

我国近海和邻近海的海洋环境对 最近全球气候变化的响应

蔡榕硕¹ 陈际龙² 黄荣辉²

1 国家海洋局第三海洋研究所海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361005

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100080

摘 要 鉴于全球气候变暖对海洋环境和海洋生态及对经济和社会可持续发展影响的严重性, 作者首先利用 ERA-40 再分析的风场资料以及 HadISST 和 SODA 等海洋高分辨率再分析资料, 分析了近 50 年来全球气候变化对中国近海(包括渤海、黄海、东海和南海)和邻近海(主要是热带和副热带西太平洋)海面附近的风力、海表纬向和经向风应力和海表温度的影响。分析结果表明: 由于受全球气候变暖的影响, 1976 年之后中国近海和邻近海上空的冬、夏季风变弱, 从而引起中国近海冬、夏季海表风应力减弱(尤其是经向风应力), 而海表水温明显上升; 并且, 冬、夏季海表风应力的减弱和海水温度的上升在中国东海反映尤其明显, 这些为中国近海赤潮的频繁发生提供了有利的海洋环境。此外, 从中国近海上空环流散度分布的变化可见, 中国近海上空从 1976 年之后大气环流辐散增强, 这不利于中国近海上升流的形成, 从而会对沿岸水域营养盐的输送产生影响。

关键词 全球气候变化 近海和邻近海 海洋环境 生态系统

文章编号 1006-9895(2006)05-1019-15

中图分类号 732

文献标识码 A

The Response of Marine Environment in the Offshore Area of China and Its Adjacent Ocean to Recent Global Climate Change

CAI Rong-Shuo¹, CHEN Ji-Long², and HUANG Rong-Hui²

1 The Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration of China, Xiamen 361005

2 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract Due to the severity of impact of global climate warming on marine environment and ecosystem and sustainable development of economy and society, the impacts of global climate change for the last 50 years on winter and summer wind fields near sea surface, sea surface zonal and meridional wind stresses and sea surface temperature (SST) in the offshore area of China, including the Bohai Sea, the Yellow Sea, the East China Sea and the South China Sea, and its adjacent ocean, mainly including the tropical and subtropical western Pacific, are analyzed by using the wind data from ERA-40 reanalysis data, the high-resolution reanalysis data of ocean climate such as HadISST and Simple Ocean Data Assimilation (SODA) and so on. The analyzed results show that due to the impact of global climate warming, the winter and summer monsoon flows become weak over the offshore area of China and its adjacent Ocean after 1976, which causes the weakening of winter and summer sea surface wind stresses, especially the meridional sea surface wind stresses, and the obvious increase of SST in the area. Moreover, the results also show that the weakening of winter and summer sea surface wind stresses and the increase of SST are particularly

significant in the East China Sea. Those can provide a favorable marine environment for the frequent occurrence of red tide in the offshore area of China. Besides, from the variation of the distributions of circulation divergences over the offshore area of China, it can be clearly seen that after 1976, the circulation divergences over this area intensified, which are not helpful to the formation of upwelling flow in the offshore area of China. It will have an influence on the nutrients transportation in the coastal water. In order to promote the research on the response and adaptation of marine environment and ecosystem in the offshore area of China to global climate change, some scientific problems on this aspect, which urgently need to be studied, are also proposed in this paper.

Key words global climate change, the offshore area of China and its adjacent ocean, marine environment, ecosystem

1 引言

工业革命以来,人类活动的影响明显加剧了全球自然环境的变化,全球变化的影响正以各种形式不断出现,如冰川退化、雪线升高、海平面上升、生物多样性减少、旱涝灾害频繁以及近海富营养化加剧等具有全球性意义的现象出现。这当中,全球气候变暖是人类面临的最具有挑战性的全球性问题,也是全球变化的核心问题。人类活动排放温室气体造成的全球气候变暖不仅已引起全世界科学家的关注,而且也成为各国政府在规划经济和社会发

展时必须重视的问题^[1]。然而,全球变化不等于全球一致的变化,对不同地区或不同的自然系统具有不同的变化特征。对于全球增温,各区域无论是气候或生态系统的响应是很不一样的,不仅亚洲、非洲和美洲对全球增温的响应不一样,而且即便同是亚洲,南亚对全球增温的响应与东亚对全球增温的响应也很不一样^[2]。更进一步说,同是东亚,华北对全球增温的响应与长江流域对全球增温的响应也不一样,如我国华北地区从 20 世纪 80 年代以来夏季气温升高而降水减少,西北地区却是气温升高、降水增加,而长江中、上游地区夏季是气温降低、降水增加^[3~5]。

占地球表面积 71% 的海洋对于气候变化具有重要作用,它不仅是地球气候的调节器^[6],而且通过碳循环对人类活动所引起的“温室效应”有一定减缓作用^[7]。由于海表的特性与陆地不同,因此,海洋和陆地对人类活动所引起的全球增温响应是不同的。陆地由于下垫面状况复杂,有戈壁、沙漠、草原、高原、沼泽、作物种植区、森林和城市等,各种下垫面的陆面过程和陆-气相互作用状况不同,故陆地对全球增温效应具有很强的区域性。虽然海洋的表面状况比较均匀,但由于海洋分布于不同的气

候带,其上空大气环流和海流的差异及其与陆地距离的不同,因而各个海域对全球气候变暖的响应也不一致。特别是近海,由于通过河流、地下水以及大气等通道向近海注入了大量的污染物,致使近海水质恶化,加上气候变暖,故使赤潮频繁发生。这表明陆地的沿海和近海对于全球增温的响应与陆地对全球增温的响应既有联系,又有很大差异,因此,近海对全球气候变化的响应是值得深入探讨的科学问题^[8]。这个问题已引起国际科学规划的广泛关注,一些国家已注意近海对全球变化的响应与适应性问题的研究,如美国宇航局 (NASA) 在今后 25 年地球科学事业 (Earth Science Enterprise, 简称为 EAE) 的科学战略规划中已把近海对全球变化的响应与适应作为研究重点之一^[9]。

我国近海跨越了热带、副热带和温带,它的东部面临浩瀚的西太平洋,西依欧亚大陆,其气候变化复杂,因地处东亚强季风区,每年 9 月到第二年的 4 月由北向南盛行偏北风,而从 5 月中旬南海夏季风爆发后,于 5~8 月由南向北盛行偏南风。受全球气候变化的影响,东亚季风有很大的年代际变化^[10, 11],这变化势必影响到中国近海和邻近海的海洋环境和海洋生态系统,从而使得我国近海和邻近海的海洋环境和海洋生态系统对全球增温的响应也会有别于其他海域。此外,由于我国东部沿海人口密集和经济发达,大量的工业废水和生活污水排放入海,富营养化海域不断扩展,赤潮频繁发生,严重破坏了海洋生态系统。因此,我国近海海洋环境和海洋生态系统所面临的日益严重的问题不仅与当今全球性海洋环境与海洋生态问题一样,而且也有它的独特性。

鉴于全球气候变化对我国近海海洋环境和海洋生态系统的严重影响,本研究利用 ERA-40 风场再分析资料^[12]、HadISST 的 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 的 SST 资

料^[13]以及 SODA (Simple Ocean Data Assimilation)^[14]的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 海表附近风场、海面风应力再分析资料,从观测资料分析我国东部以及近海、邻近海的冬、夏季风环流的年代际变化,并分析了我国近海和邻近海的海表附近的风场和海面风应力、海温等海洋环境要素对全球气候变化的响应,并初步探讨了我国近海海洋环境变化对海洋生态系统的影响,提出了关于我国近海生态系统对全球气候变化响应和适应性研究的重要性,以及亟需研究的几个科学问题。

2 全球气候变化对我国东部和近海、邻近海上空季风环流的影响

为了解我国近海海洋环境和海洋生态系统对全球变化的响应,首先必须了解全球气候在最近 100 年所发生的变化,尤其是近 50 年的全球气候变化对我国近海和邻近海上空季风环流的影响。

2.1 全球气候变化的观测事实

近百年全球气候正经历以变暖为主要特征的变化,20 世纪 90 年代是最近 100 年来最暖的年代^[1]。20 世纪伊始气温下降,至 1910 年降至最低点;之后,北半球气温缓慢上升,到了 1940 年附近气温较高;但其后,全球气温又逐渐下降,因此,在 70 年代初,国际上许多学者认为地球正在变冷;然而,从 70 年代末,全球气温又很快上升,到了 90 年代,全球的增温速率远快于 30 年代,70 年代末到 20 世纪末全球气温约上升了 0.4°C 。Jone^[15]的研究结果也与此相同,同时,表明了两半球气温变化有一定的相似性,但也有差异。

2.2 近 50 年我国东部和近海、邻近海上空季风环流的年代际变化

由于我国东部和包括渤海、黄海、东海和南海的我国近海以及邻近海的热带、副热带西太平洋地处东亚季风区,区域内气候变化主要取决于东亚冬、夏季风的变化。就东亚季风而言,它不仅受欧亚大陆和太平洋热力对比的影响,还受南北半球热力对比的影响,因此,受全球气候变化的严重影响,有很明显的年际和年代际变化^[16~18]。研究表明东亚夏季风不仅受印度西南季风和跨赤道气流的作用,而且还受西太平洋副热带高压和中纬度西风带扰动系统的影响^[19, 20],因此,我国东部和近海、邻近海上空的季风环流变化是很复杂的。黄荣辉

