

文章编号: 1001-6791 (1999) 03-0271-07

# 大尺度海气相互作用与水分循环

邢如楠

(北京气象学院, 北京 100081)

摘要: 就大尺度海气相互作用的现象、过程及对全球水分循环和气候的影响, 特别是对 ENSO 的研究成果及模式研究等方面的进展作了介绍, 简述了未来的研究重点。

关键词: 大尺度; 海气相互作用; 水分循环; ENSO

中图分类号: P 432.1; P 434.5 文献标识码: A

占全球总面积 71% 的海洋在地球气候的形成和变化中的作用是人们十分关注的问题。海洋对全球水分循环的贡献有两个方面。首先, 海洋是大气的热量和水分的主要供应地。海洋将其存贮的热量以感热和潜热的形式输送给大气, 并向大气提供大约 86% 的大气水汽来源。海洋热状况和海洋蒸发强度的变化直接影响着大气中能量和水汽的时空变化。第二, 全球平均而言, 海洋承担了约 33% 的经向热量输送, 维持了全球高、低纬度的能量平衡。此外, 海洋作为大气 CO<sub>2</sub> 的汇, 在减缓由于人类活动造成的大气中 CO<sub>2</sub> 增加引起的全球变暖中起着重要作用。

80 年代以来, 海气相互作用研究进展十分迅速。世界气候研究计划 (WCRP) 在 1984 年曾指出“几年到几十年的气候变化以及预测问题只有在充分了解全球大气和海洋耦合动力学基础上才有可能解决。”如今, 这已成为人们的共识。WCRP 为实现年际和十年际的气候问题研究制定了一系列的国际合作计划, 较早的有热带海洋和全球大气计划 (TOGA) 和世界海洋环流试验 (WOCE)。TOGA 计划从 1985 年 1 月开始为期 10 年, 研究热带海洋环流和海温异常的流体力学以及相应的大气环流和降水型变化的关系, 其重点放在热带和副热带太平洋 ENSO (El Nino 和南方涛动) 研究上, 以建立季到年际时间尺度的预报, 该计划已圆满完成, WOCE 试验研究世界海洋环流及对全球气候系统的影响, 其目标是为了建立预报气候变化的海洋模式, 并收集必要的资料。1991 年又开始了一个以研究西太平洋暖水区海气相互作用为主要目标的 TOGA—海气耦合响应试验 (TOGA/CORA)。此外, 专门研究水分循环的全球能量和水循环试验 (GEWEX) 自 1990 年开始, 对全球大气中水循环和能量收支, 以及与陆面和海表下垫面的相互作用进行观测、分析, 并建立水循环模式进行模式模拟。GEWEX 试验可能确定出可靠的降水和其它能量的全球分布, 这为了解大气环流, 进而为气候预测的研究提供依据。

收稿日期: 1999-04-20; 修订日期: 1999-05-28

作者简介: 邢如楠 (1941-), 男, 北京气象学院研究员。长期从事海洋物理、短期和长期气候变化与预测模式研究, 以及大气和海洋中碳循环等领域的研究, 发表学术论文 40 余篇。

# 1 海气相互作用与水分循环

据估计,地球上各种形式的总水量中 97% 是海水,大气只有 0.0009% (图 1),大气中的水平平均每 11d 就更替一次。对全球而言,要达到水分平衡年蒸发量与年降水量应同量级。来自海洋的蒸发量占总蒸发量的 84%,蒸发量大于降水量,来自陆地的蒸发量小于降水量。因此,从水分收支看主要水的源地在海洋。在陆地上降水的 35% 来自海上蒸发,65% 来自陆地上的蒸发,当陆地上降水超过蒸发时,超过的水以径流的形式退回到海洋中。

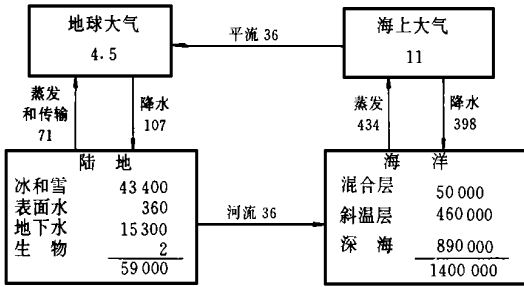


图 1 水分循环 ( $10^{15} \text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[1]</sup>

Fig. 1. Hydrological cycle ( $10^{15} \text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[1]</sup>

