

李建平,任荣彩,齐义泉,等. 2013. 亚洲区域海—陆—气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 518–538.
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12322. Li Jianping, Ren Rongcai, Qi Yiquan, et al. 2013. Progress in air–land–sea interactions in Asia and their role in global and Asian climate change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 518–538.

亚洲区域海—陆—气相互作用对全球和 亚洲气候变化的作用研究进展

李建平¹ 任荣彩¹ 齐义泉² 王法明³ 陆日宇¹ 张培群⁴
江志红⁵ 段晚锁¹ 于非³ 杨永增⁶

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301

3 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

4 国家气候中心, 北京 100081

5 南京信息工程大学, 南京 210044

6 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

摘要 围绕全球变化研究国家重大研究计划项目“亚洲区域海—陆—气相互作用机理及其在全球变化中的作用”预定的总体研究内容和科学目标, 项目执行两年多以来, 取得了一系列阶段性科研成果。关于气候动力学方面, 项目揭示了热带印度洋—西太平洋暖池的海温变化是全球热带气候年代际变化的重要驱动力, 是全球尺度副热带干旱的重要调控器; 发现热带东太平洋海温存在冷舌模态, 它是一个海气耦合模态, 阐明在全球变暖背景下其对 ENSO 型态变异的作用及影响东亚气候的机理; 揭示了青藏高原热力强迫的异常特征及其气候效应; 提出了水平非均匀基流中行星波传播的理论, 研究了其在不同东亚夏季风背景下的传播特征。关于气候预测方法方面, 提出了若干有物理基础的气候预测方法, 如尺度分离的降尺度预测新方法、基于北大西洋涛动 (NAO)—ENSO 的东亚夏季风预测模型、基于南半球环状模的东亚气候预测模型等, 为业务部门提供了重要参考。关于观测方面, 项目在亚洲区域海气补充观测和海洋资料同化方面也取得突出进展, 成功进行了南海 18°N 断面海洋综合观测, 为形成我国第一条南海断面长期海气观测打下了基础。在国际合作方面, 项目还继续推动和领导了“亚洲季风年”(AMY2007-2012)与“东亚气候模拟”国际计划, 提升了我国在该领域的国际地位。

关键词 海—陆—气相互作用 年代际气候变化 东亚季风 热带印度洋—西太平洋暖池 气候预测 ENSO

文章编号 1006-9895(2013)02-0518-21

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12322

Progress in Air–Land–Sea Interactions in Asia and Their Role in Global and Asian Climate Change

LI Jianping¹, REN Rongcai¹, QI Yiquan², WANG Faming³, LU Riyu¹, ZHANG Peiqun⁴,
JIANG Zhihong⁵, DUAN Wansuo¹, YU Fei³, and YANG Yongzeng⁶

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology (SCSIO), Chinese Academy of Sciences (CAS),

收稿日期 2012-11-21, 2012-11-28 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950400, 国家自然科学基金重点项目 41030961

作者简介 李建平, 男, 1969 年出生, 博士, 研究员, 主要从事气候动力学与可预报性、季风、环状模及其影响等方面的研究。E-mail: ljp@lasg.iap.ac.cn

通讯作者 任荣彩, E-mail: rrc@lasg.iap.ac.cn

Guangzhou 510301

3 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071

4 National Climate Center (NCC), Beijing 100081

5 Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST), Nanjing 210044

6 The First Institute of Oceanology, State Oceanic Administration, Qingdao 266061

Abstract The National Key Research Program on Global Change Study, “Air–Land–Sea (ALS) interactions in Asia and their role in the global climate change” was implemented in 2010. The ALS project team has achieved many of the program’s scientific objectives in various fields. In the field of climatic dynamics, we found that the variations of sea surface temperature (SST) over the Indo-western Pacific warm pool are a vital driver for the interdecadal variability of the global tropical climate and an important modulator of global-scale subtropical droughts. We found an air–sea coupled cold-tongue SST mode in the eastern tropical Pacific and demonstrated the important role of this mode in the formation of different types of El Niño–Southern Oscillation (ENSO) patterns. Furthermore, we illustrated the mechanisms involved in these patterns and their different influences on the East Asian climate. The characteristics of the thermal forcing anomalies over the Tibetan Plateau and their possible climatic effects are explored. In addition, we proposed a new theory of planetary waves in non-uniform basic flow, and performed preliminarily analysis of its features under different conditions of the East Asian summer monsoon. In the field of climate prediction methods, we developed several physically-based statistical prediction techniques or models, such as the new approach of time-scale decomposition downscaling, an empirical North Atlantic Oscillation–ENSO-based seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon, and an empirical Southern Hemisphere Annular Mode-based East Asian climate prediction model. The good performances of these prediction models provide important references for the relevant project operational divisions. From the observational and data assimilation aspect, our achievements include the integrated ocean observation along the 18°N cross-section in the South China Sea, which laid the foundation for the formation of China’s first long-term cross-section observation in the South China Sea. As for relevant international cooperation, the ALS project also continues to promote the leadership of the international programs of “Asian Monsoon Years (AMY 2007–2012)” and “East Asian Climate Modeling,” which would enhance the international status of China in related fields.

Keywords Air–land–sea interaction, Interdecadal climate variability, East Asian monsoon, Indo-western Pacific warm pool (IPWP), Climate prediction, ENSO

1 引言

海洋、陆地和大气是气候系统五大圈层的重要组成部分，海—陆—气相互作用是气候变化的重要驱动力（吴国雄和李建平，2005）。亚洲海陆地形非常复杂，西有世界最高的高原——青藏高原，东临世界最大的大洋——太平洋，南临印度洋，因此亚洲区域海—陆—气相互作用过程更为复杂，是影响东亚气候异常的关键物理过程，同时其对全球变化也有重要作用。然而，由于对亚洲区域海—陆—气相互作用过程和机理认识的不足，当今世界各国气候模式在亚洲季风区的模拟和预测能力均较低，这直接制约了迄今各国的气候预测水平的提高（吴国雄等，2006；李建平等，2011a，2011b）。因此，在全球变化背景下，研究亚洲区域海—陆—气相互作用的机理及其影响，是理解气候异常机理、妥善应对全球变化、提高气候预测水平的关键途径。

正因为如此，最新的一些国际计划把目标集中

在亚洲区域的海—陆—气相互作用上，比如 2006 年开始实施的地球系统科学联盟（ESSP）框架下的季风亚洲区域集成研究计划（MAIRS）（符淙斌，2007），以及 2007 年开始的 CLIVAR/GEWEX 交叉子计划亚洲季风年国际计划（AMY 2007–2012）（Wang et al., 2010; Matsumoto et al., 2010），后者的主要目的即是，通过对亚洲区域海洋—陆地—大气之间的相互作用进行综合观测，在此基础上开展数值模式参数化改进、亚洲季风区海洋和大气资料同化分析及季节—年际尺度气候异常的可预报性研究，从而为提高预测水平及防灾减灾服务。由此可见，亚洲区域海—陆—气相互作用已经成为当今全球变化研究的前沿科学问题（WCRP, 2010a, 2010b）。

我国位于亚洲季风区，大范围、持续性的气候异常直接受到亚洲区域海—陆—气相互作用的影响（吴国雄等，2006；李崇银等，2009；黄荣辉等，2011），如在东亚—西太平洋区域中西北太平洋热带和副热带流涡、黑潮等太平洋西边界流的巨大经

向热量输送对东亚气候变化有重要影响, 西北太平洋副热带高压异常与我国大范围持续性旱涝异常也密切相关等。同时, 该区域的海气相互作用异常更是直接影响着ENSO和西北太平洋台风活动的变异。又如, 在东亚—印度洋区域, 印度洋海气耦合模态与季风环流有关, 云、辐射和海温反馈过程异常激烈, 使影响海温变化的动力过程变得复杂。而处于青藏高原、印度洋、西太平洋暖池强烈的海陆热力对比背景下的海气相互作用过程, 更是直接影响着亚洲夏季风的爆发及其各种时间尺度的异常变化。另外, 以东印度洋—西太平洋暖池区、赤道海洋斜温层、Walker环流、Hadley环流等为背景, 海气相互作用、海—陆—气相互作用把ENSO与亚澳季风系统的对流层准两年振荡(TBO)活动中心紧密地联系在一起, 调节着亚洲季风区的能量和水汽输送; 印度洋—西太平洋(印太)区域海气耦合系统的年际、年代际振荡直接影响着季风和我国旱涝的异常(吴国雄和李建平, 2005; 李建平等, 2011a, 2011b)。