等^[3, 5]的研究表明,受全球气候变化的影响,我国和东亚气候在 20 世纪 70 年代中后期发生了一次明显的年代际变化,华北地区从 70 年代中后期迄今发生了持续干旱,而长江、淮河流域频繁发生洪涝;黄荣辉^[21]的研究还表明了这种变化不仅与东亚季风环流年代际变化有非常密切的关系,而且与热带太平洋的 SST 年代际变化也有很大关系。

由于我国东部和近海、邻近海上空季风环流所盛行的气层位于较低的气层,故本节利用 ERA-40 再分析资料集的 925 hPa 的风场资料分析了这些区域冬、夏季风气流的变化。

2.2.1 冬季

图 1 是中国东部和近海、邻近海上空 925 hPa 冬季(12 月至第二年 2 月)风场的 1961~1990 年气候平均以及 1958~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均的距平风场。从图 1a 可以看到,我国近海上空冬季风的风力比我国东部陆地上风力要强得多;并且,在我国华北、东北、渤海、黄河和东海盛行西北风,在朝鲜半岛、日本海、日本和日本东部和东南部的西北太平洋上空也盛行西北风,而在我国长江以南地区(包括华南)、中印半岛、南海、东南亚和热带、副热带西太平洋上空盛行东北风。图 1b 表明:在 1976 年以前的冬季,在我国华北、华东和渤海、黄海、东海和日本以南的副热带西太平洋上空有西北风的距平风场,而在我国华南和中印半岛北部出现东北风的距平风场,在南海的西部和中印半岛南部有西风的距平风场,而在南海的东部出现偏北风距平风场。并且,从图 1b 还可以看到,在东亚上空出现一个气旋性环流异常,而在我国南海南部上空出现一反气旋的距平环流分布。这些说明了在 1976 年之前我国东部以及上述我国近海和邻近海上空的冬季风偏强。

然而,从图 1c 可以看到,在 1976 年之后的冬季,我国东部以及近海和邻近海上空出现与图 1b 相反的风场距平分布。如图 1c 所示,在我国东部、渤海、黄海、东海以及 140°E 以西的副热带西太平洋上空出现东南风的距平风场,而在华南、中印半岛出现西北风的距平风场,在南海的西部和中印半岛的南部出现东北风的距平风场,而在南海的东部出现东南风的距平风场;并且,从图 1c 还可以看到,在东亚和西北太平洋上空出现反气旋环流异常分布,而在我国南海的南部却出现气旋性环流异

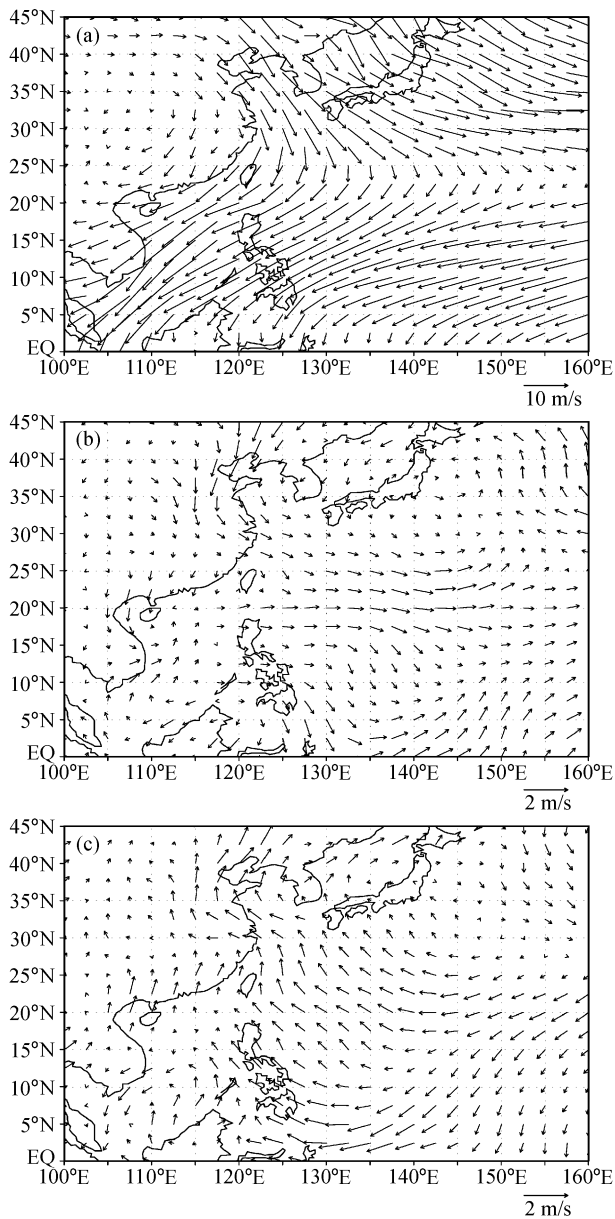


图 1 我国东部以及近海和邻近海上空 925 hPa 冬季 (12 月至第二年 2 月) 1961~1990 年气候平均风场 (a) 以及 1958~1976 年期间 (b) 和 1977~2000 年期间 (c) 的平均距平风场 (资料取自 ERA-40 再分析资料)

Fig. 1 Distributions of climatological mean winter (Dec - Feb) wind field at 925 hPa over eastern China, the offshore area of China and its adjacent ocean for 1961 - 1990, and wind anomalies averaged for the periods of 1958 - 1976 (b) and 1977 - 2000 (c). Data are from the ERA-40 reanalysis data

常。这些都表明了从 1976 年之后我国东部、近海和邻近海上空冬季风大大减弱。

2.2.2 夏季

图 2 是中国东部和近海、邻近海上空 925 hPa

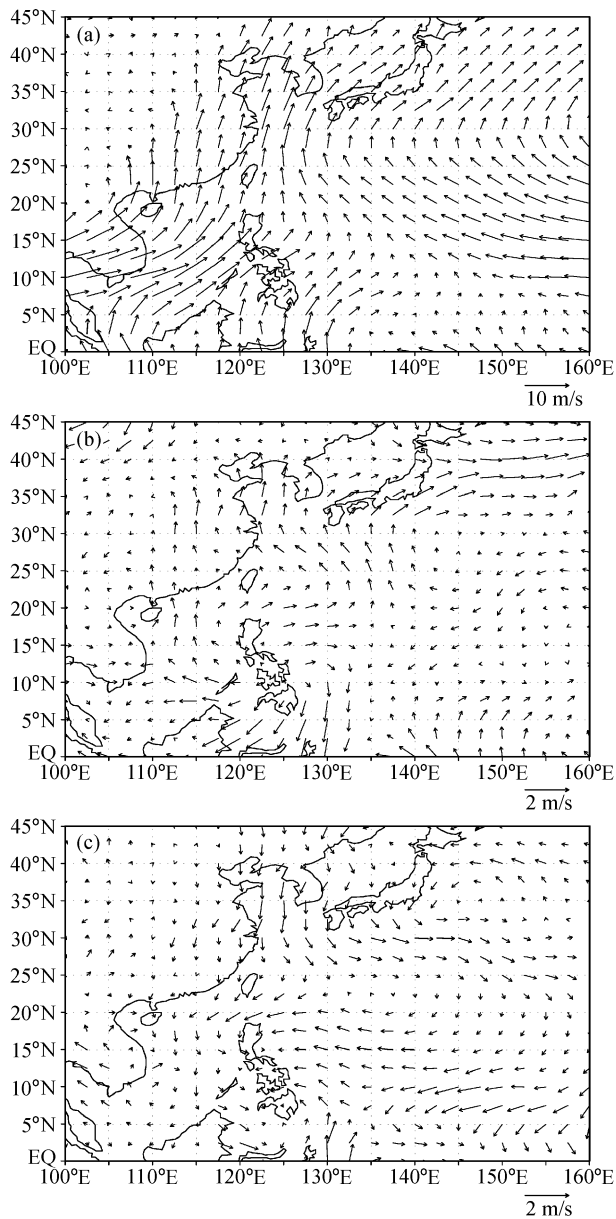


图 2 同图 1, 但为夏季 (6~8 月)

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for summer (Jun - Aug)

夏季 (6~8 月) 风场的 1961~1990 年气候平均以及 1958~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均的距平风场。从图 2a 可以看到, 我国东部陆地上的风力并不比海上风力弱很多, 只是略为弱一些, 这是与冬季有所不同; 并且, 最明显的是夏季的风向完全与冬季相反, 在我国华南、华东和华北以及渤海、黄海上空盛行西南偏南风, 而在南海和东南亚上空盛行西南风, 东海和副热带西太平洋上空盛行东南风。图 2b 表明: 在 1976 年以前的夏季, 在我国东部、渤海、黄海上空有偏南风的距平风场, 在

东海北部上空有东南风的距平风场,而在东海南部上空有西南风的距平风场,南海中部和北部上空出现偏南风的距平风场;并且,从渤海和黄海到朝鲜半岛、日本海和西北太平洋上空有一反气旋的环流异常分布,在东海和副热带西太平洋上空出现一气旋性的环流异常分布,此外,在南海和东南亚上空出现一反气旋的环流异常分布,这些环流异常似 Nitta^[22],黄荣辉和李维京^[23]所提出的 EAP 型夏季北半球大气环流异常遥相关,这也表明了 1976 年以前我国东部和近海、邻近海上空夏季风偏强。