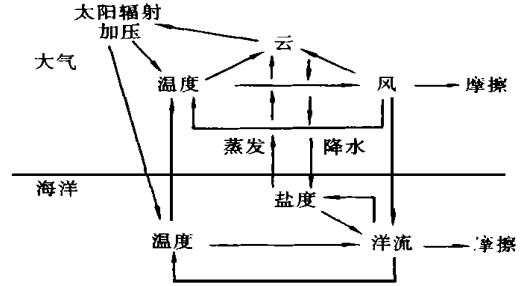


图 2 海气相互作用框图

Fig. 2. Sketch of interaction between ocean and atmosphere

海气间的相互作用是通过海气能量交换来实现的。图 2 给出了气候形成中海气相互作用示意图。太阳辐射除一小部分直接加热大气外大部分用于加热海洋,然后海洋以感热、潜热、长波辐射的形式再加热大气。由于海洋上蒸发大于降水,在海洋对大气的加热过程中潜热释放起着重要作用。海洋不断地向大气输送热量和水汽,对低层大气环流、云和降水有显著的作用。大气对海洋的影响主要是动力性的。大气运动的动能一部分用于摩擦消耗,一部分以风应力形式驱动海洋上层洋流,加上海洋内部的温盐流形成全球海洋的洋流系统。海洋动能的一部分用于摩擦消耗,一部分造成海面温度再分布,进而影响大气的运动状态。海气相互作用就是如此调整、制约的反馈过程。

海气能量交换异常导致海洋和大气环流异常及全球气候异常,对水资源的影响是通过降水的时空变化及径流的变化、土壤水及降水渗入、蒸发等变化而产生的。

## 2 ENSO 事件及其与我国夏季降水的关系

El Nino 是赤道中东太平洋上层海洋每隔 2~7 年发生一次的大范围持续增暖 3 个季度或一年以上的一种海洋现象。南方涛动 (Southern Oscillation) 是南太平洋和印度洋海平面气压场反位相的一种大气现象,它与 El Nino 有着很好的同时相关的关系。人们把 El Nino 和南方涛动合称为 ENSO,这是一种极为明显的海气耦合现象。与 El Nino 事件相反的是 La Nina 事件,在中东太平洋上层海温异常低的幅度小于 El Nino 事件中的增温幅度,对全球气候的影响也较小。自 1950 年以来共发生了 14 次 El Nino 事件,强度比较强的有 1972 年、1982/1983 年和 1997/1998

年。1997/1998 年的 El Nino 是本世纪最强的一次, 在 1997 年 12 月上旬, 热带东太平洋的海表温度正距平高达 4 , 比 1982/1983 年的增暖还高 0.4 (图 3)。

ENSO 期间, 发生在热带太平洋上的热通量异常是十分明显的。Reed<sup>[2]</sup> 计算了 1972 年 12 月 (El Nino) 和 1973 年 12 月 (非 El Nino 年) 热带太平洋上潜热和感热之和的差, 其值超过  $200W \cdot m^{-2}$ 。如果在热带海洋有一个 50m 深的混合层, 热通量超过年平均  $50 \sim 100W \cdot m^{-2}$ , 将使局地温度变化能达到  $0.75 \sim 1.5$ 。热带月平均尺度海表温度的发展很强烈地受到这样的热通量的影响。改变了的海表温度会引起大尺度对流区的重新分布。Walker 环流的上升分支东移至中太平洋, 降水区也东移至日界线, 导致了中东太平洋及南美洲太平洋沿岸国家异常多雨、甚至引起洪涝; 而热带西太平洋则降水减少, 印度尼西亚、澳大利亚发生严重干旱 (图 4)。ENSO 是气候水文变化的最显著的情况, 全球水循环与 ENSO 循环密切相关, 它也影响着我国东部地区降水和亚洲季风降水。如印度洪水年与 ENSO 冷位相相联系, 干旱年与 ENSO 暖位相相联系<sup>[3]</sup>, 表明印度夏季季风降水与赤道东太平洋海表温度是负相关。

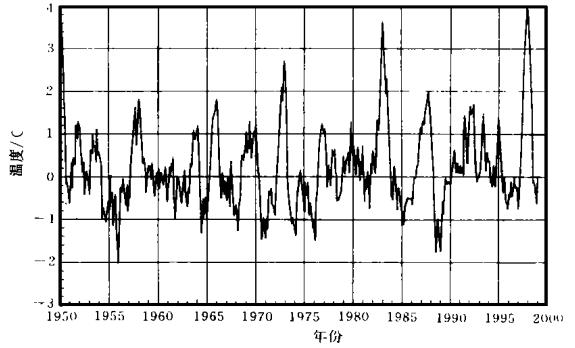


图 3 Nino3 区 (5 N ~ 5 S, 150 W ~ 90 W) 海表温度月距平

Fig. 3. Anomaly of sea surface temperature in Nino 3 (5 N ~ 5 S, 150 W ~ 90 W)