综上所述, 亚洲区域的海—陆—气相互作用过程更为复杂和重要, 对全球变化及我国气候异常有重要作用, 是国际和国内关注的前沿科学问题之一, 因此, 研究亚洲区域海—陆—气相互作用及其对全球变化的作用, 具有重要的科学意义。同时,对该问题的研究也符合国家防灾减灾、保证国民经济可持续发展的需求。我国气候从年际到年代际时间尺度的异常, 与海—陆—气相互作用过程密切关联, 对其演变规律的把握, 可直接为我国年际尺度气候预测水平的提高提供科学依据。

我国已立项的大型研究计划“中国西部环境和生态科学计划”(丁仲礼等, 2010; 冷疏影等, 2011)、“全球变化及其区域响应”、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“北方干旱化与人类适应”(符淙斌等, 2006)、“全球变暖背景下东亚能量和水分循环变异及其对我国极端气候的影响”等, 从陆气相互作用的角度去揭示气候变化规律。而国家973计划项目“亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响”(李建平等, 2011a, 2011b)、“北太平洋副热带环流变异及其对我国近海动力环境的影响”(吴立新等, 2007)等, 主要关注海气相互作用过程的影响。2010年立项的全球变化研究国家重大研究计划项目“亚洲区域海—陆—气相互作用机理及其在全球变化中的作用”, 将海—陆—气圈层相互作用作为一个整体, 并以亚

洲区域的印太暖池和青藏高原为主体, 拟系统揭示亚洲区域海—陆—气相互作用过程和机理, 其年代际变化的规律, 以及其对全球尺度的气温和旱涝异常影响的过程和机理, 对东亚季风和旱涝异常的影响过程, 从而达到完善亚洲海—陆—气相互作用影响我国气候异常的理论框架和东亚季风年际预测理论和方法。本文总结了项目执行两年来研究的部分成果。

2 项目的关键科学问题及研究目标

2.1 关键科学问题及研究内容

项目下设“亚洲区域海—陆—气相互作用过程与机理”、“亚洲区域海—陆—气相互作用对全球变化的影响及其可预报性”、“亚洲区域海—陆—气相互作用对东亚季风的调控机理”、以及“亚洲区域海—陆—气耦合系统模拟及预测理论”等四个研究课题, 拟解决的关键科学问题包括:

- (1) 规律与机理: 以印太暖池和青藏高原为主体的亚洲区域海—陆—气相互作用的时空特征、年代际变化规律及机理;
- (2) 全球尺度影响: 上述海—陆—气相互作用影响全球变化(旱涝、气温异常)的关键过程和关键因子;
- (3) 区域影响: 上述海—陆—气相互作用的年代际变化影响东亚季风异常的机制;
- (4) 可预报性: 理解模式模拟的不确定性, 认识上述海—陆—气相互作用年代际变化对全球变化影响的可预报性。

围绕上述关键科学问题, 拟开展的主要研究内容包括:

- (1) 亚洲区域海—陆—气相互作用过程与机理: 重点研究以印太暖池和青藏高原为主体的海—陆—气相互作用的年代际时空特征, 阐明其年代际变化规律与机理。
- (2) 亚洲区域海—陆—气相互作用对全球变化的影响及其可预报性: 研究印太暖池海气相互作用和海陆调控背景下青藏高原大尺度陆气相互作用的年代际变化对全球尺度的旱涝和气温异常的影响, 揭示其中的海—陆—气过程和机理, 探讨全球气候变化中亚洲区域海—陆—气相互作用影响的可预报性。
- (3) 亚洲区域海—陆—气相互作用对东亚季风的调控机理: 研究亚洲区域海—陆—气相互作用的

年代际变化对东亚气候的调控机理, 东亚季风对全球气候变化的响应, 完善上述影响过程的理论框架。

(4) 亚洲区域海—陆—气耦合系统模拟及预测理论: 研究亚洲区域海—陆—气耦合过程影响全球变化的数值模拟, 理解现有模式对未来年代际气候变化预测的不确定性, 探讨海洋浪—潮—流耦合过程对亚洲季风模拟的影响, 提出年代际背景下相应的东亚季风年际异常预测的理论和方法。

(5) 相关区域的海气过程补充观测和资料同化: 通过在亚洲季风区海气相互作用的相关区域进行断面、潜标等补充观测, 拓展参与单位现有的观测布局, 获取该区域关键断面上的上层海洋温盐、流场以及海表通量资料, 并结合历史资料, 进行资料同化研究, 构建亚洲区域高分辨率的长时间序列的海洋再分析资料, 为上述研究内容提供必要的资料基础。

2.2 总体科学目标

系统揭示以印太暖池和青藏高原为主体的亚洲区域海—陆—气相互作用的时空特征、年代际变化规律及其机理, 阐明上述海—陆—气相互作用的年代际异常对全球尺度的气温和旱涝异常影响的过程和机理, 完善其影响东亚季风、旱涝的理论框架, 从海—陆—气相互作用的角度解释现有模式对气候变化模拟的不确定性, 揭示亚洲区域海—陆—气相互作用对全球变化及东亚季风影响的可预报性, 提出年代际背景下相应的东亚季风年际预测理论和方法。

项目的整体研究框架如图 1 所示。

3 主要科研进展

3.1 阐明了亚洲区域海—陆—气过程是全球热带大气环流年代际变化的主要驱动力

(1) 揭示了 Hadley 环流存在年代际变化主模态, 印太暖池海温年代际非均匀增暖是该模态的重要驱动力, 同时也是全球尺度副热带干旱的重要调控器; ENSO 是 Hadley 环流年际变化的重要驱动因子。

Hadley 环流是大气环流系统中最重要的成员之一, 对全球和区域气候有重要影响。然而, 对于 Hadley 环流变化的驱动因子目前认识还不统一, 有的研究认为是由热带中东太平洋海温所驱动, 有的研究认为是热带印度洋海温所驱动 (Diaz and

Bradley, 2004), 因此, 关于 Hadley 环流年代际变化的驱动因子是什么? Hadley 环流年代际变化的全球影响如何? 等问题还需要从新的角度来研究。新近研究发现, 冬夏 Hadley 环流变率存在两个主导模态: 关于赤道的非对称模态和对称模态, 其中 Hadley 环流变率的非对称模态表现为年代际尺度变化, 与印太暖池海温变化密切相关; Hadley 环流变率的对称模态主要表现为年际尺度变化, 与 ENSO 的变化密不可分 (马杰和李建平, 2007; Ma and Li, 2008; Feng et al., 2011a; 冯然等, 2011; Feng et al., 2012; Li and Feng, 2013; Feng and Li, 2013)。Hadley 环流的非对称模态在冬季表现出年代际增强的趋势, 在夏季则是年代际减弱, 且在 1970 年代发生了显著的年代际转型 (Feng et al., 2011a)。进一步研究发现 Hadley 环流的这种年代际变化主要是印太暖池海温年代际非均匀增暖引起的大尺度经向海温梯度年代际变化的结果 (Li and Feng, 2013)。此外, 不仅在冬夏, 在其他季节, 印太暖池海温的年代际变化也是 Hadley 环流非对称模态年代际变化的主因 (Feng et al., 2013)。

为了进一步揭示热带海温对 Hadley 环流变率的非对称和准对称模态及其相应时间尺度变化的影响, 设计了相应的数值试验。发现, 印太暖池海温的作用主要是造成 Hadley 环流变率的关于赤道非对称模态及其年代际变化, 而热带中东太平洋海温的作用主要是造成 Hadley 环流的准对称模态及其年际变化 (Li and Feng, 2013)。

印太暖池海温对热带—副热带气候年代际变化的调控机理可归纳如下 (图 2): 北半球冬季当印太暖池异常偏暖时, 因最大的增暖中心位于南半球 ($5^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{S}$ 之间), 非均匀增暖的海温经向梯度使得在增暖中心附近形成异常辐合上升, 异常下沉分别处于南、北半球 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 纬度范围内, 结果使冬季 Hadley 环流主体加强 (图 2a); 在北半球夏季时, 由于印太暖池的增暖结构与冬季类似, 由于经向海温梯度的作用, 异常经圈环流的下沉支分别位于 30°S 与 20°N 附近, 位于北半球的异常下沉支抵消了 Hadley 环流位于 20°N 附近上升支的强度, 结果使夏季 Hadley 环流主体减弱 (图 2b)。由于近几十年, 印太暖池表现出显著的增暖趋势, 显著改变了 Hadley 环流的结构, 结果在南、北半球的副热带地区异常下沉加强, 降水均表现出显著的减少趋势 (图 2c, d)。这表明, 印太暖池可以通过影响全球