然而,正如图 2c 所示,在 1976 年之后的夏季,我国东部和近海、邻近海上空出现了与图 2b 相反的风场距平分布。如图 2c 所示,在我国东部、渤海、黄海上空出现偏北风距平风场,而在我国东海北部和南部分别出现西北风和东北风的距平风场;并且,从图 2c 还可以看到,从渤海和黄海到朝鲜半岛、日本海、日本和西北太平洋上空出现一气旋性环流异常分布,在东海和副热带西太平洋上空出现一反气旋环流异常分布,此外,在南海和东南亚上空出现一气旋性环流异常分布。这些季风环流异常分布正好与图 2b 所示的 1976 年以前季风环流异常分布相反。并且,夏季我国东部和近海、邻近海上空出现偏北风的风场异常,这表明了我国东部以及近海和邻近海上空夏季从 1976 年之后偏南季风气流减弱。由于东亚夏季风从 1976 年之后变弱引起水汽输送到华北也减弱,从而导致我国华北发生了持续干旱。正如图 3 所示,由于我国东部和近海、邻近海上空季风的年代际变化,导致了从 1976 年之后我国近海和邻近海上空由偏南季风所驱动的水汽输送到华北地区减弱,而在长江、淮河流域辐合,从而引起我国华北地区发生持续干旱,而长江、淮河流域夏季季风降水偏多,洪涝灾害频繁发生。

上面所分析的事实表明我国东部以及近海、邻近海上空无论是冬季风或夏季风从 1976 年之后都减弱;并且,在这些海域上空夏季风环流的年代际异常也出现一个似 Nitta^[22]、黄荣辉和李维京^[23]所提出的北半球夏季大气环流异常的 EAP 型遥相关。

3 近 50 年我国近海和邻近海海面附近风力与风应力的年代际变化

从 1976 年之后,我国东部和近海、邻近海上空冬、夏季风气流的减弱必然影响到我国近海和邻

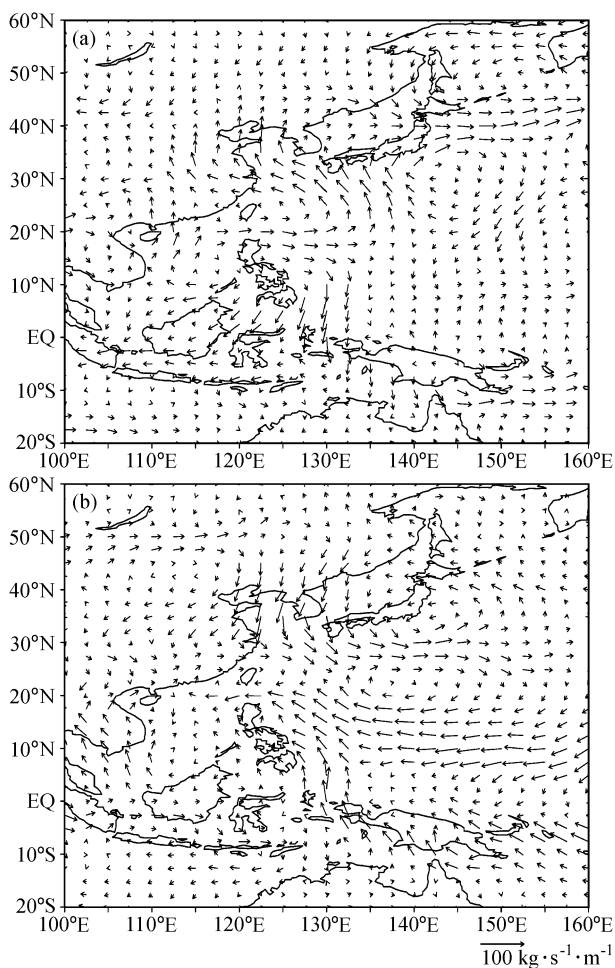


图 3 我国东部、近海和邻近海上空夏季(6~8月)1965~1976年期间(a)和1977~2000年期间(b)平均的水汽输送通量距平分布。资料取自 ERA-40 再分析资料

Fig. 3 Distributions of summer (Jun - Aug) water vapor transport flux anomalies averaged for the periods of 1965 - 1976 (a) 1977 - 2000 (b) over eastern China, the offshore area and its adjacent seas. Data are from the ERA-40 reanalysis data

近海海面风力和风应力的变化。为此,本节利用 ERA-40 再分析风场资料和 SODA $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 海面风应力再分析资料^[14]分析海面附近 10 m 的风力和相应的海表风应力的年代际变化。

3.1 海面附近风力变化

3.1.1 冬季

图 4 是我国近海、邻近海上空 10 m 冬季(12月至第二年 2 月)风场 1961~1990 年的气候平均、1958~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均的距平风场。比较图 4 与图 1,可知两者分布基本相似。图 4a 表明,我国近海冬季海面风力明显大于陆地上风力,在黄渤海和东海海面附近西北风的风力可

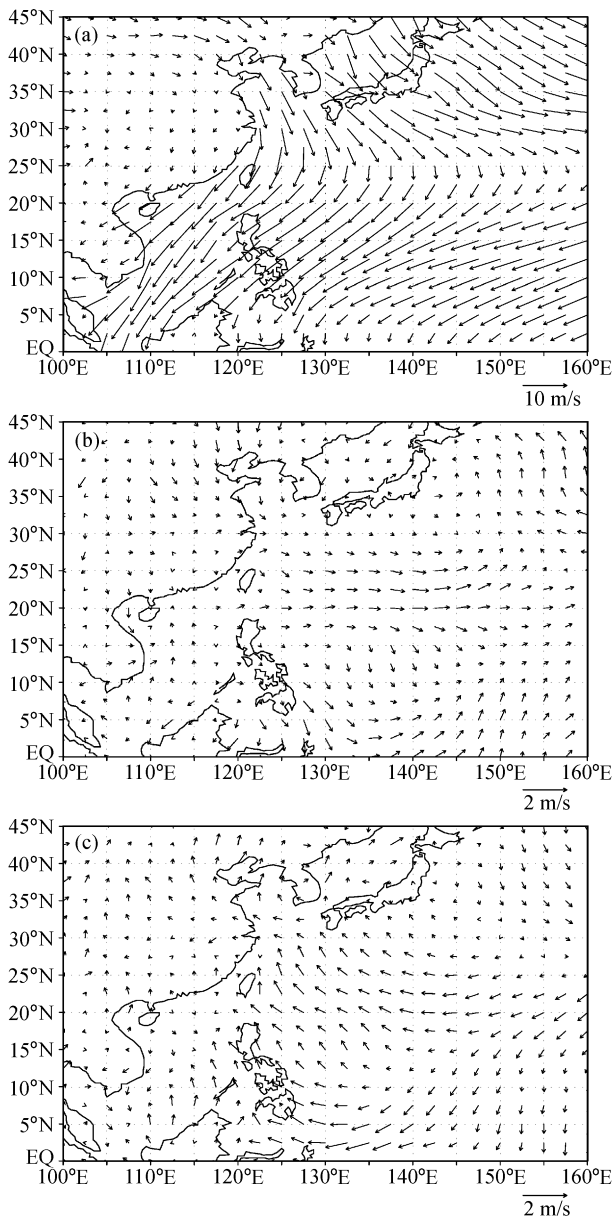


图 4 同图 1, 但为海表附近 10 m 处的风场

Fig. 4 Same as Fig. 1, but for the wind field at 10 m height from sea surface

达 6.0~8.0 m/s, 而从台湾海峡到南海和副热带西太平洋海面附近的东北风风力可达 10.0 m/s 以上; 图 4b 和 c 则分别表明了 1976 年之前我国近海和邻近海有偏北风的风场, 在 1976 年之后有偏南风的风场。即在 1976 年之前冬季我国近海和邻近海面附近偏北风风力偏强, 而在 1976 年之后, 海域冬季海面附近的偏北风风力偏弱。

3.1.2 夏季

图 5a~c 分别是我国近海和邻近海上空 10 m

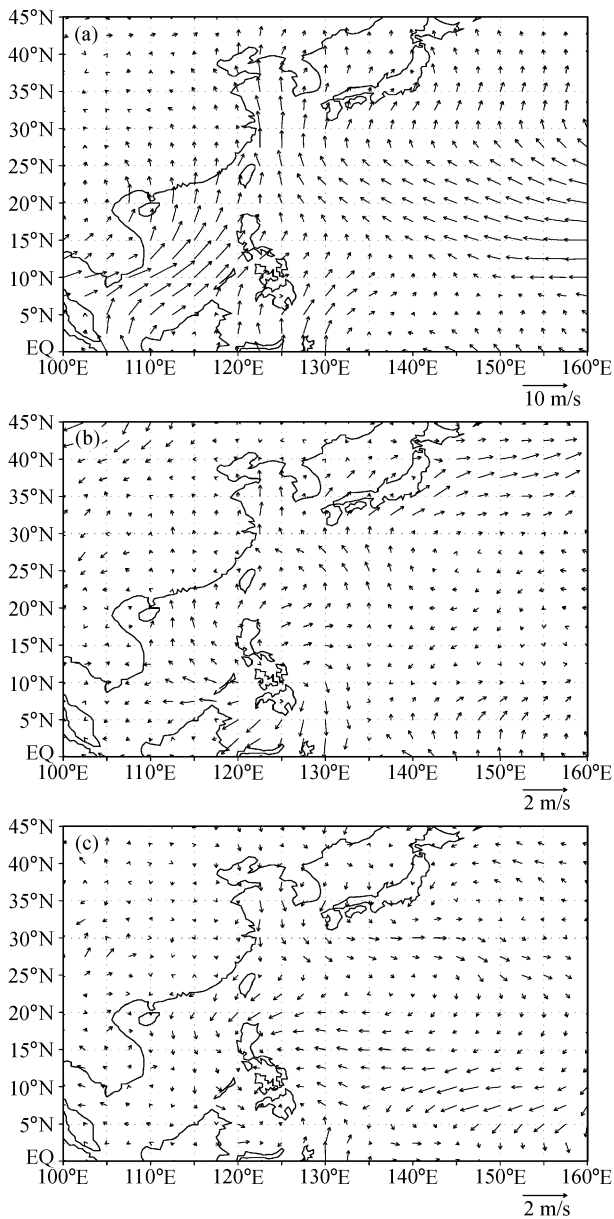


图 5 同图 2, 但为海表附近 10 m 处的风场

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the wind field at 10 m height from sea surface