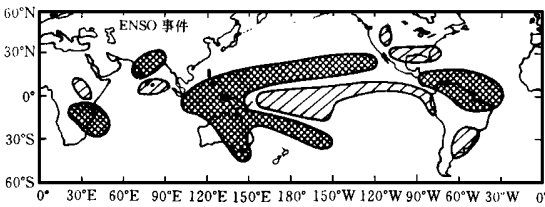


图 4 ENSO 暖位相的降水异常 (点区为干旱区, 斜线区为多雨区)

Fig. 4. Precipitation anomaly of ENSO warm phase (the dark points are dryregion, the oblique lines are rainy region)

70 年代, 我国气象科技工作者就发现赤道东太平洋地区的海温异常对我国长江流域的降水有显著相关。研究表明, ENSO 在不同位相对我国旱涝的影响明显不同。在 ENSO 暖位相时, 即赤道中东太平洋海表温度增暖时, 我国淮河流域多雨, 长江流域及其以南地区和黄河流域少雨; 在 ENSO 冷位相时相反<sup>[4,5]</sup> (图 5), 以长江中下游地区为例, 1957 年以来的各次 ENSO 爆发年, 除 1969 年以外, 降水量都明显偏少, 而在 ENSO 爆发后的下一年夏季, 该地区多雨的可能性较大, 如 1930 年、1953 年、

1979 年、1982 年和 1997 年当赤道中东太平洋增暖后的下一年, 1931 年、1954 年、1980 年、1983 年和 1998 年长江中下游都发生了特大暴雨。此外, 雨带的位置也与 ENSO 爆发的时间有关。若 ENSO 事件发生的较早, 出现在夏季之前, 则当年雨带位于长江与黄河之间。若 ENSO 爆发出现在夏季以后, 则第二年雨带主要位于长江流域及以南地区<sup>[6]</sup>。

西太平洋副热带高压的位置是影响我国夏季降水的重要因子之一。研究表明, 在 ENSO 暖位相时, 西太平洋暖池区对流活动减弱, 使夏季西太平洋副高位置偏南, 强度偏弱, 我国夏季主要雨带南移, 梅雨季节推迟。从 1951 ~ 1990 年的 40 多年间, 共有 20 次 ENSO 暖位相年或次年, 其中梅雨晚的有 17 年, 占 85%<sup>[7]</sup>; ENSO 冷位相年则相反。

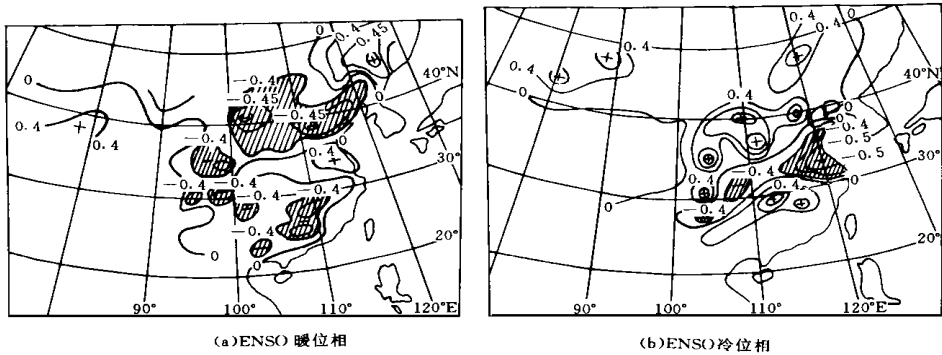


图5 赤道太平洋海温与我国汛期降水之间相关系数的分布<sup>[4]</sup>

Fig. 5. Distribution of relative coefficient between equatorial sea surface temperature and precipitation in China

