热通量变化主要影响海洋表层海温,而异常流场的影响可以达海洋较深处,所以要研究季风

引起的异常海流在海温变化过程中的重要性,深层温度的变化是不可缺少的。

深层温度变化主要是由流场异常所引起的,所以这里首先给出异常流场的简单说明。

试验 I 的强、弱冬季风年海表流场差值如图 7,东亚冬季风所引起的流场异常主要出现在西北太平洋,强冬季风年黑潮在东海部分略有减弱,但是在黑潮区的东部出现了明显的反气旋性异常流场;北赤道洋流减弱,并且在西太平洋暖池区形成了一个相对较弱的反气旋流场;在亲潮区的东南部则出现了较强的气旋性异常流场。试验 II 的异常流场(图略)与试验 I(图 7)基本相同,试验 III(图略)则未能形成明显的流场异常。

下面通过温度随深度变化的剖面图来分析深层海温变化的情况。为了同时体现出三个海区的海温随深度变化特征,这里取 170°E 作海温的深度-经度剖面图。

图 8 是三个试验中沿 170°E 的经向温度剖面图。试验 I(图 8a)中,从 8°S 到 20°N 之间存在一个明显的增温区,其最大深度可达 350 m,最大异常可达 0.6°C ,位于水下 150 m 附近;在 20°N 到 37°N 之间出现一段负值区,而在亲潮的纬度也出现了一个正值区,最大异常可达 0.4°C ,最大影响深度也可达到 300 m 以下。试验 II(图 8b)的深层温度异常与试验 I(图 8a)相似,暖池区温跃层附近出现了大的正异常,虽然黑潮续流区表面未能形成成片的负异常(图 6b),但其深层的负异常在深度和量级上都比较一致,而在试验 III(图 8c)的剖面图中其

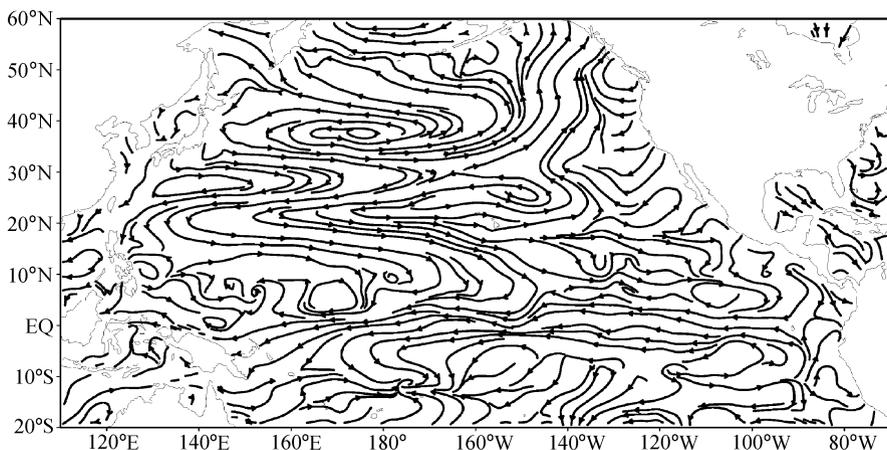


图 7 试验 I 强、弱季风年海表流场差值(强-弱)

Fig. 7 Difference of sea surface streamline field between strong and weak winter monsoon years in Experiment I (strong-weak)