夏季 (6~8 月) 风场 1961~1990 年的气候平均、1958~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均的距平风场。比较图 5 与图 2, 同样可以发现, 两者分布也基本相似。从图 5a 可见, 我国近海的夏季海面风力明显大于陆地上的风力, 在黄渤海和东海海面附近东南风和偏南风的风力可达 4.0~6.0 m/s, 从南海北部到台湾海峡和副热带西太平洋的西南风可达 4.0 m/s 左右, 而在南海中部和南部, 西南风风力可达 8.0 m/s 左右。因此, 无论冬、夏南海的

中、南部海面风力大，船舶经过越南南部附近的南海海面时经常遇到大风大浪。并且，图 5b 和 c 表明在 1976 年之前我国近海和邻近海有偏南风的距平风场，而在 1976 年之后有偏北风的风场。即 1976 年之前夏季我国近海和邻近海海面附近的偏南风风力偏强，而在 1976 年之后这些海域夏季的海面附近的偏南风风力明显减弱。

综上所述，我国近海和邻近海在 1976 年之后，无论冬季或夏季海面附近的风力均减弱，相对于 1976 年之前的平均，在 1976~2000 年期间平均这些海域海表冬季偏北风约减弱了 1.0~2.0 m/s，风力最大减弱区是东海和副热带西太平洋，风力约减弱了 2.0 m/s；而夏季这些海域偏南风约减弱了 0.5~1.5 m/s，最大减弱区位于黄渤海、东海和南海北部以及 135°以西的副热带西太平洋，风力约减弱了 1.5 m/s。

3.2 海面纬向风应力的变化

基于分析我国近海和邻近海海面风应力的变化对于研究我国近海和邻近海海洋环境变化的重要性，因此，本节分析了我国近海和邻近海冬、夏季海面风应力的变化。

3.2.1 冬季

图 6a~c 分别是我国近海和邻近海海面冬季纬向风应力 1961~1990 年的气候平均、1958~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均纬向风应力距平的分布。从图 6a 可见，冬季在黄渤海和西北太平洋有西风风应力，其值自西向东增大，在日本以东的西风漂流区为最大，达到 $1.2 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$ ，而从东海、副热带西太平洋和我国南海海面则为东风风应力，其值由北向南增大，最大东风风应力位于巴士海峡和菲律宾周围的南海和热带西太平洋，达 $-1.0 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$ ，与图 4a 所示的海面附近气候平均风场相对应。

图 6b 表明，在 1976 年之前，我国南海和渤海冬季海面有东风风应力距平，黄海、东海、副热带和热带西太平洋有西风风应力距平，南海的北部和南部有东风风应力距平。这是由于这些海域在 1976 年以前海面附近分别有西北风和东北风的风力异常所致。然而，正如图 6c 所示，在 1976 年之后，上述海域的海面风应力异常分布正好与图 6b 所示的 1976 年之前的海面风应力距平的分布相反，在南海、台湾海峡和东海南部有西风风应力异常，

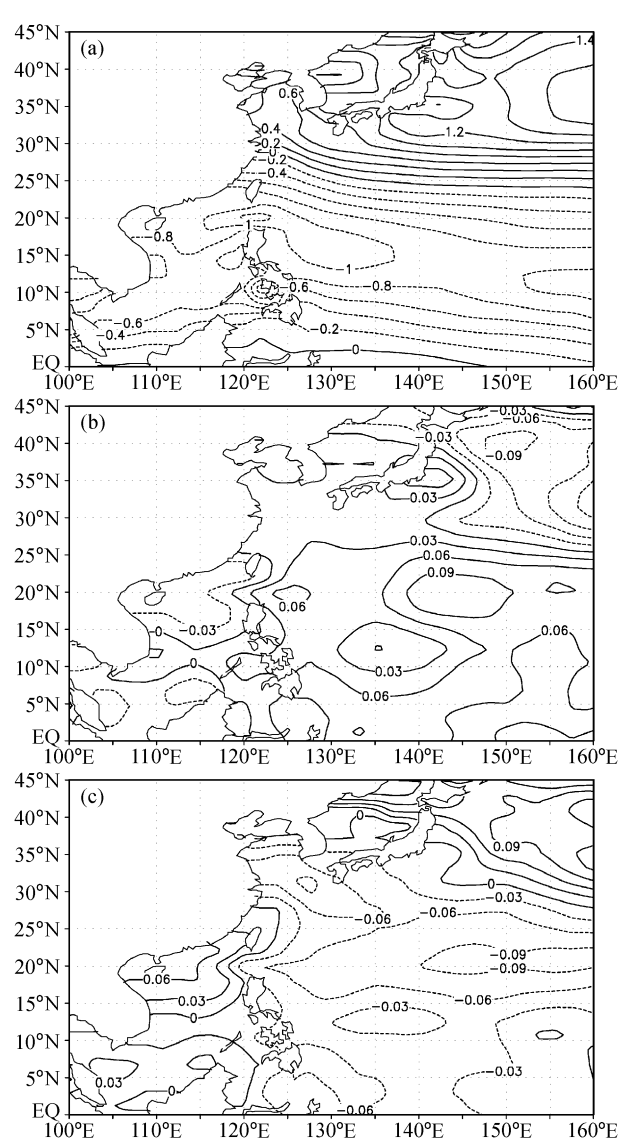


图 6 我国近海和邻近海冬季海面纬向风应力的 1961~1990 年气候平均 (a) 以及 1958~1976 年期间 (b) 和 1977~2000 年期间 (c) 平均的距平风应力 (单位: 10^{-5} N/cm^2 , 资料取自 SODA)

Fig. 6 Distributions of climatological mean winter (Dec - Feb) sea surface zonal wind stresses (10^{-5} N/cm^2) over the offshore area of China and its adjacent ocean for 1961 - 1990 (a), and zonal wind stress anomalies (10^{-5} N/cm^2) averaged for the periods of 1958 - 1976 (b) and 1977 - 2000 (c). Data are from SODA

而黄海、东海、副热带和热带西太平洋有东风风应力异常。

上述我国近海和邻近海冬季海面风应力距平的年代际变化与图 4b 和 c 所示的海面附近的风场异常的年代际变化相对应，表明 1976 年之后的冬季，我国黄渤海、东海北部海面西风风应力减弱，而东

海南部、台湾海峡和南海海面东风风应力减弱。并且,图6表明,我国近海1976年之后冬季海面西风风应力减弱区位于黄海、东海,而以东海海域为最大减弱区,相对于1976年以前的平均,在1976年之后,冬季我国近海海面西风风应力平均约减弱了 $0.08 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$;而东风风应力减弱区位于南海北部,相对于1976年以前的平均,在1976年之后的平均约减弱了 $0.08 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$ 。

3.2.2 夏季

图7是我国近海和邻近海夏季海面纬向风应力1961~1990年的气候平均、1958~1976年期间和1977~2000年期间平均的纬向风应力距平的分布。

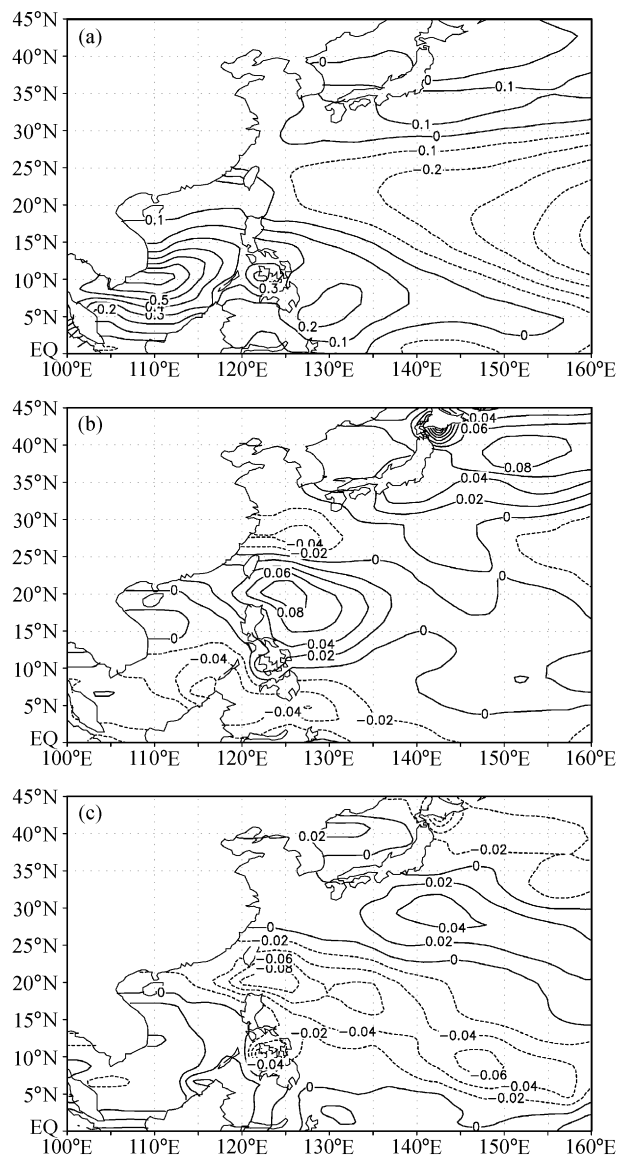


图7 同图6, 但为夏季(6~8月)