### 3 中纬度海气相互作用研究

相对于热带海气相互作用研究, 中纬度海气相互作用研究进展相对缓慢。最近人们又开始认识到中纬度海洋在气候变化中的作用。至今, 发现中纬度在特定的海域和特定的季节海洋与大气有明显关系。计算表明中纬度海洋的两大强暖流——黑潮和湾流海区是全球海洋对大气加热量多的海域<sup>[8]</sup>。一些研究揭示了中纬度海洋对大气异常加热与大气环流之间有意义的时滞关系及对我国汛期旱涝的影响。Zhang<sup>[9]</sup>在分析我国历史上长江中下游几个暴雨年后指出, 该区暴雨出现在年初当鄂霍次克海海冰盛行, 而黑潮海表温度异常偏高, 海表温度呈“北凉南暖”型分布大约6个月后。陈烈庭等<sup>[10]</sup>的研究表明, 当前期秋冬季黑潮海温异常偏暖, 而亲潮区和热带西太平洋海温异常偏冷时, 有利于我国东部主要雨带在长江流域徘徊。

此外, 徐桂玉等<sup>[11]</sup>研究了太平洋海气热通量与长江流域降水及大气环流的遥相关, 指出了太平洋海气感热和潜热通量与后期长江流域降水存在显著相关, 其异常分布能造成长江流域降水不均。

### 4 海气耦合模式与 ENSO 可预报性

数值模拟是海气相互作用研究的主要手段。80年代以来, 关于海气系统年际变化的模式研究有了显著的进展。由于水文过程是非局地的, 为更好地了解全球水循环, 陆面过程的研究也越来越受到重视。现在全球海气耦合模式已成为模拟气候变化的主要工具, 并试图加进陆面过程。图6给出了耦合海洋-大气-陆地模式的几个主要组成部分, 以及各部分之间的相互作用。

在耦合模式较好地模拟出大气和海洋年平均气候态和季节变化的基础上, 可进一步进行气候异常的数值模拟。在 TOGA 期间, ENSO 数值研究的重大进展是用海气耦合模式成功地模拟了 ENSO 循环, 再现了年的和年际的海表温度的变化。Philander 等<sup>[13]</sup>用 GFDL 耦合模式, 以实测的 1982/1983 年 El Nino 风强迫海洋模式, 合理地再现了 1982/1983 年在 El Nino 事件的前期、成熟期和恢复期三个阶段。张荣华等<sup>[14]</sup>用带自由表面的太平洋环流模式与大气模式耦合, 较

好地模拟出 1988~1989 年太平洋海表温度异常。Zebiak<sup>[15]</sup> 的研究证明了模式模拟 ENSO 异常特征的能力, 指出海气热通量在控制与海表温度年际循环有关的变化上起着重要作用。Cubasch<sup>[16]</sup> 模拟降水对热带太平洋海温异常响应的结果表明, 在赤道中东太平洋增暖时, 这一地区的对流活动明显增强, 主要中心在日界线以东 160°W 附近, 西太平洋的对流活动则减弱。当赤道中东太平洋海温度冷时, 赤道中东太平洋大范围普遍对流活动减弱, 150°E 附近对流活动则加强。这两种情况分别与 ENSO 暖位相和冷位相的观测事实相一致。

TOGA 计划的一个关键成果是证明了海气耦合的热带太平洋上的 ENSO 在某种程度上至少提前一年以上是可预报的, 但是并没有证明 ENSO 是完全可预报的<sup>[17]</sup>。Cane 等<sup>[18]</sup> 早在 1986 年第一个用海气耦合模式做出了 ENSO 预报, 以 1981 年 1 月为初始场提前两年做出了 1983 年 1 月的 El Nino 海表温度距平, 与实况十分相近。在 1980~1992 年, 模式预报 ENSO 指数提前 6~12 个月的水平已超过持续预报<sup>[17]</sup>。自 1992 年以来, 为适应由于气候系统中振荡频率加快、强度变强的变化, 国内外均开展了对原 ENSO 预报模式的改进工作, 改进后的模式对预报 90 年代的 ENSO 事件取得了成功。例如, 钱维宏<sup>[19]</sup> 在 Zebiak 和 Cane<sup>[15]</sup> 的 ZC 模式中加进了一个 Hadley 环流异常, 相当于在模式中增加了一个 ENSO 循环的负反馈机制。改进的 ZC 模式以 1991 年 1 月海温异常为初始场很好地预报了 1991~1992 年 ENSO 事件中 Nino3 区海表温度的变化。