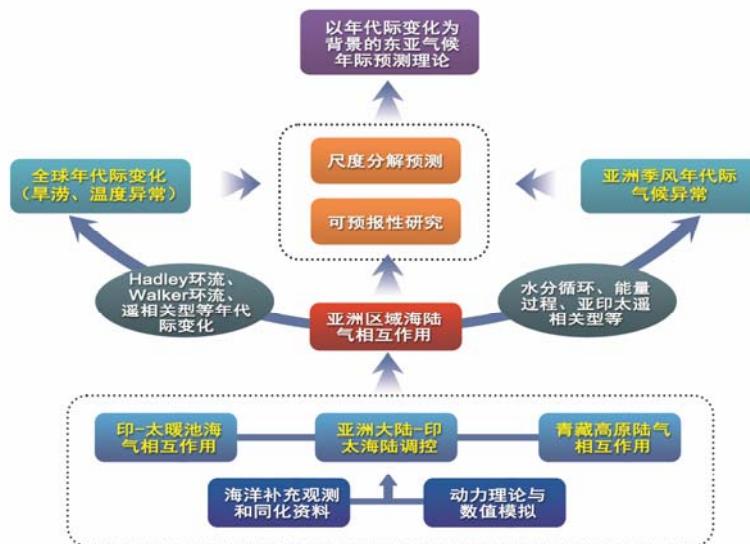


图 1 海—陆—气 973 项目的整体研究框架

Fig. 1 The research frame of the "973" project of air-land-sea (ALS) interaction

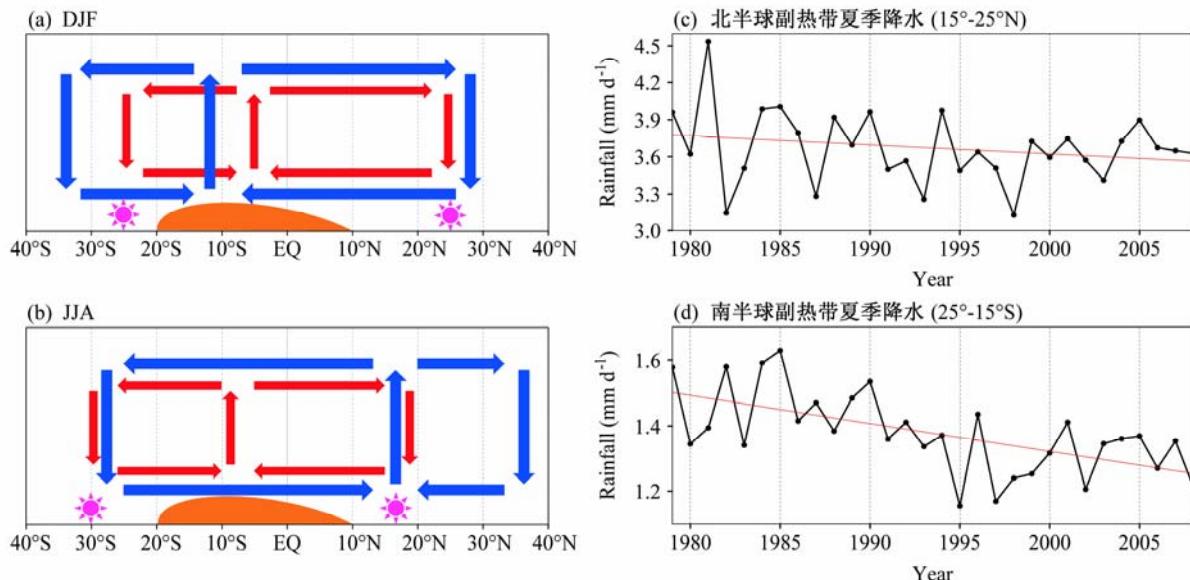


图 2 印太暖池海温非均匀增暖引起南海海温梯度，影响 Hadley 环流以及全球副热带降水机制示意图。印太暖池海温非均匀增暖对应的 (a) 冬季、(b) 夏季 Hadley 环流的异常分布示意图（蓝色箭头表示气候 Hadley 环流，红色箭头表示印太暖池海温非均匀增暖所激发的异常经向环流分布，橘黄色表示印太暖池 20°S~20°N 之间海温非均匀增暖，紫色太阳表示相应地区易出现干旱）。(c) 北半球副热带 (15°N~25°N)、(d) 南半球副热带 (25°S~15°S) 夏季降水序列（图中的红色直线为线性趋势，单位：mm/d）。（图 (a) 和 (b) 引自 Li and Feng, 2013）

Fig. 2 Schematic diagram showing the meridional circulation anomalies ((a) and (b)) associated with the meridional gradient of the inhomogeneous warming of SST over the Indo-Pacific warm pool (IPWP) and associated global subtropical rainfall ((c) and (d)). (a) Boreal winter (DJF); (b) boreal summer (JJA). Blue arrows represent the climatological mean Hadley cell, and red arrows indicate the anomalous meridional circulation associated with the variations of SST over the IPWP. The orange shape between 20°S and 20°N indicates the inhomogeneous warming within the IPWP, and the magenta suns indicate more frequent drought over these regions. Time series of the zonal mean JJA rainfall averaged over (c) 15°N~25°N, (d) 25°S~15°S. ((a) and (b) from Li and Feng, 2013)

热带大气环流，对全球副热带地区的降水异常产生重要影响 (Li and Feng, 2013; Feng et al., 2013)。

(2) 热带东太平洋海表温度变化的冷舌模态、其长期增强与 ENSO 型态变异及其不同影响

利用不同的海表温度资料和耦合模式 (CMIP3)

模拟的结果分析表明，在热带太平洋海温变化中存在太平洋冷舌模态，它是热带太平洋海表温度变化的第二模态，表现为太平洋冷舌区的海表温度异常与热带太平洋其他地区海表温度异常的变率之间的反位相关系。当冷舌模态为正位相时，太平洋冷

舌区为冷海温异常, 热带及副热带太平洋的其他地区为暖海温异常 (Zhang et al., 2010)。研究表明, 冷舌模态的长期变率表现为显著的增强, 即热带太平洋冷舌表现为长期变冷。冷舌变冷信号同时也反映在大气场和次表层海温场上, 是一个海气耦合模态, 是热带东太平洋上翻流—热带太平洋大尺度东西海表温度梯度—低层经向风之间正反馈过程的结果 (图 3)。分析 IPCC 第 4 次评估报告 (AR4) 中耦合模式模拟的结果表明, 该冷舌变冷模态与全球变暖关系密切, 很可能是由全球增暖所导致的, 这一结论与在全球增暖背景下考虑海洋动力过程的理论相一致 (Zhang et al., 2010)。同时, 冷舌模态长期增强与赤道海表温度的东西梯度的增强关系密切, 对 ENSO 的型态格局产生重大影响, 是最近几十年里频繁出现的暖池型 (WP) El Niño (或称中部型 El Niño, El Niño Modoki 事件, 或日际线型 El Niño 等) 的重要原因之一。因此, 在全球变暖背景下, 赤道中东太平洋海温型既不是 El Niño-like 型, 也不是 La Niña-like 型, 而是 WP 型 El Niño

Niño。这个结果进一步被一个简单海气模式在不同信风、温跃层的气候背景下的试验所证实。在无全球变暖背景下, 冷舌模态表现为年际尺度的变化。

两类 El Niño 海温型对我国降水影响显著不同。经典型 El Niño 又称为东部型 El Niño 或者冷舌型 (CT) El Niño。在夏、冬季节, 两类 ENSO 相关的全球遥相关型不一致 (Weng et al., 2007, 2009; Feng et al., 2010; Feng et al., 2011b), 从而有不同的气候影响。两类 ENSO 对应的华南春雨有完全相反异常型 (Feng and Li, 2011), 经典的或称东部型 El Niño 对应华南春季多雨, 而 WP 型 El Niño 对应华南春季少雨, 这是由于大气 Rossby 波对这两类 El Niño 事件截然不同响应的结果。两类 ENSO 对华南秋季降水也有完全相反的影响 (Zhang et al., 2011), 观测和数值试验研究指出 ENSO 纬向位置的变异是 1990 年代华南发生年代际变干的主要原因之一, 这一类似现象也出现在美国西南部 (Zhang et al., 2012)。图 4 给出了两类 ENSO 事件影响我国华南地区降水的物理概念模型。两类 ENSO 事件对夏季