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for summer (Jun - Aug)

由图7a可见,夏季在南海和 140°E 以西的热带西太平洋海面为西风风应力,其最大值位于中印半岛南端附近的南海海面可达 $0.7 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$;东海和副热带太平洋为东风风应力,最大值大约为 $-0.2 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$;而黄渤海海面纬向风应力很小。这些与图5a所示海域海面附近的气候平均风场分别相对应。图7b还表明了,在1976年之前我国东海、南海南部和中部以及赤道西太平洋海面有东风风应力距平分布,而在南海北部、巴士海峡和热带西太平洋海面有西风风应力距平。然而,正如图7c所示,在1976年之后,上述海域的海面风应力异常分布正好与图7b所示1976年之前的海面风应力距平的分布相反,在南海南部、中部和东海以及赤道西太平洋海面有西风风应力距平分布,而在南海北部、台湾海峡、东海南部和热带西太平洋海面有东风风应力距平。

上述我国近海和邻近海夏季海面风应力距平的年代际变化,与图5b和c所示的夏季海面附近的风场异常的年代际相对应。并且从图7可见,我国近海1976年之后夏季纬向风应力的最大减弱区位于南海北部、东海南部和巴士海峡附近,这些海域西风风应力大为减弱,相对于1976年以前的平均,1976年之后这些海域海面西风风应力平均约减弱了 $0.10 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$,最大减弱 $0.16 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$ 。这个变化可能与西太平洋副热带高压从1976年之后向南撤退有关。

3.3 海面经向风应力的变化

黄荣辉等^[24]的研究表明东亚季风有别于南亚季风,东亚季风经向分量很大,而南亚季风纬向分量很大。因此,受东亚季风的影响,我国近海和邻近海面风应力的经向分量也会比较大。

3.3.1 冬季

图8是我国近海和邻近海冬季海面经向风应力1961~1990年的气候平均以及1958~1976年期间和1977~2000年期间平均经向风应力距平的分布。从图8a与图6a的比较可以看到,我国近海和邻近海冬季海面气候平均的经向风应力为一致的北风风应力,其值要比纬向风应力大,最大可达到 $1.4 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$,位于长江口南部一带,风应力值自西向东减少,这说明受东亚冬季风影响我国沿岸的海面盛行强的偏北风。并且,从图8b可见,在1976年以前的冬季,我国黄渤海、东海、南海和

热带、副热带西太平洋海面为一致的北风风应力异常，这表明 1976 年之前我国近海和邻近海冬季北风偏强，与图 4b 所示的海表附近距平风场相对应；相反，如图 8c 所示，在 1976 年之后上述近海和邻近海冬季海面出现一致的南风风应力距平，这表明 1976 年之后我国近海和邻近海海面北风风应力减弱，反映了东亚冬季风从 1976 年之后大大减弱了。

上述分析的我国近海和邻近海冬季经向风应力距平的年代际变化与图 4b 和 c 所示的冬季海面附近的风场异常的年代际变化相对应。并且从图 8 可见，我国近海从 1976 年之后冬季北风风应力均减

弱，最大减弱区位于东海，相对于 1976 年之前的平均，这个海区在 1976 年之后平均北风风应力约减弱了 $0.12 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$ 。

3.3.2 夏季

图 9a~c 分别是我国近海和邻近海夏季经向风应力 1961~1990 年的气候平均、1955~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均的经向风应力距平的分布。比较图 9a 与图 7a 可见，我国近海和邻近海夏季海面气候平均的经向风应力为一致的南风风应力，其值在黄渤海、东海要比纬向风应力大，最大值位于长江以南的东海可达 $0.4 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^2$ ，但在南海，两者大体上相当，其值约为 0.5×10^{-5}

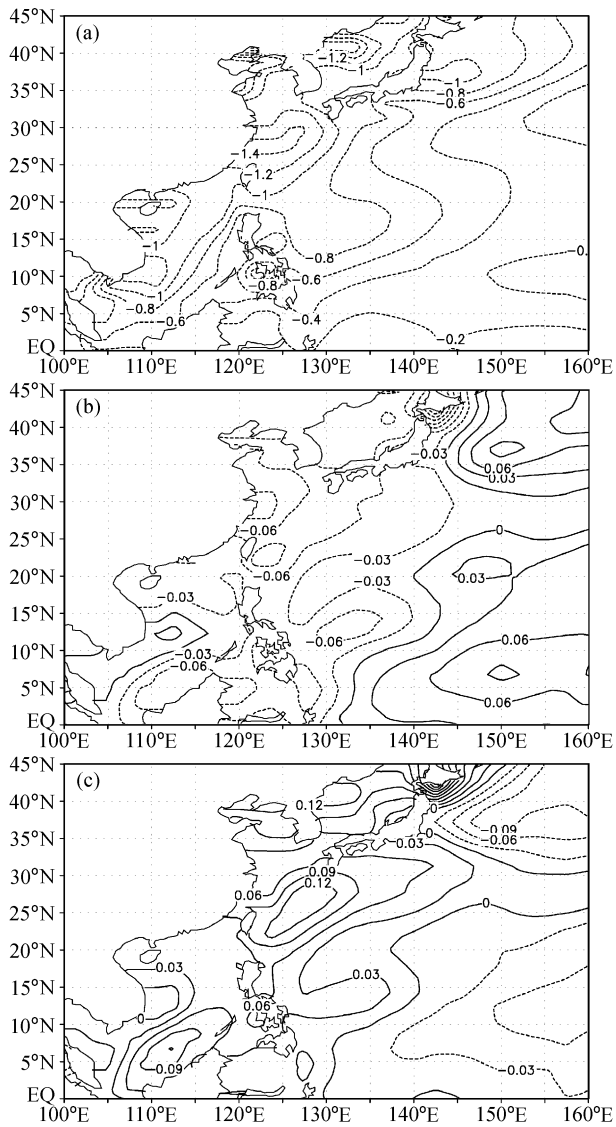


图 8 同图 6，但为经向风应力

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the sea surface meridional wind stresses

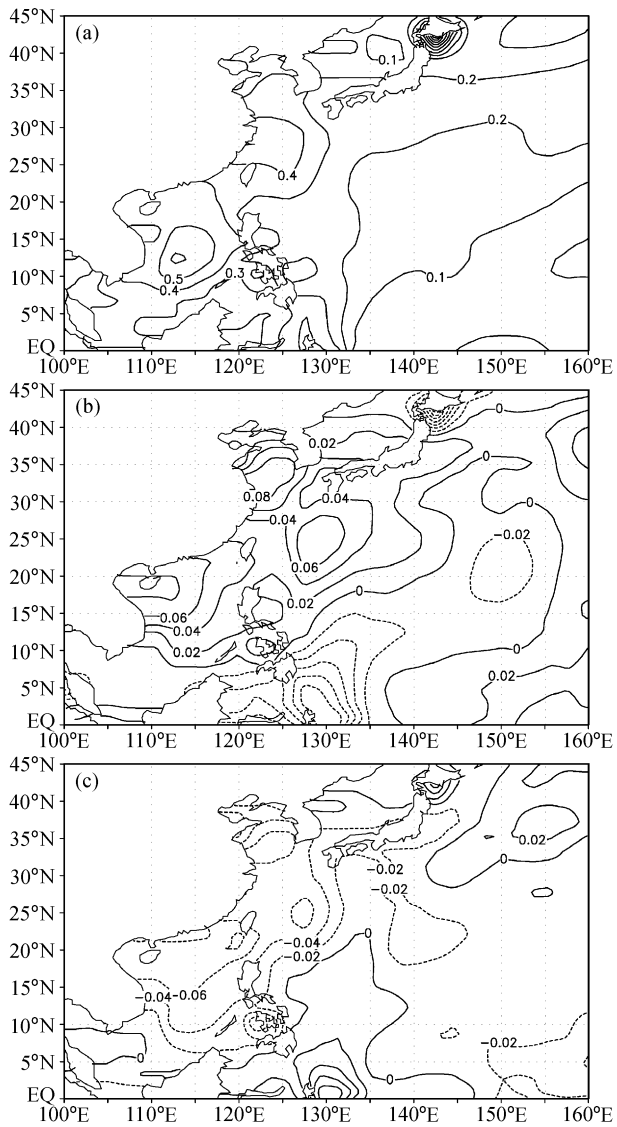


图 9 同图 7，但为经向风应力

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the sea surface meridional wind stresses

N/cm^2 左右;比较图 9a 与图 8a 还可见,我国近海海面冬季经向风应力值要大于夏季经向风应力。图 9b 所示,1976 年以前我国近海和邻近海为一致的南风风应力异常,表明 1976 年之前我国近海和邻近海夏季南风偏强,与图 5b 所示的海表附近距平风场相对应;相反,如图 9c 所示,在 1976 年之后我国近海和邻近海夏季海面出现一致的北风风应力距平,表明在 1976 年之后我国近海和邻近海海面南风风应力减弱,这也反映东亚夏季风减弱。