用海气耦合模式, 雨量的年际变化也存在着可预报性。1995 年 1 月欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 开始了一项季节预报试验的计划。用观测的海表温度, 从用该中心模式的九个不同集合成员做的非洲撒赫勒地区和印度 1987 年 6~8 月与 1988 年 6~8 月两年的季平均降水量预报来看, ECMWF 模式对这两个地区夏季降雨有较高的可预报性。Gadgil 等<sup>[20]</sup> 进行了季风降水的模拟和预报。美国 NMC 用耦合模式<sup>[21]</sup> 提供日常热带太平洋海表温度、全球降水和表面温度的预报。另外一些海洋-大气-陆地耦合模式开展了对降水、径流等陆面水文过程的模拟研究<sup>[22]</sup>。

## 5 CO<sub>2</sub> 与 ENSO

全球海洋总体上是大气 CO<sub>2</sub> 的汇, 每年约吸收大气中增加 CO<sub>2</sub> 的 40%~50%, 从而大大减缓了全球变暖的速度。赤道东太平洋是大气 CO<sub>2</sub> 的源区, 大气与海洋之间 CO<sub>2</sub> 的交换与海气界面上海洋和大气中 CO<sub>2</sub> 分压的差有关。观测表明热带太平洋表层总 CO<sub>2</sub> 对 ENSO 的响应十分敏感。Wong 等<sup>[23]</sup> 的观测资料显示在 ENSO 事件的第一年, 大气中 CO<sub>2</sub> 增长比正常要慢, 在 ENSO 的下一年, 大气中 CO<sub>2</sub> 急剧增长, 表明大气 CO<sub>2</sub> 浓度增长与太平洋海表温度的变化相关。观测与模式模拟均表明大气中 CO<sub>2</sub> 增加引起的全球变暖将进一步影响全球降水、径流的变化, 水循环加强, 极端降水事件的比例增加<sup>[24, 25, 26]</sup>。

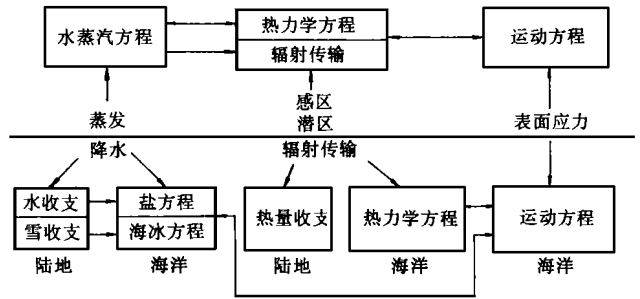


图6 海洋-大气-陆地耦合模式框图<sup>[12]</sup>

Fig. 6. Sketch of ocean-atmosphere-land model

## 6 未来展望

帮助、促进未来海气相互作用以及气候变化研究的国际组织是 CLIVAR (气候变率和可预报性计划) —GOALS (全球海洋-大气-陆地系统)。CLIVAR 是世界气候研究计划 (WCRP) 提出的气候变率及可预报性的新的十年计划。该计划总的科学目标是通过耦合气候系统模式的观测结果的收集与分析, 描述并了解与季、年、十年、百年尺度气候的变率及可预报性有关的物理过程; 通过发展全球海洋、大气、陆地系统 (GOALS) 耦合模式增大季到年气候预测的范围和准确性; 了解和预测与人类活动有关的气候变化等。为此要将研究范围从热带太平洋扩展到热带以外地区。

气候变化包括水循环。由于研究全球水循环的主要困难是水文过程是非线性的, 并且在空间和时间上有不同尺度。目前对区域水文预报研究发展的一个主要障碍是表面水文过程尺度与气候模式分辨率的不匹配。因此, 从全球水循环角度, 还需进一步加强以下几个方面的研究:

- (1) 改进影响水循环的物理、化学、生物及动力过程以及相互作用的了解, 需要更精确的观测数据。
- (2) 降低气候模式尺度、提高分辨率; 另一方面是将水循环过程尺度转移到模式的全球尺度上。
- (3) 加强陆面过程, 特别是各种参数化过程的研究, 以提高预报精度。
- (4) 加强水文学、气象学、海洋学及气候学科学家之间跨学科的合作与交流。