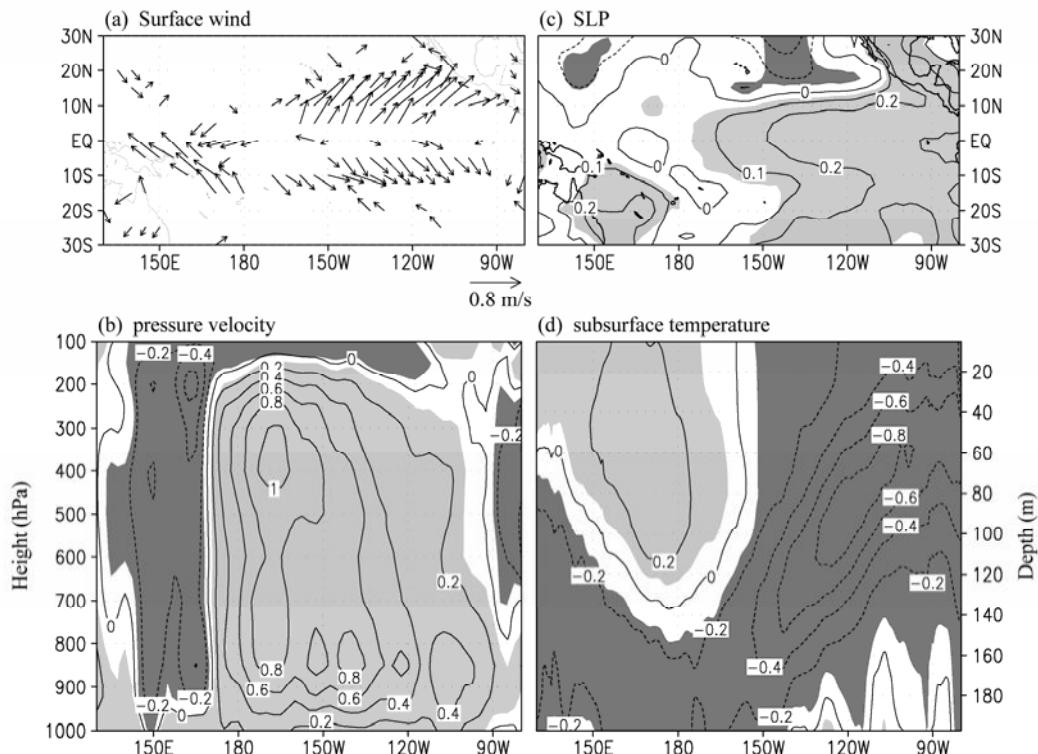


图 3 基于冷舌模态指数 (热带太平洋 SST 变率第 2 模态时间系数) 回归的 (a) 表面风、(b) 垂直速度 (单位: 10^{-2} Pa/s)、(c) 海平面气压 (单位: hPa) 和 (d) 次表层温度 (单位: $^{\circ}$ C) 的异常分布。(a) 中的矢量达到 95% 置信度水平, 其他图中的阴影为达到 95% 置信水平区域。(引自 Zhang et al., 2010)

Fig. 3 Anomalies of (a) surface wind (m/s), (b) pressure velocity (mean from 5°S to 5°N; 10^{-2} Pa/s), (c) Sea Level Pressure (SLP) (hPa), and (d) subsurface temperature (mean from 5°S to 5°N; $^{\circ}$ C) regressed upon the cold tongue mode (CTM) index which is the normalized PC2 time series of the HadISST SSTA in 1948–2007. Shading indicates the correlation coefficients exceeding 95% confidence level. Only vectors in (a) that are statistically significant at the 95% confidence level are shown. (Zhang et al., 2010)

我国长江流域及华南降水有反对称的影响 (Muhammad et al., 2013)。在春季, WP 型 El Niño 海表温度呈现赤道不对称的特点, 其对 Hadley 环流的不对称模式的年际变化有影响 (Feng and Li, 2013)。对于平流层, 两类 El Niño 的影响也显著不同, 典型 (或称东部型 EP) El Niño 事件会使北半球极涡减弱和变暖, 使南半球极涡增强和变冷; 而 WP 型 El Niño 事件使北半球极涡增强和变冷, 使南半球极涡减弱和变暖 (Xie et al., 2012)。此外, 为了很好的描述 WP 型和 CT 型 El Niño 的变化, Ren and Jin (2011) 还发展了一套新的指数, 这套新指数已被美国国家海洋大气局采纳, 用于热带太平洋两类 ENSO 信号的实时监测业务。

(3) 热带印度洋海盆的年代际增暖与 ENSO 事件持续时间的年代际变化密切关联

印度洋海盆尺度海温的年际变化滞后于 ENSO 1~2 个季节, 最大变率在春季; 多年以来, 印度洋海温有显著的长期增暖趋势。然而, 印度洋海温增暖还具有显著的年代际变化特征, 其中 1940 年代至 2000 年代的年代际增暖最为显著, 且最大增暖出现在夏季月份; 造成这种夏季最大增暖的原因是, 1970 年代前后 ENSO 事件的持续时间发生了显著的年代

际变化, 亦即 ENSO 暖事件的持续时间发生了显著的年代际延长, 导致 ENSO 在印度洋的增暖效应从春季持续到了夏季, 从而对印度洋海盆海温的年代际增暖有贡献 (图 5)。统计表明, ENSO 事件对此年代际增暖的贡献幅度可达实际增暖强度的约 1/4 (Li et al., 2012)。

(4) ENSO 及热带火山爆发影响平流层环流的年际—年代际异常

作为大气—海洋系统中最强的年际变化信号, ENSO 不仅影响对流层环流的异常, 也会影响平流层水汽的异常。具体地, ENSO 对北半球热带外环流的显著影响表现为 3~5 年时间尺度上的滞后影响, 亦即, 热带外环流对 ENSO 的最强响应并非出现在 ENSO 峰值的当年冬季而是出现在下一年的冬季, ENSO 可激发平流层质量环流的年际尺度异常

(Ren et al., 2012; 任荣彩, 2012; 任荣彩和向纯怡, 2010; Ren, 2012)。El Niño 事件可增加热带平流层低层的水汽却使平流层中层的水汽减少, La Niña 活动会使赤道附近的平流层低层变得更干燥, 但会使热带平流层内的水汽增加 (Xie et al., 2011)。由于热带准两年振荡的影响, 经典型 ENSO 与 WP 型 ENSO 对平流层环流的影响趋于相反 (Xie et al.,

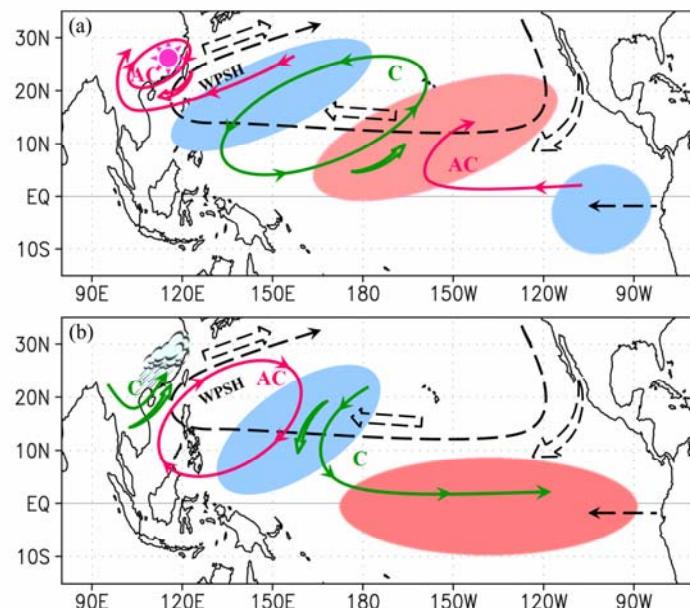


图 4 两类 ENSO 事件影响我国华南过渡季节降水的物理概念示意图。(a) El Niño Modoki; (b) 经典 El Niño。红色阴影表示暖海温, 蓝色阴影表示冷海温。WPSH 为西太平洋副热带高压, 虚线代表气候平均环流, 实线表示异常的环流, 箭头表示风向。“C” 和 “AC” 分别表示气旋和反气旋异常。(引自 Feng and Li, 2011)

Fig. 4 Schematic diagrams showing the circulation anomalies and rainfall over South China in transition seasons (spring and autumn) associated with (a) El Niño Modoki and (b) El Niño. Red/blue shaded areas indicate positive/negative SSTAs. WPSH: western Pacific subtropical high. Dashed lines represent the climatological mean circulation. Solid lines indicate anomalous circulation, and heavy arrows represent anomalous wind directions. “C” and “AC” indicate cyclonic and anticyclonic circulation anomalies, respectively. (From Feng and Li, 2011)