上述我国近海和邻近海夏季经向风应力距平的年代际变化与图 5b 和 c 所示的夏季海面附近的风场异常的年代际变化相对应。并且从图 9 可见:我国近海从 1976 年之后夏季南风风应力均减弱,最大减弱区位于黄海、东海和南海,这三个海域在 1976 年后平均南风风应力约减弱了 $0.10 \times 10^{-5} \sim 0.12 \times 10^{-5} \text{N}/\text{cm}^2$ 。

4 近 50 年我国近海和邻近海海表温度 (SST) 对全球变化的响应

从 20 世纪 70 年代末迄今,全球和我国的气温有加速上升的趋势,这个趋势也影响到海洋。研究表明热带中、东太平洋从 20 世纪 80 年代起迄今也有较强的升温,即产生了年代际的 El Niño 现象^[3, 5]。黄刚^[18]的研究也表明了由于南半球从 20 世纪 80 年代迄今的升温比北半球快,南北半球温差减弱造成亚非季风从 80 年代起减弱。因此,热带太平洋的升温和亚洲季风的减弱,势必影响我国近海和邻近海的海表温度。由于海温和海表风应力是海洋环境的重要因子,它们的变化将严重影响着海洋生态系统,因此,本节利用 HadISST 资料集的 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的 SST 资料来分析我国近海和邻近海海表温度的年代际变化。

4.1 冬季

图 10a~c 分别是我国近海和邻近海冬季海表温度 (SST) 1961~1990 年的气候平均、1958~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均的海表温度距平 (SSTA) 的分布。从图 10a 可以看到:冬季我国近海气候平均的 SST 由南向北递减,南海海温高达 $24 \sim 28^\circ\text{C}$,而渤海只有 $3 \sim 4^\circ\text{C}$;而受黑潮的影响,我国黄海、东海东部和相邻的副热带西太平洋 SST 要比我国沿岸的海表 SST 高,这些海域的 SST 呈西南-东北走向。图 10b 表明了 1976 年以前

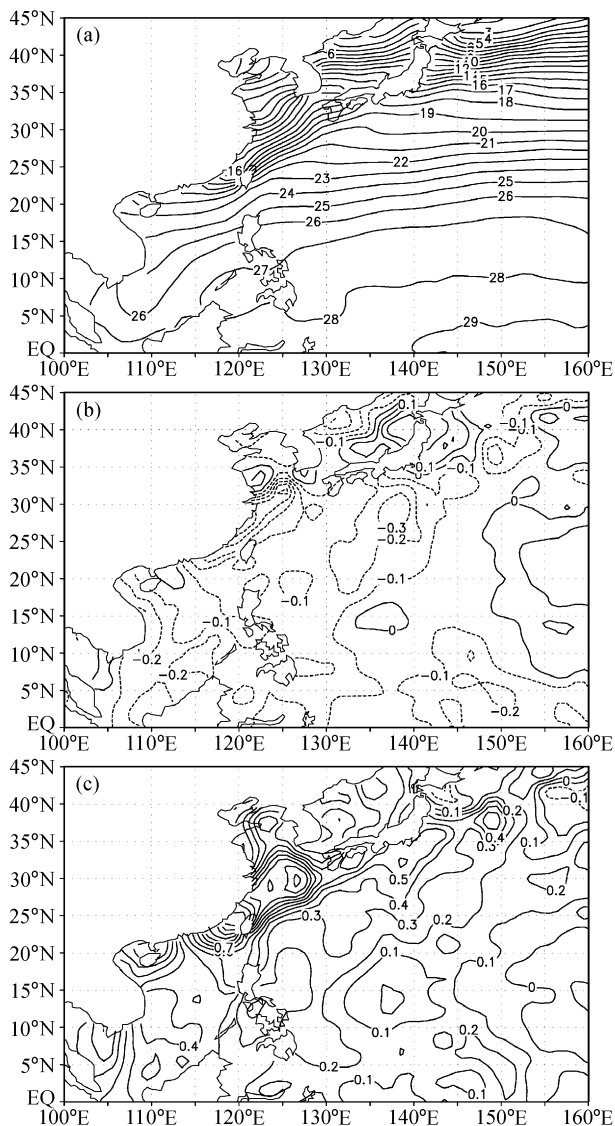


图 10 我国近海和邻近海冬季海表温度 (SST) 的 1961~1990 年气候平均 (a)、1958~1976 年期间 (b) 和 1977~2000 年期间 (c) 平均的海表温度距平 (SSTA) 的分布 (单位: $^\circ\text{C}$, 资料取自 HadISST 资料集)

Fig. 10 Distributions of climatological mean winter (Dec-Feb) SST ($^\circ\text{C}$) in the offshore area of China and its adjacent ocean for 1961-1990 (a), and SST anomalies ($^\circ\text{C}$) averaged for the periods of 1958-1976 (b) and 1977-2000 (c). Data are from HadISST dataset

我国近海和邻近海 SSTA 为负,即这些海域的 SST 要比气候平均值低,最大 SSTA 位于从台湾海峡到长江口的东海海域,可达 -0.8°C ,且愈向东 SSTA 越小,在广大的热带和副热带太平洋负 SSTA 值较小;相反,图 10c 所示,在 1976 年之后我国近海

和邻近海夏季 SSTa 出现了一致的正距平, 这表明, 在 1976 年之后我国近海和邻近海冬季海温有较大的升温, 最大升温仍位于台湾海峡到长江口的东海, 相对于 1976 年之前的平均, 在 1976 年之后平均升温可达 $1.0 \sim 1.5^{\circ}\text{C}$, 且愈向东其升温愈小, 在广大的热带和副热带西太平洋海表温度升温值较小。

4.2 夏季

图 11a~c 分别是我国近海和邻近海夏季 SST 1961~1990 年的气候平均、1958~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均的 SSTa 的分布。从图 11a 可以看到, 我国近海和邻近海气候平均的 SST 也

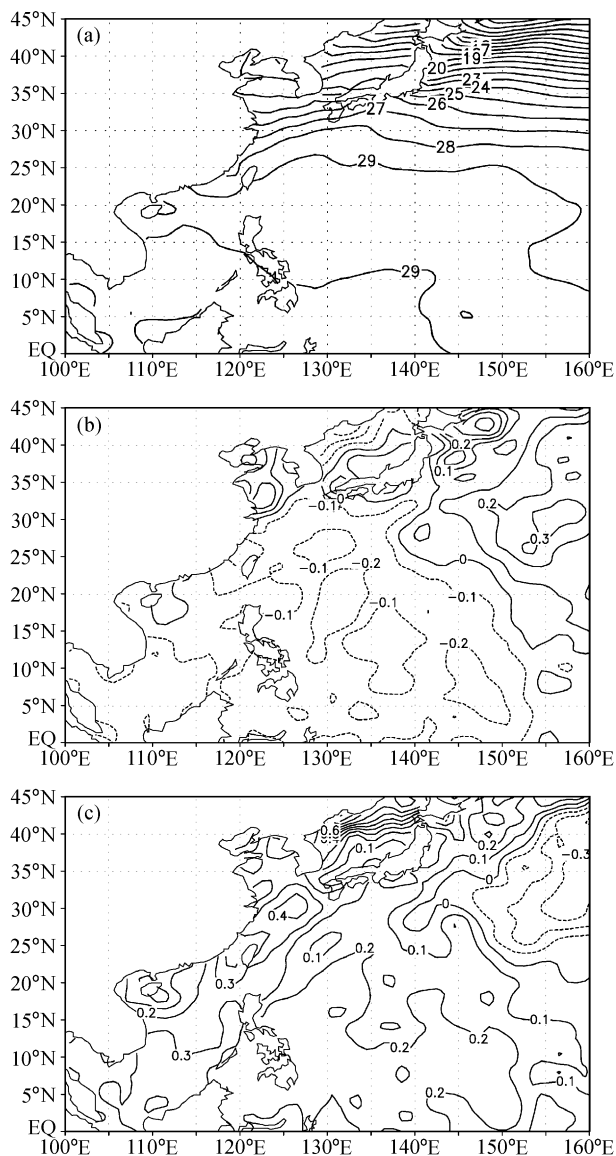


图 11 同图 10, 但为夏季 (6~8 月)

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for summer (Jun - Aug)

由南向北递减, 在南海和热带西太平洋 SST 高达 29°C , 与西太平洋暖池海温相当, 最北渤海海温也有 23°C , 可见我国近海 SST 随季节变化很大。图 11b 表明了 1976 年以前我国近海和邻近海 SSTa 为负, 最大负值的 SSTa 位于台湾海峡到长江口以南的东海海域为 -0.3°C ; 相反, 如图 11c 所示, 在 1976 年之后我国近海和邻近海夏季 SSTa 出现了一致的正距平, 这表明在 1976 年之后我国近海和邻近海夏季也有一定的升温, 最大升温区仍位于长江口南部的东海, 相对于 1976 年之前的平均, 我国东海海域约上升了 0.5°C 。

从上述我国近海和邻近海冬、夏 SST 距平的年代际变化的分析结果可见, 我国近海无论冬季或是夏季从 1976 年以后均升温, 升温幅度冬季大于夏季, 近海大于邻近海; 并且, 最大升温区位于台湾海峡到长江口的东海, 相对于 1976 年以前, 这个海域在 1976 年之后冬季约升温 1.4°C , 而夏季约上升了 0.5°C , 升温的幅度明显大于热带、副热带西太平洋。这一方面是受全球气温变化的影响, 另一方面这个海域也是海面附近冬、夏季风风力减弱较大的区域。