### 参考文献:

- [1] Chahine MT. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, 359: 373 ~ 380.
- [2] Reed R K. Heat fluxes over the eastern tropical pacific and aspects of the 1972 El Nino[J]. J Geophy Res, 1983, 14: 3627 ~ 3638.
- [3] Shukla J. Short term climate variability and prediction[C]. In Proc Second World Climate Conference, J Jager and H L Ferguson(eds). Cambridge University Press, 1991. 203 ~ 210.
- [4] 黄荣辉等, ENSO 对我国夏季气候变化的影响机制[C]. 1987 年美国学术会议文集, 1988. 125 ~ 137.
- [5] 章淹等. 1983 年长江流域的异常大雨与海洋异常[J]. 海洋学报, 1985, 7(1): 21 ~ 33.
- [6] 中国科学院大气物理研究所所长长期天气预报组. 太平洋海水温度对东亚大气环流和我国旱涝影响的若干事实[J]. 气候科技资料, 1973, (3): 14 ~ 23.
- [7] 赵振国. 我国汛期旱涝趋势预测进展[J], 气候预测研究. 1996, 84 ~ 93.
- [8] Hsiung J. Estimates of global oceanic meridional heat transport[J]. J Phys Oceanogr, 1985, 15(11): 1405 ~ 1413.
- [9] ZHANG Yan. The heavy rain fall in China in 1980 and a comparision with earlier extremes [M]. A Street Perrett et al (eds), Variations in the Global Water Budget, 1983. 253 ~ 264.
- [10] 陈烈庭, 吴广仁. 太平洋各区海温异常对中国东部夏季雨带类型的影响[J]. 大气科学, 1998, 22(5): 718 ~ 726.
- [11] 徐桂玉等. 太平洋海气热通量与长江流域降水及东亚 500hPa 环流遥相关[J]. 大气科学, 1994, 18(1): 89 ~ 94.
- [12] Manabe S R J Stouffer. Climate variability of a Coupled Ocea-Atmosphere-Land Surface

- Model: Implication for the Detection of Global warming[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(6): 1177 ~ 1185.
- [13] Philander S G H, A Dseigel. Simulation of El Nino of 1982- 1983, Coupled Ocean atmosphere model[J]. J C J. Nihoul Ed, Elsevier, Ocean Graphy Series, 1985, 40: 517 ~ 541.
- [14] 张荣华, 王万秋. 太平洋海表温度异常试验[J]. 海洋学报, 1991, 13: 179 ~ 191.
- [15] Zebiak S E, M A Cane. A model El Nino/Southern Oscillation[J]. Mon Wea Rev, 1987, 115: 2262 ~ 2278.
- [16] Cubasch U. The response of the ECMWF model to the El Nino anomaly in extended range prediction experiments[C]. Proceedings of the Eighth Annual Climate Diagnostics Workshop, 1983. 189 ~ 195.
- [17] Latif M A. Structure and predictability of the El Nino/Southern oscillation phenomenon in a coupled ocean-atmosphere general circulation model[J]. J Climate, 1993, 6: 700 ~ 708.
- [18] Cane M A, et al. Experimental forecasts of El Nino, Nature, 1986, 321: 827 ~ 832.
- [19] 钱维宏. ENSO 预报模式及其改进的进展[J]. 海洋学报, 1996, 13(3): 1 ~ 12.
- [20] Gadgil S, et al. Intra-seasonal variation and simulation of the indian summer monsoon[R]. In Simulation of Interannual and Interseasonal Monsoon Variability Report of Workshop. National Center for Atmospheric Research, Boulder, 1992.
- [21] Ji M, et al. A mutiseason climate forecast system at the National Meteorological Ceutor [R]. Bull Amer Meteor Soc, 1994, 75: 569 ~ 577.
- [22] Miller J R, G J Russeau. The impact of Global warming on River Runoff[J]. J Geophy Res, 1992, 97(D<sub>3</sub>): 2757 ~ 2764.
- [23] Wong C S, et al. Changes in equatorial CO<sub>2</sub> flux and new production estimated from CO<sub>2</sub> and nutrient levels in pacific surface waters during the 1986/87 El Nino. Tellus, 1993, 45B: 64 ~ 79.
- [24] Riud D. The Doubled CO<sub>2</sub> Climate and the sensitivity of the Modeled Hydrologic Cycle[J]. J Geophs Res, 1988, 93(D<sub>5</sub>): 5385 ~ 5412.
- [25] IPCC. Climate change. The IPCC Scientific Assessment Report[R], Cambridge University Press, 1990. 365 P.
- [26] IPCC. Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge University Press, 1996. 572 p.

## The Large-Scale Interaction between Ocean and Atmosphere and the Hydrological Cycle

XING Ru-nan

(Beijing Meteorological College, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The phenomena and process about the large-scale interaction between ocean and atmosphere and their impact on global hydrological cycle and climate are introduced. The principal issue of research in future is discussed brbriefly.

**Key words:** large-scale; interaction between ocean and atmosphere;  
hydrological cycle; ENSO