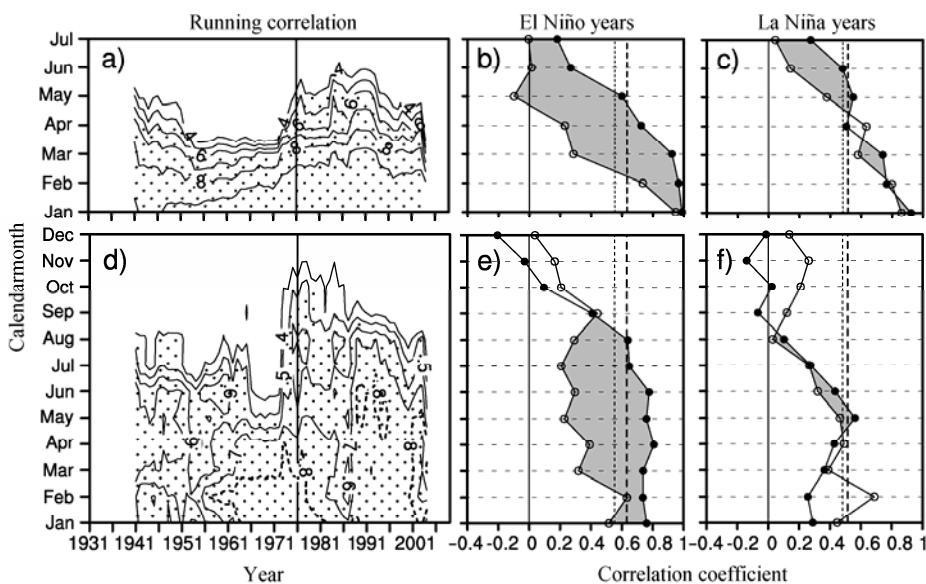


图 5 冬季 (NDJ) Niño3 指数与随后逐月 (a) Niño3 指数和 (d) 印度洋海盆海温指数的 21 年滑动相关; ENSO 暖事件 (b, e) 和 ENSO 冷事件 (c, f) 的 Niño3 指数滞后自相关 (b, c) 和其与印度洋海盆海温指数的滞后交叉相关 (e, f)。图 a 和 d 中竖线标出了年代际转折的年份; 图 b, c, e 和 f 中的空心和实心廓线分别代表 1970 年代前和 1970 年代后的滞后相关分布, 虚线标出了 95% 信度的统计显著水平。(引自 Li et al., 2012)

Fig. 5 Twenty-one-year running lagged auto-correlation between the Niño3 in winter (NDJ) and that in each month of the following year as a function of year and calendar month (a), the lagged auto-correlation as a function of calendar month for El Niño years (NDJ Niño3 positive) (b) and for La Niña years (NDJ Niño3 negative) (c) respectively during 1946–1976 (circled) and during 1977–2002 (dotted). The areas between the circled and dotted curves in (b–c) are shaded. (d–f) is similar as (a–c) but for the running lagged cross-correlation between Niño3 in winter (NDJ) and the Indian Ocean Basin index (IOBI) in each month of the following year. Dotted areas mark the 95% confidence level for the correlation in (a) and (d) and the vertical line marks the significant change year. Thinner/thicker dashed lines in (b–c) and (e–f) mark the 95% confidence levels of the respective correlation in 1946–1976/1977–2002. (From Li et al., 2012)

2012)。

火山效应是影响平流层环流年代际及年代际变化的另一因子。研究发现, 20 世纪 90 年代平流层温度的年代际变冷, 与 1991 年 6 月爆发的皮纳图博强火山的持续辐射效应密切相关, 强火山爆发可能导致平流层温度的年代际变化(肖栋和李建平, 2011), 其中影响的过程示意见图 6。

(5) 西北太平洋台风活动的年代际变化机理

西太平洋暖池热状态对西北太平洋台风的移动路径有重要影响(黄荣辉和王磊, 2010; Huang and Huang, 2011)。研究发现, 当西太平洋暖池海表温度偏暖时, 西北太平洋台风的移动路径易偏西、偏北, 影响我国的台风个数偏多; 相反, 当西太平洋暖池海表温度偏冷时, 西北太平洋台风的移动路径则易偏东、偏南, 易在 130°E 以东的地区转向, 进而多影响日本, 影响我国的台风明显偏少(黄荣辉和王磊, 2010)。这种情况与东亚—太平洋(EAP)型或太平洋北美型(PJ)遥相关、西太地区季风槽的位置以及西北太平洋副热带高压的位置不同有密切的关系。在全球变暖的背景下, 耦合模式比较计划(CIMP3)的模拟预估结果显示 EAP 遥相关型

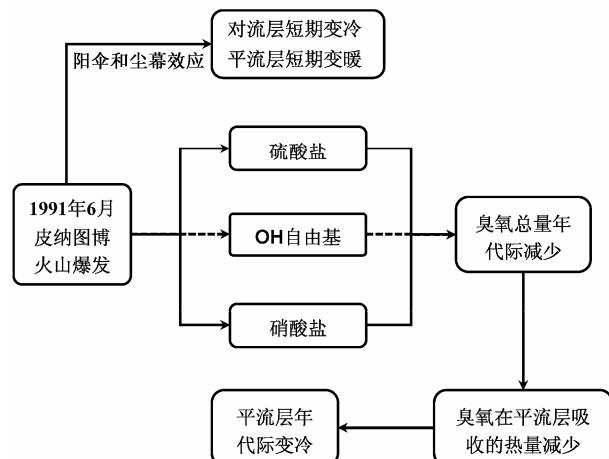


图 6 皮纳图博火山爆发影响 20 世纪 90 年代平流层年代际变冷的机制示意图。虚线表示可能存在的臭氧耗损机制。(引自肖栋和李建平, 2011)

Fig. 6 Schematic chart showing the possible mechanism of stratospheric decadal cooling in the early 1990s associated with the Pinatubo Eruption in 1991. The dashed lines indicate the possible existence of chemical processes. (From Xiao and Li, 2011)

的强度有减弱的趋势, 这预示着 21 世纪登陆我国的台风路径可能有呈现偏南的趋势(黄荣辉和王磊, 2010)。

(6) 春季北大西洋涛动 (NAO) 的调节作用造成 ENSO 与东亚夏季风联系年代际增强的机理

研究表明, 自 1970 年代末以来, 东亚夏季风与 ENSO 之间的联系表现出年代际增强 (Li et al., 2010; Ding et al., 2010a), 而春季 NAO 可能对这种联系的年代际增强起着重要调制作用 (Wu et al., 2009a, 2012e)。春季 NAO 指数与东亚夏季风指数呈现显著负相关关系, 即当春季 NAO 偏强 (偏弱) 时, 东亚夏季风偏弱 (偏强), 长江中下游地区夏季降水偏多 (偏少)。春季 NAO 常常可激发出北大西洋三极子型海表温度异常模态, 该三极子模态能从春季持续到夏季。观测与数值模拟表明, 夏季北大西洋三极子海温异常能进一步激发南、北两支大气遥相关型, 即在北边中高纬地区为大西洋—欧亚遥相关型 (AEA)、在南边位于欧亚大陆南部热带地区的 Gill-Matsuno 型的响应 (Wu et al., 2009a, 2012e)。前者调制着位于乌拉尔山和鄂霍次克海地区的阻塞高压, 后者增强了西太平洋副热带高压与 ENSO 的联系。在两者共同作用下, 梅雨锋增强或减弱, 东亚夏季风减弱或增强, 长江领域梅雨呈现增强或者减弱的趋势。图 7 给出了春季 NAO 调节 ENSO 与东亚夏季风联系年代际增强的物理过程示意图。这些结果说明春季 NAO 信号有助于提高东亚夏季旱涝的季节预测能力。

另外, 进一步的分析还表明 AEA 遥相关型是连接北大西洋与东亚气候的关键纽带之一, 可以为东亚气候预测提供前期信号, 需要在实践中引起重视。

(7) 水平非均匀基流中行星波的传播理论

提出了水平非均匀基流中定常和非定常波动的传播理论 (李艳杰和李建平, 2012), 克服了已有行星波传播理论多以纬向对称基流为主、无法解释东西风带之间相互作用的不足。结果表明经向基流可使定常波穿越东风带, 在南北两半球间传播, 为东西风带之间的相互作用、南北半球相互作用提供了理论解释, 是研究遥相关波列、大气 Rossby 波对热源强迫适应的一个基本理论工具 (徐寒列等, 2012; Li et al., 2013)。利用新的行星波传播理论, 研究了在不同东亚夏季风背景下相关行星波的传播特征, 指出夏季存在北印度洋—西太平洋对流涛动 (IPCO) (Li et al., 2013), 这是链接西北太平洋与北印度洋气候的重要纽带, 与之相联系的是亚印太遥相关型 (IAP) (李建平等, 2011a) 和东亚