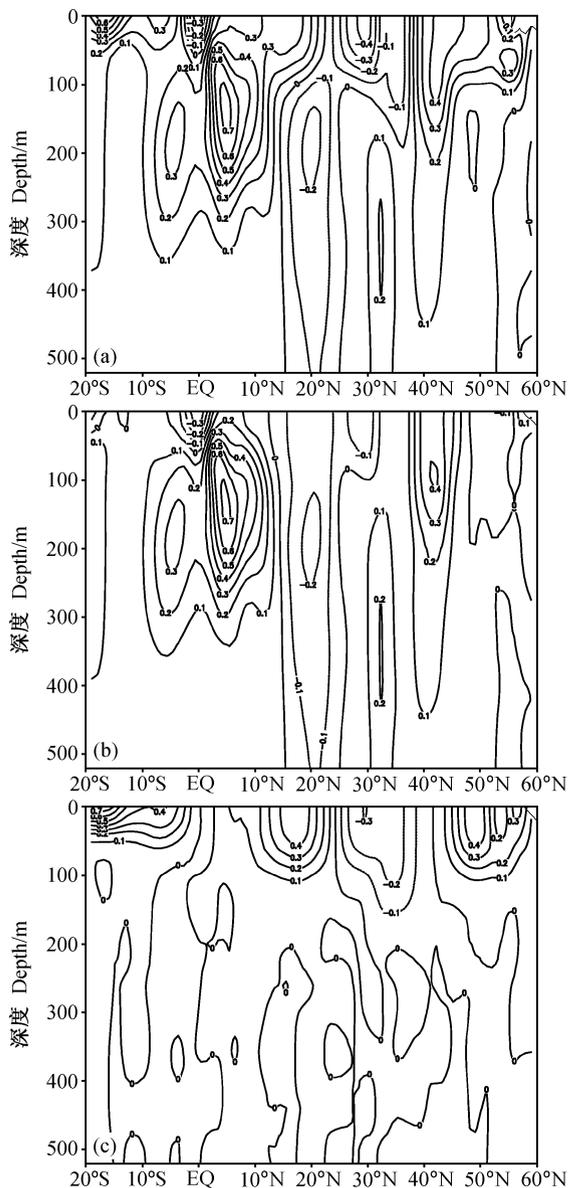


图 8 170°E 温度差值场的深度-经度剖面图 (单位: °C): (a) 试验 I; (b) 试验 II; (c) 试验 III
Fig. 8 Depth - longitude profile of sea temperature difference at 170°E (units: °C): (a) Experiment I; (b) Experiment II; (c) Experiment III

主要异常深度都在水下 100 m 以上, 且异常值较小。这也证明热量场的影响主要是在海洋表层温度, 而风场异常能够导致深层水出现较大异常, 且热通量的影响与异常流场作用相比, 异常海温中心的位置都相对偏北, 尤其是在暖池区, 10°N 以南的海温变化主要出现在试验 II(图 8b), 即流场异常所引起的变温主要在 10°N 以南, 但是本文感兴趣的 10°N~20°N 的升温则主要出现在试验 III(图 8c)。

结合剖面图的比较结果, 我们可以对三个区域海温异常形成原因作进一步的分析。

在黑潮和我国近海区, 海表温度的变化主要是由热通量引起的。从剖面图中看出, 该区深层海水也会产生相同的变化。由异常流场图(图 7)中可以看出, 黑潮区东部出现了反气旋异常环流, 究其原因, 应该是在西北-东南走向的强冷空气和气旋性异常流场的作用下, 黑潮区存在反气旋异常流场, 又由于黑潮温跃层较深, 可达上百米, 温跃层温度差别较小, 所以当因强冷空气而迅速降温的表层冷水辐合下沉时, 反而导致了下层海水的降温。

在暖池区域, 强冬季风年的海温表层以下的升温最主要出现在 0°~10°N 之间, 从流场异常图(图 7)中也可以看出, 在该范围内西太平洋暖池区出现一个反气旋性异常环流, 这种异常会导致海水辐合下沉, 海温上升, 因此该处的下层升温也主要出现在该区域, 这与吴国雄^[4]的结论一致。但是从剖面图(图 8b、c)中可以看出, 在 10°N 以北到黑潮的降温区之间, 海水增温以表面为主。从热量分析可知, 这主要是热通量异常的原因。强季风年, 环流经向度增加, 在太平洋中部出现了强的气旋性异常流场, 从而在暖池区有从南向北的异常暖湿气流, 但暖池区海气温差不大, 所以该区域海气热通量变化是以潜热变化为主。

在亲潮区域, 海温变化主要是由大气中太平洋中部气旋性异常环流引起的。气旋西北部的东向气流阻碍了西北冷空气的侵袭, 使得亲潮区北部气温上升, 海洋散热减少并升温, 所以北部海温异常主要被海气热通量异常所控制。分析表明南部海温变化主要由流场异常引起。剖面图的比较(图 8)给出了相同的结论。从异常流场图(图 7)中可以发现, 在其东南部出现了强的气旋性异常环流, 在气旋性异常环流的西北部, 平流作用可以使得低纬度较暖的海水向高纬度即亲潮区传输, 导致亲潮区南部海水增温。该处的流场-纬度剖面图(图 9)也证明了这个结果, 在 155°E 附近流线先向下, 后转向东, 这表明低纬暖水在气旋的作用下由低纬向高纬传输, 在西边界由于大陆的阻挡, 暖水堆积下沉, 然后向东流, 从而加热亲潮区下层海水。同时, 环流的经向度增加也加强了亲潮, 因为亲潮冷水的影响, 亲潮区北部以及南部沿大陆部分海水下层增温并不明显, 在亲潮和黑潮交界处的日本东部洋面还