5 全球气候变暖对我国近海海洋生态系统的影响的初步探讨

由于我国近海为北太平洋的西部边缘海, 其跨度从热带至温带, 适合于多种海洋生物生存; 并且, 我国有漫长曲折的海岸线, 众多的河口、港湾、岛屿、广阔的浅海陆架, 拥有众多的入海江河, 为近岸海域提供了丰富的营养盐, 黑潮及其分支延伸至各个海域, 形成了诸多海洋锋面和上升流, 创造了很高的海洋初级生产力。优良的自然条件使得我国近海有诸多优良的渔场形成, 为我国提供了丰富的海洋渔业产量。然而, 受全球气候变化的影响, 正如上述第 3、4 节所述, 我国近海无论冬季或夏季不仅海面风力和相应的风应力从 20 世纪 70 年代中后期迄今明显减弱, 而且海表温度明显上升, 尤其在东海海域, 风应力减弱和海表水温上升特别明显。而海水的升温 and 溶解氧含量的变化等因素影响了海洋生物新陈代谢过程, 干扰了海洋生物个体的生长、发育、摄食和死亡, 出现暖性生物分布区扩大, 冷性生物分布区缩小以及物种北移等现象。海洋生态系统的结构和功能出现的变化, 对海洋食物

链乃至渔业和海水养殖业产生了明显的作用,从而导致海洋生物资源的可持续利用受到难以估量的影响。

研究表明:气候的波动影响了海洋环境,致使海洋生物的丰度和地理分布产生明显的变化^[25, 26]。此外,相关研究也表明我国近海的海洋环境的变化对于海洋生态系统有很大影响^[27, 28]。除了由于我国近海污染、富营养化日益严重的影响之外,还可能由于我国近海的海面风应力的变化引起了上升流的变化所带来的影响。由于我国近海从 1976 年之后无论冬季或夏季上空季风风力明显减弱,致使我

国沿岸上升流减弱。图 12 和图 13 分别是我国东部以及近海和邻近海上空冬、夏季 1958~1976 年期间和 1977~2000 年期间平均的 925hPa 环流的散度分布。从图 12 b 与图 13b、图 12a 与图 13a 的比较可以看到,我国近海上空无论冬、夏季从 1976 年之后环流的辐散增强。在冬季,1976 年以前在南海北部、台湾海峡为环流的辐合区,这有利于海洋上升流的形成。然而从 1976 年以后,这片辐合区移至我国台湾岛以东,并且,无论渤海、黄海、东海和南海上空环流的辐散区要比 1976 年以前强得多,这些均不利于海洋上升流的形成。同样,在

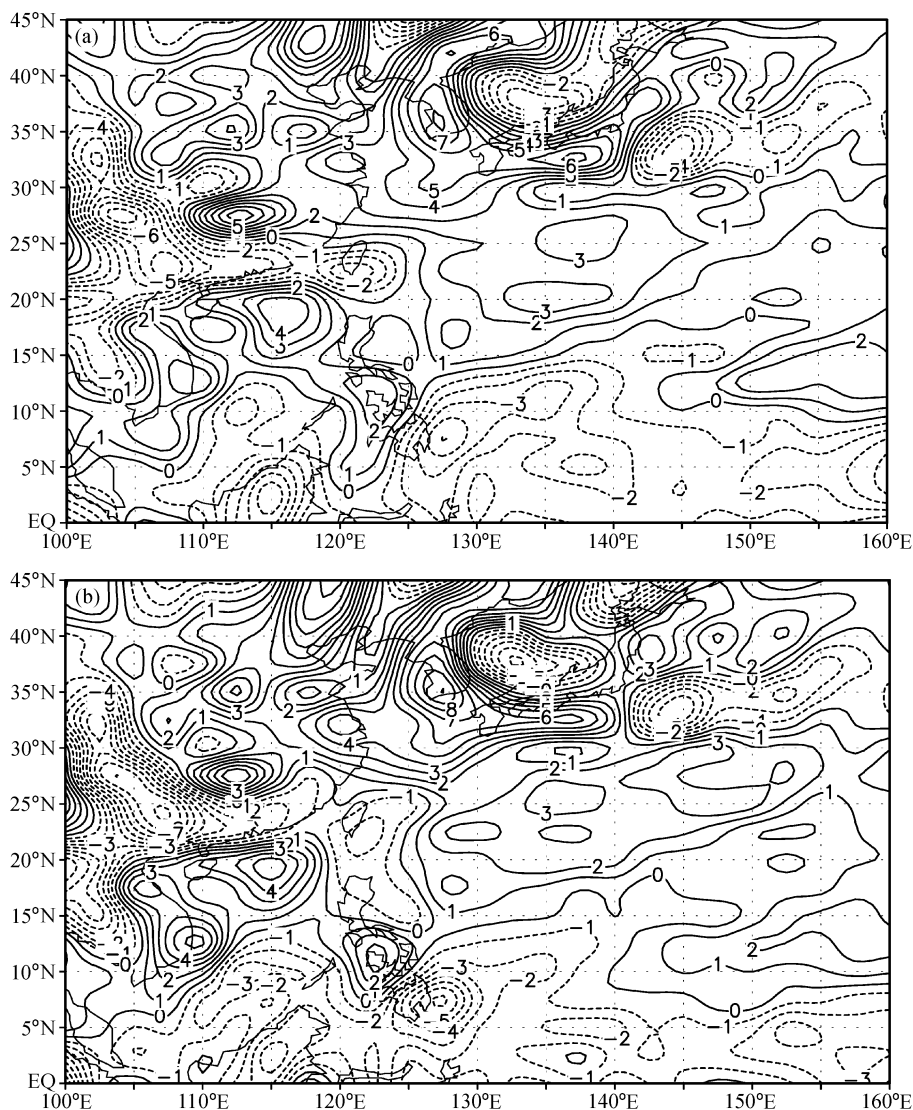


图 12 我国东部以及近海和邻近海上空 925 hPa 冬季 (12~第 2 年 2 月) 1958~1976 年期间 (a) 和 1977~2000 年期间 (b) 平均环流的散度场分布 (单位: 10^{-6}s^{-1} , 资料取之于 ERA-40 再分析资料)

Fig. 12 Distributions of winter (Dec-Feb) circulation divergences (10^{-6}s^{-1}) at 925 hPa over East China, the offshore area of China and its adjacent ocean averaged for the periods of 1958-1976 (a) and 1977-2000 (b). Data are from the ERA-40 reanalysis data

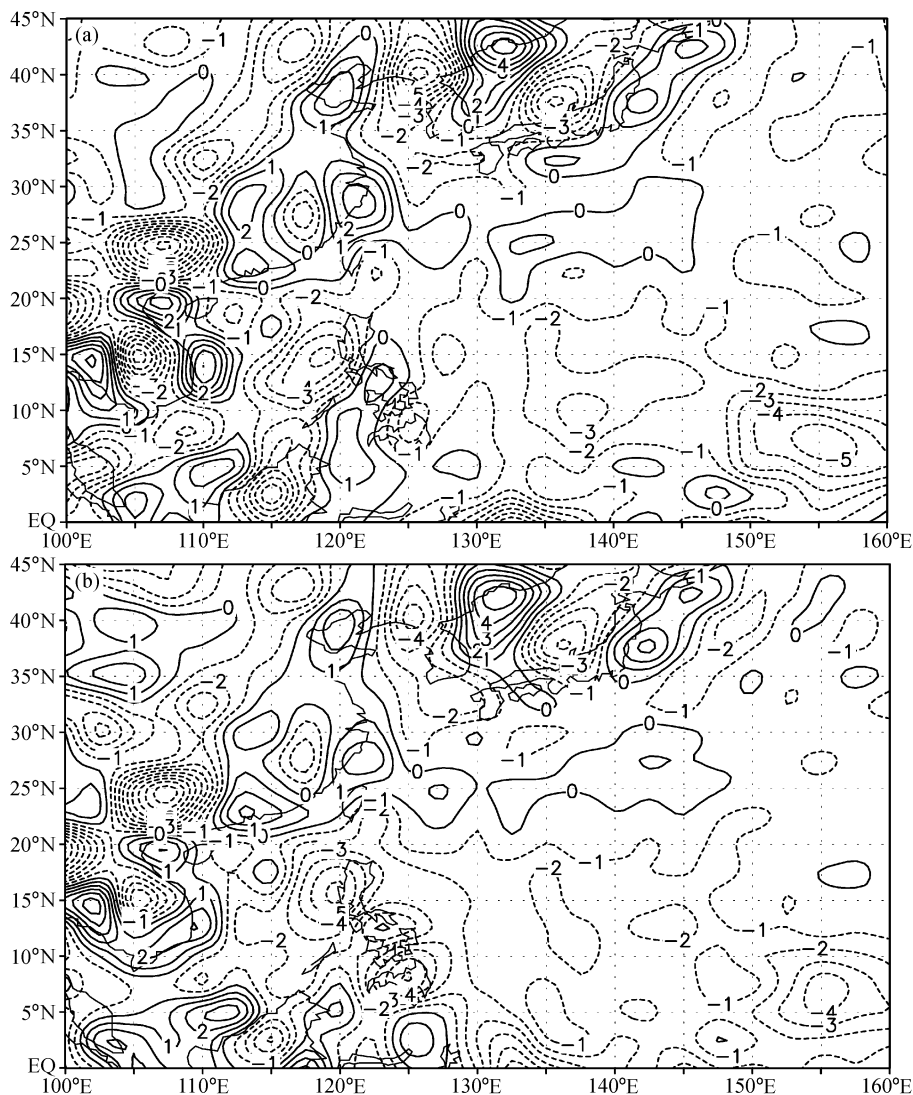


图 13 同图 12，但为夏季（6~8 月）

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for summer (Jun-Aug)