—太平洋遥相关型 (EAP) (Huang and Li, 1987; 黄荣辉和李维京, 1988; Huang, 2004; 黄荣辉等, 2010) 或太平洋—日本 (PJ) 遥相关型 (Nitta, 1987), 因此, IPCO 与东亚夏季风变化存在紧密的联系。

此外, 探讨了 NAO 影响其下游中高纬地区的新机制。与 NAO 相联系的准定常波列有两类, 一类是经向传播型, 其可以激发出在亚非副热带急流中传播的准定常波列, 影响 NAO 下游的副热带地区; 另一类则是纬向传播型, 其传播路径为欧亚大陆的中高纬地区, 影响 NAO 下游的中高纬度地区 (Song et al., 2011)。冬季 NAO 与中国西南地区降水存在不对称关系, 即当冬季 NAO 处于负位相时, 中国西南地区冬季降水显著减少。这种不对称关系是由于冬季 NAO 对里海和中东—阿拉伯海—青藏高原及其下游的遥相关波列 (CAT 遥相关型) 的不对称影响的结果 (徐寒列等, 2012)。

3.2 揭示了青藏高原热力强迫的异常特征及其气候效应

(1) 青藏高原和局地海气相互作用影响孟加拉湾 (BOB) 夏季风爆发的机理

亚洲夏季风爆发最早是在 BOB 最南端赤道印度洋地区 (Li and Zhang, 2009; Zhang and Li, 2008)。基于海—陆—气相互作用的观点, Wu et al. (2012a) 研究了 BOB 夏季风爆发涡旋 (BOBMOV) 的触发机制以及爆发涡旋发生、发展、消亡过程中的相关局地海—陆—气相互作用物理过程, 阐明了青藏高原—北印度洋和亚洲热带地区春季强烈的海—陆—气相互作用是激发 BOBMOV 发生及亚洲夏季风爆发的重要原因之一。在春季, 青藏高原的强迫作用使印度地区对流层低层盛行干冷的偏北风, 在表面感热加热的作用下, 印度次大陆上空形成陆面气旋。在赤道强西风和 BOB 东部沿岸强西南风的协同作用下, BOB 北部受反气旋式环流控制, 伴随下沉气流, 南部受气旋式环流控制, 伴有上升气流。水汽从南半球、阿拉伯海和 BOB 北部地区向 BOB 东南部的气旋式环流区辐合。之后, 在过渡季节, 由于印度东岸盛行西南风, BOB 西岸有离岸流, 表面暖海水向东流动; 同时, BOB 东部地区在反气旋环流控制下, 表面风速较小, 入射太阳辐射增加, 感热和潜热损失较少, 由此形成了海表温度大于 30.5°C 的“BOB 暖池”。随后, 新生涡旋向位于其北部的 BOB 暖池和海表感热加热区移动, 促使副热带地区带状高压的脊线在 BOB 东部地区断裂,

热带西南风与副热带西风两者汇合, 亚洲夏季风在BOB东部与中南半岛西部之间的地区爆发。在BOBMOV生成后, 表面风速开始加大, 海水垂直混合作用明显增加, 在海表潜热和感热通量以及冷海水上翻的共同作用下, 造成BOBMOV过境后海温急剧下降, 致使BOBMOV逐渐减弱直至消亡(Wu et al., 2012a)。

Jiang and Li (2011)以BOB夏季风爆发为例研究了海表温度年循环对夏季风爆发的影响, 发现BOB海表温度最暖轴存在突然季节北跳特征, 在海表温度最暖轴突然北跳的两候之后, BOB夏季风开始爆发。在海表温度最暖轴北跳之后, 热带海表温度的经向梯度产生了逆转, 并强迫出低层越赤道气流, 形成西南风, 进而引起夏季风爆发。海表温度最暖轴的突然北跳时间越早(晚), 夏季风爆发越早(晚), 这为预测夏季风爆发提供了有用的信号。

(2) 青藏高原热力异常影响亚洲季风形成和北半球环流异常的机理

基于数值模拟, 从青藏高原动力和热力作用两个方面对青藏高原对亚洲季风形成及变化的影响做了较为系统的研究(Wu et al., 2012b, 2012c; Liu et al., 2012), 指出亚洲夏季风最主要受到高原热力作用的强迫, 而大尺度地形机械动力强迫作用并不是根本原因。位于20°N以南的南亚季风系统主要受海陆热力差异控制, 而其以北部分地区受到伊朗高原的热力强迫, 东亚季风和南亚季风的东部则主要受到青藏高原热力作用的影响。青藏高原还可以导致对流层低层与高层环流以及热带与副热带季风环流的耦合增强(Wu et al., 2012b, 2012c; Liu et al., 2012)。此外, 冬季高原上空非绝热加热的年际异常主要表现为高原西侧至东南侧潜热加热的异常, 是大尺度环流异常与高原动力作用的结果(宇婧婧等, 2011)。

(3) 青藏高原积雪异常可调制ENSO与东亚夏季风的关系

青藏高原积雪异常对ENSO与东亚夏季风之间的关系发挥着显著的调制作用。在青藏高原积雪异常偏多年, ENSO与东亚夏季风之间的联系削弱; 在积雪异常偏少年, ENSO与东亚夏季风联系则加强。研究结果表明, 青藏高原积雪异常减少, 有助于减弱北太平洋上空的西风急流, 从而有利于与ENSO相关联的热带外大气Rossby波从西传播抵达

东亚地区, 进而增强ENSO与东亚夏季风的联系; 反之亦然(Wu et al., 2012f)。

除了调制ENSO与东亚夏季风之间的联系之外, 青藏高原积雪的年代际变化还可能对华北夏季热浪的发生存在一定的影响作用。数值试验结果显示, 当青藏高原积雪异常减少时, 会在蒙古—华北地区对流层中高层激发出一个高压异常, 与高压异常相伴随的下沉气流, 一方面使得大气边界层的气温升高, 另一方面抑制了云的形成, 从而使得更多的太阳辐射抵达地表, 气温进一步升高。两者的共同作用下, 有助于华北夏季热浪的发生频率增加(Wu et al., 2012d)。

实际上, 研究还表明, 青藏高原大气热源在1990年前后呈现显著的年代际突变特征, 相应的大气环流也发生了调整, 从而对东亚降水的异常变化有重要影响(何金海等, 2011)。

3.3 数值模型改进和季风预测方法研究初见成效, 并成功应用于业务预测

(1) 大气环流模式对亚洲季风模拟性能显著提高

利用中国科学院大气物理研究所的SAMIL大气环流模式和FGOALS2-s耦合模式开展了气候模拟研究, 形成了新版本的大气环流模式和耦合模式。通过对SAMIL积云对流参数化方案中组织化卷入、闭合假设、云水转换率(适度降低, 限制对流降水)和深对流发展高度等的改进, 明显提高了SAMIL模式大气分量及其耦合模式FGOALS2-s对亚洲季风区环流的模拟能力(王军等, 2012; Bao et al., 2012)。同时, 指出改进模式中的物理参数化方案将是SAMIL后续发展的首要任务(王军等, 2012; 王晓聪等, 2012)。改进后的模式, 对南亚高压和西太平洋副热带高压主体的模拟、对东亚区域降水的模拟, 均比改进前的版本更加接近观测结果。另外, 对参加CMIP5耦合模式比较计划的FGOALS-s2评估的结果表明, 其可以很好再现赤道东太平洋地区海表温度的年循环特征、赤道西太平洋地区的半年循环特征和赤道东西太平洋地区过渡区域特征, 技巧高于国际主流模式的模拟结果(Bao et al., 2012)。

(2) 改进了海洋浪—潮—流耦合模型

目前海洋环流模式一般模拟的海表温度过高、上混合层深度太浅, 因此使海洋跃层模拟失真。本项目通过海洋浪—潮—流耦合过程的分析, 改进了

原来的无限水深波致混合方案，建立了有限水深波致混合系数的表达和数值估计，结果可使波致混合系数随水深的衰减明显变缓，在一定程度上改善了上述问题（杨永增等，2011）。

(3) 提出了基于 NAO-ENSO 的东亚夏季风预测模型，成功应用于汛期气候预测业务

根据前述春季 NAO 调节 ENSO 与东亚夏季风联系年代际增强的机理，可以利用春季 NAO 和前期 ENSO 信号对东亚夏季风强度指数 (EASMI) 及长江中游夏季降水指数 RI_{YR} (见图 8) 建立基于