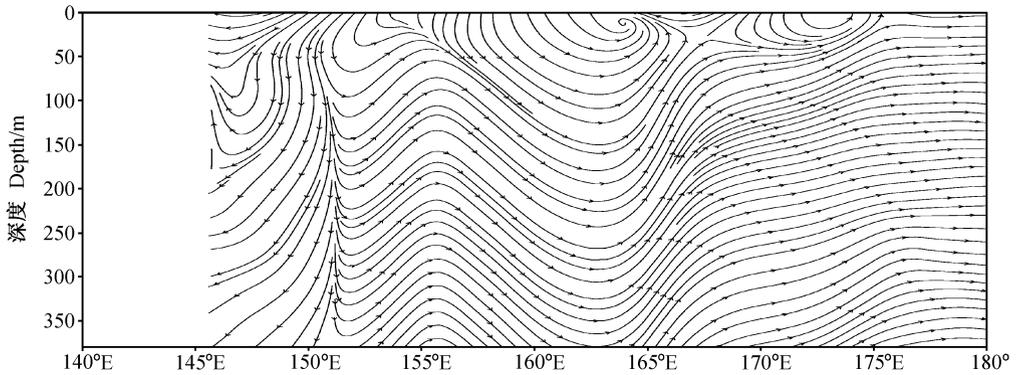


图9 异常试验 II 50°N 异常流场的深度-纬度剖面图

Fig. 9 Depth-latitude profile of abnormal streamline field at 50°N in Experiment II

出现了较强的降温现象,而且从温度-经度剖面图(图略)中可以看到该处深层的降温现象相当剧烈。

5 结论和分析

由统计分析发现,东亚冬季风异常对西北太平洋海温影响存在显著的区域性特征,冬季风增强(减弱),黑潮和我国近海区海温下降(上升),而亲潮和西北太平洋暖池区则存在升温(降温)现象。

通过对海水热量变化的进一步分析,可以发现区域性特征的成因主要是由于冬季风对各海区的影响方式不同。黑潮区海表温度主要受海气热通量的影响,深层温度变化主要是由异常海流的动力作用引起的;西太平洋暖池北部海温变化主要集中在表层,海气热通量中的潜热变化起了主导作用;而在亲潮区,对表层而言,其北部温度异常主要是由海气热通量变化引起,其南部则受海流动力作用的制约,深层海温变化则是因为低纬度暖水在西边界汇聚下沉的缘故。

统计分析与数值模拟结果清楚表明,东亚冬季风异常对海温变化的热力和动力因子都有十分显著的影响,这也为进一步细致研究冬季风如何以海温为中介影响我国夏季降水提供了条件。

本文定性地分析了异常冬季风对西北太平洋海温影响的区域性特征,并对其物理机制作了初步研究。对冬季风和西北太平洋海温之间关系的定量分析及其更深入的物理机制的研究是我们今后进一步研究的主要方向。

参考文献 (References)

[1] 孙淑清, 孙柏民. 东亚冬季风环流异常与中国江淮流域夏季

旱涝天气的关系. 气象学报, 1995, **53**: 440~450

Sun Shuqing, Sun Bomin. The relationship between the anomalous winter monsoon circulation over east Asia and summer drought/flooding in the Yangtze and Huaihe River valley. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1995, **53**: 440~450

[2] 陈隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 II. 冬季风异常对全球热带海温变化的影响. 大气科学, 1999, **23** (3): 286~295

Chen Jun, Sun Shuqing. East Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation. Part II: Influence on SST by winter monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23**(3): 286~295

[3] 赵永平, McBean G A. 黑潮海域海洋异常加热与北半球大气环流的相互作用. 海洋与湖沼, 1995, **26**(4): 383~388

Zhao Yongping, McBean G A. Air-sea interaction between the Kuroshio region marine heating anomaly and Northern hemisphere atmospheric circulation. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1995, **26**(4): 383~388

[4] 倪东鸿, 孙照渤, 陈海山, 等. 冬季黑潮区域 SSTA 的时空演变及其与大气环流的联系. 南京气象学院学报, 2003, **26** (6): 740~748

Ni Donghong, Sun Zhaobo, Chen Haishan, et al. Spatial/temporal features of SSTA in Kuroshio current region and its relations to general circulation. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26**(6): 740~748

[5] 吴国雄, 尉艺, 刘辉. 东亚持续强冬季风影响赤道海表温度初始异常的数值试验研究. 气象学报, 2000, **55**: 641~652

Wu Guoxiong, Wei Yi, Liu Hui. Impacts of persistently strong Asian winter monsoon on equatorial sea surface temperature anomaly as simulated in climate model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **55**: 641~652

[6] 赵永平, 陈永利, 翁学传. 中纬度海气相互作用研究进展. 地球科学进展, 1997, **12**(1): 32~36

Zhao Yongping, Chen Yongli, Weng Xuechuan. Advances in the mid-latitude air-sea interaction research. *Advances in*