1976 年以前的夏季，在黄、东海以及南海上空环流有较强的辐合区，加上黄、东海有很好的陆架，这很有利于海洋上升流的形成。然而，从 1976 年以后，黄、东海上空夏季环流的辐合区向东移，并且，南海上空的环流的辐合区也向东移，在这些海域的沿岸海区上空为环流的辐散区，这不利于黄、东海和南海沿岸海区上升流的形成。

近年，由于陆源污染物排入海总量的增加以及我国近海海表水温从 1976 年之后的明显上升，如图 10 所示，从 1976 年以后无论冬季或夏季我国近海海表温度上升最明显也在东海。这些都可以为赤潮发生提供有利的海洋环境条件。由此可见，从 20 世纪 80 年代迄今我国近海赤潮发生次数剧增与

上述近海气候与海洋环境的变化有密切关系。黄镇国等^[29]统计并研究了我国近海（包括黄海、渤海、东海和南海）赤潮发生次数的年代际变化，他们指出：我国近海赤潮发生次数有明显的年代际变化，在 20 世纪 80 年代以前我国近海只发生了 8 次赤潮，然而从 80 年代到 90 年代赤潮发生次数猛增到 185 次，其中以东海海域发生的赤潮次数增长为最快，80 年代以前只发生 5 次，80~90 年代剧增到 75 次。

此外，这些海域冬、夏季海面风力减弱、水温上升所引起的海洋生物的生存环境变化，将导致海洋生态系统的变化。从图 4、5 以及图 6~9 都可以看到，从 1976 年之后我国近海海面附近风力以及

海表纬向和经向风应力减弱以东海海域为最大,必然使得沿岸水域向岸流和离岸流的发生和强度产生变异,造成沿岸水域上升流的变化,并影响到沿岸水域营养盐的输送,从而引起海洋初级生产力的变化,并进一步影响到海洋渔业的生产。

6 结论和讨论

对我国近海、邻近海区域的气候、海洋环境变化的初步研究结果表明:由于受全球气候变暖的影响,1976年之后我国近海和邻近海上空的冬、夏季风变弱,从而引起我国近海冬、夏季海表风应力减弱(尤其是经向风应力),而海表水温明显上升;并且,冬、夏季海表风应力的减弱和海水温度的明显上升在我国东海反映尤其明显。这些为我国近海赤潮的频繁发生提供了有利的海洋环境。分析还表明:由于我国近海从1976年之后迄今冬、夏季上空环流的辐散加强,这可致使我国近海的上升流减弱,造成沿岸上升流的变化,影响营养盐的输送,从而引起海洋初级生产力的变化。上述结果显示全球气候变暖已严重影响了我国近海和邻近海的海洋环境和海洋生态,因而影响了我国沿海地区社会和经济的可持续发展。这表明开展全球气候变化对我国近海海洋环境和海洋生态系统的影响和适应性研究具有重要的科学意义。

近来关于我国近海的碳循环及其对全球气候变化的影响的研究迅速发展^[30, 31],然而,关于我国近海和邻近海对全球气候变化的响应和适应性研究还不多。为了更好地开展这方面的研究,应进一步深入研究东亚季风系统、热带、副热带西太平洋、热带西太平洋的 ENSO 循环和太平洋的年代际振荡(PDO)对全球气候变化的响应及其对我国近海海洋环境和海洋生态系统的影响,从而揭示我国近海和邻近海对全球气候变化的响应过程;并且,应进一步开展观测试验,收集我国近海和邻近海海洋环境和海洋生态系统变化的有关资料,分析在全球气候变化下我国近海海洋生态系统的脆弱性特征,开展我国近海海洋生态系统对全球变化的适应性研究,为国家和有关地区制定经济和社会可持续发展战略提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D J, et al. *IPCC Climate Change* 2001: *The Scientific Basis*. UK: Cambridge University Press, 2001. 900pp
- [2] Tyson P, Fuchs R, Fu C B, et al. *Global-Regional Linkages in the Earth System*. The IGBP Series. Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Press, 2002. 198pp
- [3] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. *高原气象*, 1999, **18**: 465~476
Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1999, **18**: 465~476
- [4] 周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. *气候与环境研究*. 2003, **8**: 274~290
Zhou Liantong, Huang Ronghui. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8**: 274~290
- [5] Huang Ronghui, Zhou Liantong, Chen Wen. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 55~69
- [6] 符淙斌. 海洋过程和气候变化. 见: 叶笃正, 曾庆存, 郭裕福编. *当代气候研究*. 北京: 气象出版社, 1991. 212~233
Fu Congbin. Oceanic process in association with climate change. *Current Research in Climate* (in Chinese), Ye Duzheng, Zeng Qingcun, Guo Yufu, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 213~233
- [7] Maier-Reimer E, Hasselmann K. Transport and storage of CO₂ in the ocean—An inorganic ocean circulation carbon cycle model. *Climate Dynamics*, 1987, **2**: 63~90.
- [8] 苏纪兰, 李炎, 王启. 我国 21 世纪初海洋科学研究中的若干重要问题. *地球科学进展*, 2001, **16**: 658~663
Su Jilan, Li Yan, Wang Qi. Some important research topics for China in ocean sciences in the early 21st century. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2001, **16**: 658~663
- [9] NASA. NASA Earth Science Enterprise Research Strategy for 2000~2010. [http: www.earth.nasa.gov](http://www.earth.nasa.gov), 2000
- [10] Huang Ronghui, Huang Gang, Wei Zhigang. Climate variations of the summer monsoon over China. *East Asian Monsoon*, Chang C P, Ed. World Scientific Publishing Co. Pet. Ltd., 2004. 213~270
- [11] 黄荣辉, 蔡榕硕, 周连童, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统的关系. *大气科学*, 2006, **30** (5): 730~743
Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Zhou Liantong, et al. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**(5): 730~743
- [12] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2005, **131**: 2961~3012

- [13] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: No. D14, 4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- [14] Carton J A, Giese B S. SODA: A reanalysis of ocean climate. *J. Geophys. Res.*, 2006 (Submitted)
- [15] Jones P D. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993. *J. Climate*, 1994, **7**: 1794~1802
- [16] Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70** (1B): 243~256
- [17] Wu Bingyi, Wang Jia. Possible impacts of winter Arctic oscillation on Siberian high, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 297~320
- [18] 黄刚. 与华北干旱相关联的全球尺度气候变化现象. 气候与环境研究, 2006, **11** (3): 270~279
Huang Gang. Global climate change phenomenon associated with the droughts in North China. *Clim. & Environ. Res.* (in Chinese), 2006, **11** (3): 270~279
- [19] Tao Shiyan, Chen Longxun. A review of recent research of the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology*, Chang C P, Krishnamurti T N, Eds. Oxford University Press, 1987. 60~92
- [20] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究. 大气科学, 2003, **27**: 770~787
Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), **27**: 770~787
- [21] Huang Ronghui. Decadal variability of the summer monsoon rainfall in East Asia and its association with the SST anomalies in the tropical Pacific. *CLIVAR Exchange*, 2001, **2**: 7~8
- [22] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **64**: 373~390
- [23] 黄荣辉, 李维京. 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, 1988, **12** (特刊): 107~116
Huang Ronghui, Li Weijing. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1988, **12** (Special Issue): 107~116
- [24] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其对南亚季风区水汽输送的差别. 大气科学, 1998, **22**: 460~469
Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 460~469
- [25] Stenseth N C, Mysterud A, Ottersen G, et al. Ecological effects of climate fluctuation. *Science*, 2002, **297**: 1292~1296
- [26] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, **416**: 389~395
- [27] 洪华生, 商少陵, 张彩云, 等. 台湾海峡生态系统对海洋环境年际变动的响应分析. 海洋学报, 2005, **27**: 63~69
Hong Huasheng, Shang Shaoling, Zhang Caiyun, et al. Evidence of ecosystem response to the interannual environmental variability in the Taiwan Strait. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2005, **27**: 63~69
- [28] 唐启升, 苏纪兰, 孙松, 等. 中国近海生态系统动力学研究进展. 地球科学进展, 2005, **20**: 1288~1299
Tang Qisheng, Su Jilan, Sun Song, et al. A study of marine ecosystem dynamics in the coastal ocean of China. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2005, **20**: 1288~1299
- [29] 黄镇国, 杜碧兰, 沈焕庭, 等. 中国近海及海岸带气候生态与环境的变化. 见: 秦大河等编. 中国气候与环境演变 (上卷). 北京: 科学出版社, 2005. 275~315
Huang Zhenguo, Du Bilan, Shen Huanting, et al. The change of climate, ecology and environment in the offshore area and coastal zone of China. *Climate and Environment Changes in China* (I) (in Chinese), Qin Dahe et al, Eds. Beijing: Science Press, 2005. 275~315
- [30] Ma Liming, Qiao Ran, Zhang Bin, et al. Carbon dioxide in the East China sea. *Margin Flux in the East China Sea*, Hu Dunxin, Tsunogai Shizao, Eds. Beijing: China Ocean Press, 1999. 113~123
- [31] 胡敦欣, 杨作升. 东海海洋通量关键过程. 北京: 海洋出版社, 2001. 204pp
Hu Dunxin, Yang Zuosheng, et al. *The Key Process of Margin Flux in the East China Sea*. Beijing: China Ocean Press, 204pp