- Earth Science* (in Chinese). 1997, **12** (1): 32~36
- [7] 李崇银, 穆明权. 异常东亚冬季风激发 ENSO 的数值模拟研究. *大气科学*, 1998, **22**(4): 481~490
Li Chongyin, Mu Mingquan. Numerical simulations of anomalous winter monsoon in East Asia exciting ENSO. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**(4): 481~490
- [8] 穆明权. 东亚冬季风异常与 ENSO 循环关系的进一步研究. *气候与环境研究*, 2001, **6**(3): 273~285
Mu Mingquan. A further research on the cyclic relationship between anomalous East-Asian winter monsoon and ENSO. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (3): 273~285
- [9] 陈隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究. *大气科学*, 1999, **23**(1): 101~111
Chen Jun, Sun Shuqing. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation, Part I. A comparison study on strong and weak winter monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1999, **23**(1): 101~111
- [10] 王谦谦, 钱永甫, 徐海明, 等. 1991 年夏季江淮洪涝成因的数值试验——西太平洋海温异常的影响. *气象学报*, 1995, **53**(增刊): 595~603
Wang Qianqian, Qian Yongfu, Xu Haiming, et al. Numerical experiments on the causes of the floods in the valleys of the Changjiang and Huaihe Rivers in the summer of 1991—the effects of sea surface temperature anomalies over the Western Pacific. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (supplement): 595~603
- [11] 吕炯. 海水温度与水旱问题. *气象学报*, 1950, **21**: 1~16
Lü Jiong. The problems of seawater temperature and summer flood/drought in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1950, **21**: 1~16
- [12] 大气物理研究所长期天气预报组. 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). 北京: 科学出版社, 1978. 40~70
Long-Term Weather Prediction Group of IAP. The effect of the anomaly of winter Pacific sea temperature on the precipitation of rain season in China. *Collected Papers of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences* (No. 6) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1978. 40~70
- [13] 吴仪芳, 李麦村. 江淮旱涝形成的长期天气过程. *中国科学院大气物理研究所集刊* (第 13 号). 北京: 科学出版社, 1978. 15~29
Wu Yifang, Li Maicun. Long-term synoptic course of the formation of the droughts and floods in the valleys of the Changjiang and Huaihe Rivers. *Collected Papers of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences* (No. 13) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1978. 15~29
- [14] 张启龙, 翁学传, 程明华. 华北地区汛期降水与热带西太平洋暖池和黑潮的关系. *高原气象*, 1999, **18**: 575~583
Zhang Qilong, Weng Xuechuan, Cheng Minghua. Relationship between the precipitation in the rainy season in North China and the tropical Western Pacific warm pool and Kuroshio. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18**: 575~583.
- [15] 陈烈庭, 吴仁广. 太平洋各区海温异常对中国东部夏季雨带类型的影响. *大气科学*, 1998, **22**(5): 718~726
Chen Lieting, Wu Renguang. The joint effects of SST anomalies over different Pacific Regions on summer rainbelt patterns in Eastern China. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**(5): 718~726
- [16] 郭其蕴. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. *应用气象学报*, 1994, **5**: 218~225
Guo Qiyun. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1994, **5**: 218~225
- [17] 施能, 朱乾根. 东亚冬季风强度异常与夏季 500 hPa 环流及我国气候异常的关系. *热带气象学报*, 1996, **12**(1): 26~33
Shi Neng, Zhu Qiagen. Anomalous East Asian winter monsoon intensity and its relations to summer 500 hPa atmospheric circulation and climatic anomaly in China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1996, **12**(1): 26~33
- [18] 钱永甫, 王谦谦, 朱伯承. 海底地形对南海海流、海面高度和海温影响的数值试验. *热带气象学报*, 1999, **15**: 290~296
Qian Yongfu, Wang Qianqian, Zhu Peter. Numerical experiments on effects of ocean bottom topography on ocean currents, sea surface height and temperatures in the South China Sea. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1999, **15**: 290~296
- [19] 钱永甫, 王谦谦, 朱伯承. POM 对南海海温年变化的模拟. *大气科学*, 2000, **24**: 373~380
Qian Yongfu, Wang Qianqian, Chu Peter. Simulations of the annual cycle of the South China Sea temperature by POM. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2000, **24**: 373~380
- [20] 刘秦玉, 杨海军, 贾英来, 等. 南海海面高度季节变化的数值模拟. *海洋学报*, 2001, **23**(2): 9~17
Liu Qinyu, Yang Haijun, Jia Yinglai, et al. The numerical simulation of the seasonal variation of the sea surface height in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23**(2): 9~17
- [21] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, **20**(4): 851~875
- [22] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. Washington D. C: American Geophysical Union. 1987. 208~230
- [23] Mellor G L. Users guide for a three-dimensional primitive equation, numerical ocean model. Princeton University, 1996. 40~45