NAO-ENSO 的有物理基础的经验预测模型。根据 1979~2006 年的数据建立经验预测模型如下：

$$\text{EASMI} = 11.56 + 0.60 \cdot \text{NAOI} + 0.22 \cdot \text{ENSO} \\ (\text{develop}) - 0.43 \cdot \text{ENSO}(\text{decay}), \quad (1)$$

$$\text{RI}_{\text{YR}} = -5.92 - 0.41 \cdot \text{NAOI} - 0.04 \cdot \text{ENSO}(\text{develop}) + \\ 0.22 \cdot \text{ENSO}(\text{decay}), \quad (2)$$

其中，NAOI 是春季 4~5 月的 NAO 指数 (Li and Wang, 2003)，ENSO (develop) 代表 ENSO 发展阶段的强度，用前期 4~5 月与 2~3 月的平均 Niño3.4 指数之差表示，ENSO (decay) 代表 ENSO 的衰退

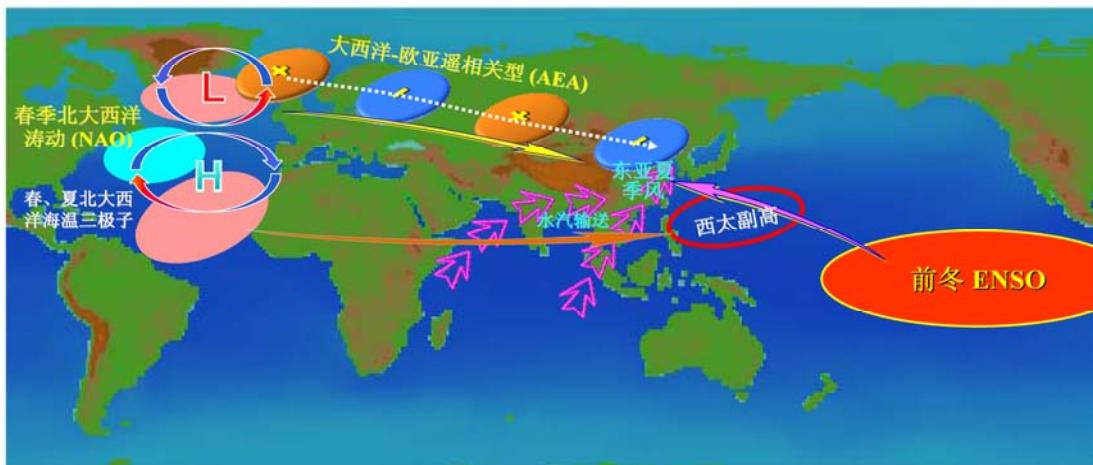


图 7 春季北大西洋涛动调节 ENSO 与东亚夏季风联系年代际增强的物理过程示意图。H 代表高压，L 代表低压；红色和粉红色阴影代表暖海温，浅蓝色阴影代表冷海温，与北大西洋涛动对应在北大西洋存在海温三极子模态。橘黄色和蓝色阴影代表大西洋—欧亚遥相关型的几个中心，带箭头的虚线代表遥相关路径，“+”和“-”分别表示正、负位势高度异常

Fig. 7 Schematic diagram showing the physical processes related to the decadal strengthening relationship between East Asian summer monsoon (EASM) and ENSO modulated by spring North Atlantic Oscillation (NAO). H and L denote high and low pressure anomalies, respectively. Red and pink/cyan shaded areas indicate positive/negative SSTA. Orange/blue shaded areas indicated the centers of the Atlantic–Eurasian (AEA) teleconnection pattern. Dashed line with an arrow represents the track of the AEA pattern. “+” and “-” indicate positive and negative geopotential height anomalies, respectively

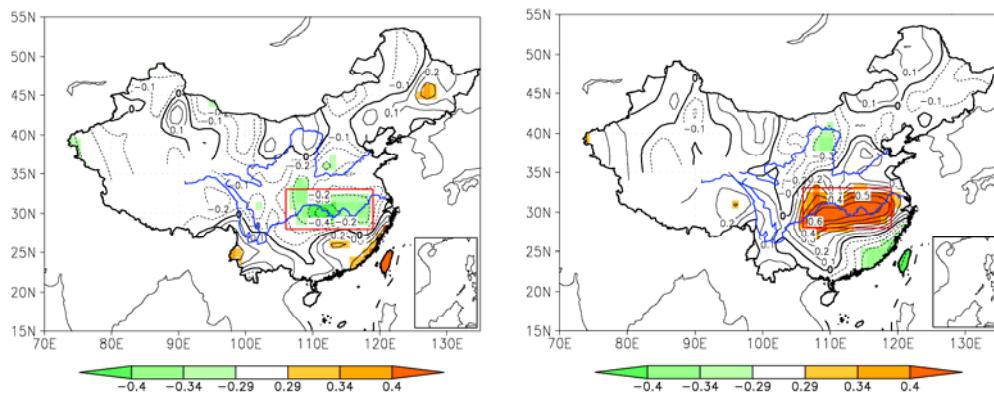


图 8 东亚夏季风指数 EASMI (Li and Zeng, 2002) 与夏季降水的相关 (左图); 长江中游夏季降水指数 RI_{YR} (左图中红色方框区域内相关系数通过 95% 信度检验的站点的平均) 与降水的相关 (右图)。阴影区为到达 95% 的置信度区域

Fig. 8 Correlations between the East Asian summer monsoon index (EASMI) (Li and Zeng, 2002) and summer (JJA) rainfall (left), and correlations between the summer rainfall index (RI_{YR}) over the middle reaches of Yangtze River and summer rainfall (right). The RI_{YR} is the averaged rainfall at stations in the red box of the left panel where correlations are significant above 95% confidence level. Shading indicates the correlation coefficients exceeding the 95% confidence level

阶段的强度, 用前冬 12~2 月平均 Nino3.4 指数表示。由图 9 可知, 该预报模型的 2007~2011 年独立预报效果是不错的, 对东亚夏季风和长江中游夏季降水有预测能力。根据该预测模型, 利用春季 4~5 月的 NAOI 和前期 Nino3.4 指数, 预测 2012 年东亚夏季风指数为偏强, 长江中游降水为偏少

(图 9), 这与实况相符, 预测效果令人满意。因此, 实践证明上述基于 NAO–ENSO 的预测模型为东亚夏季风实时季节预测提供了一个新的工具。该成果在国家气候中心汛期业务预测中得到应用。

(4) 提出了尺度分离降尺度预测方法, 成功应用于汛期气候预测业务

一个物理现象通常存在多时间尺度的变化, 制约不同尺度变化的物理因子也不同, 比如季风和我国夏季降水存在显著的年际和年代际变化, 而且这两个时间尺度各自的影响因子和影响机制也不相同, 因此有必要通过时间尺度分离技

术, 将季节预测问题分解到不同时间尺度上, 分别研究影响因子的前兆信号和作用机制, 并建立不同时间尺度的预测模型, 再合成以综合考虑年际和年代际变化从而得出最终预测(图 10a), 这就是时间尺度分离的降尺度预测方法(Guo et al., 2012)。

以华北汛期(7~8 月)降水为例, 其变化具有明显的年际和年代际变化特征, 研究表明其年际尺度变化与前期 6 月 ENSO 以及 AEA 遥相关型有关, 其年代际变化因印太暖池作用, 与前期 6 月西南印度洋海平面气压密切相关。在揭示了上述不同尺度因子影响华北汛期降水的物理过程的基础上, 建立了尺度分离的降尺度模型:

$$R = R_A + R_D, \quad (3)$$

其中 R 为华北汛期降水, R_A, R_D 分别为华北汛期降水的年际、年代际部分。华北汛期降水年际变率部分 R_A 的降尺度预测模型为

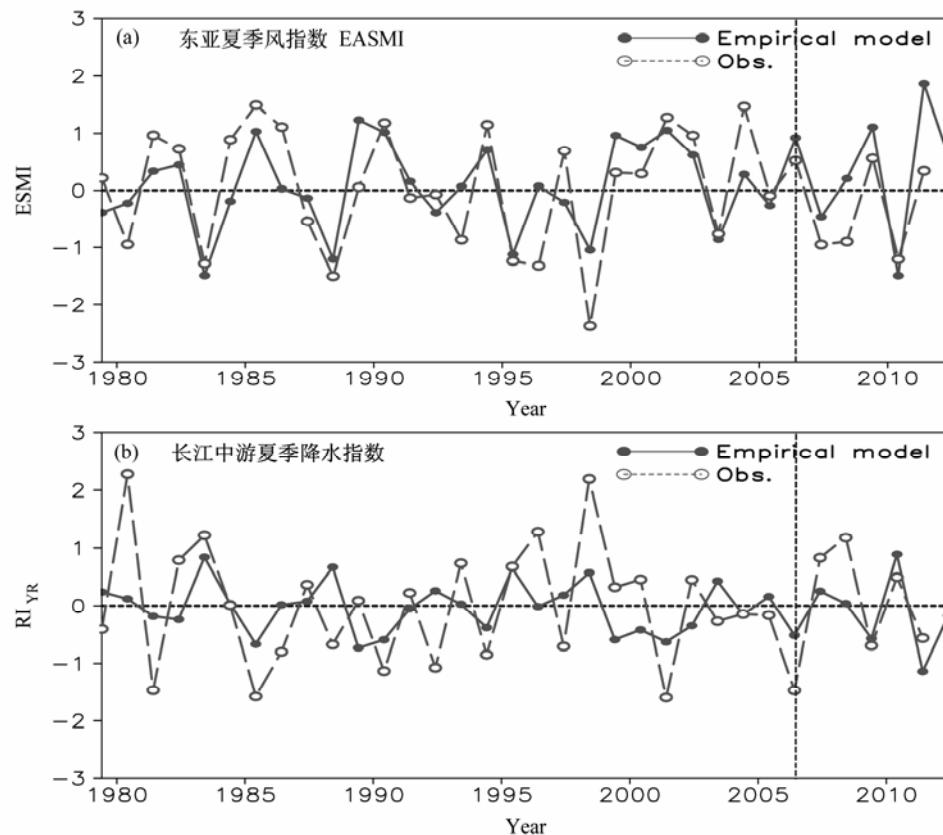


图 9 基于 NAO–ENSO 的经验预测模型对 2012 年东亚夏季风指数 EASMI 预测(a)及长江中游夏季(6~8 月)降水指数 RIYR 预测(b)。序列均为标准化值。1979~2006 年为模型拟合时段, 2007~2009 年为模型后报时段, 2010~2012 年为模型预测时段。2012 年东亚夏季风预测为偏强, 长江中游夏季降水偏少, 这与实况相符

Fig. 9 (a)EASMI and (b) summer (JJA) RIYR in 2012 predicted by the NAO–ENSO based empirical model. The time series are normalized. 1979–2006 is the period for the model fitting, 2007–2009 the hindcasts, 2010–2012 the predictions. The predicted EASM in 2012 is stronger than normal and the predicted RIYR in 2012 is less than normal, which are consistent with the observations

$$R_A = \begin{cases} -34.8 \cdot Ni\tilde{o}3_A + 13.0, & |Ni\tilde{o}3_A| > \frac{1}{2} S_{Ni\tilde{o}3_A} \text{ 且 } |AEA_A| < \frac{1}{2} S_{AEA_A}, \\ 2.89 \cdot AEA_A - 22.4, & |Ni\tilde{o}3_A| < \frac{1}{2} S_{Ni\tilde{o}3_A} \text{ 且 } |AEA_A| > \frac{1}{2} S_{AEA_A}, \\ -26.4 \cdot Ni\tilde{o}3_A + 2.89 \cdot AEA_A + 6.26, & \text{其他.} \end{cases} \quad (4)$$

这里, $Ni\tilde{o}3_A$ 代表 6 月 $Ni\tilde{o}3$ 指数的年际部分, $S_{Ni\tilde{o}3_A}$ 为其标准差; AEA_A 为 6 月 AEA 遥相关波列指数的年际分量, S_{AEA_A} 为其标准差。这个模型依

据制约华北汛期降水年际变率部分的两个因子的相对贡献来建模, 即当两个制约因子存在一个明显偏强的情况时, 选择信号强者, 避免了噪音的引入; 当两个制约因子强度相当时, 同时引入。因为考虑了两个因子及其相对贡献, 模型(4)也可称为条件降尺度模型。华北汛期降水年代际部分的降尺度预测模型为

$$R_D = 320.5 - 47 \cdot SWI_D, \quad (5)$$

其中 SWI_D 为 6 月西南印度洋 ($25^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $30^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{E}$) 平均海平面气压的年代际分量。

独立检验表明, 尺度分离的降尺度模型明显优于不分离尺度的模型, 相关系数由原来的 0.53 提高

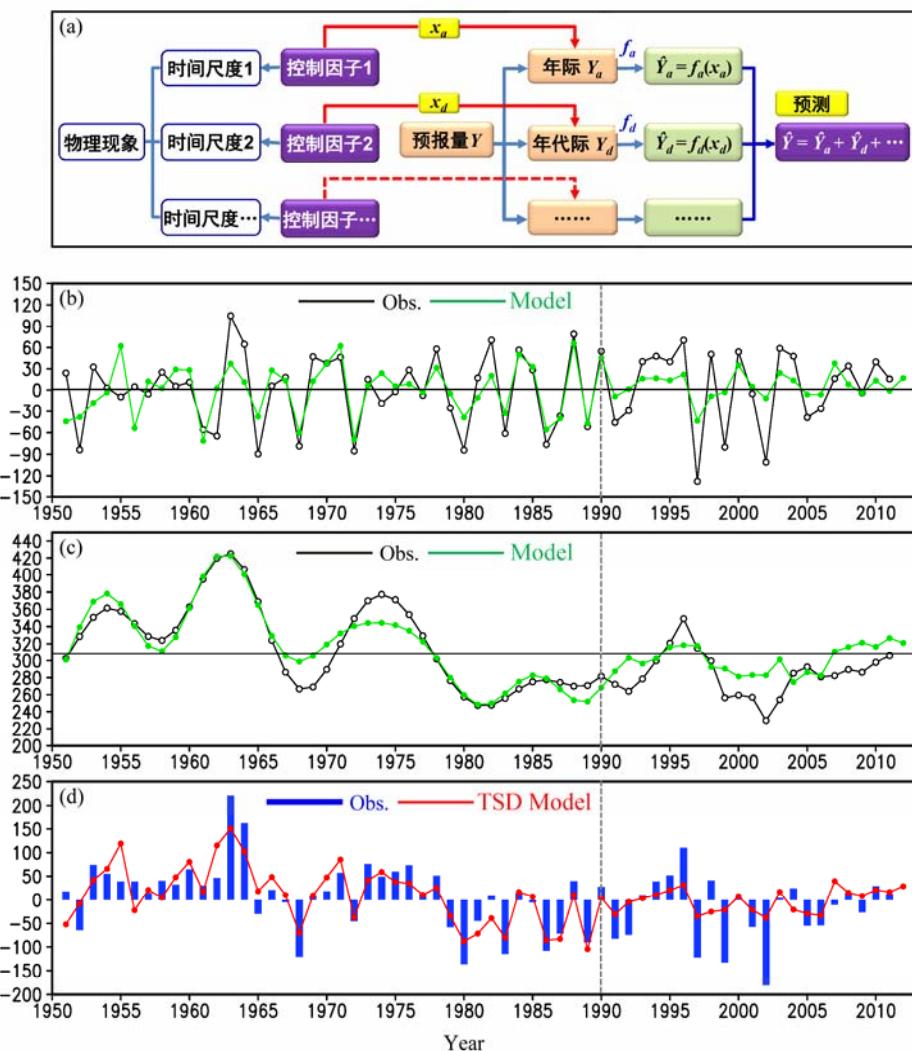


图 10 尺度分离降尺度预测方法建模示意图 (a), 华北汛期 (7~8月) 降水预测试验: 年际分量 (b)、年代际分量 (c) 及总降水距平 (d)。(b) 和 (c) 中黑线为实测, 绿线为预测; (d) 中柱线为实测, 红线为预测; 单位: mm。1950~1990 年为模型拟合时段, 1991~2008 年为模型独立检验时段, 2009~2012 年为模型预测时段。2012 年华北汛期降水预测为偏多, 与实况相符

Fig. 10 (a) Schematic diagram showing the timescale decomposition (TSD) statistical downscaling model. Rainfall series (mm) of rainy season (JA) over North China: (b) interannual component, (c) interdecadal component and (d) total rainfall anomalies. Black and green lines in (b) and (c) are observation and model result, respectively. Bars in (d) are observation and red line is the TSD model result. The period of 1950–1990 is the training period, 1991–2008 the hindcasts, and 2009–2012 the predictions. The predicted JA rainfall in 2012 over North China is above than normal, which is consistent with the observation

到 0.79。对 2009~2011 年华北汛期的预测结果(图 10d)表明, 2009 年为降水正常, 2010 年降水偏多, 2011 年降水正常偏多, 基本与实况相符。这表明该模型有一定的预报技巧。对 2012 年华北汛期的预测:(1) 年际尺度分量: 2012 年 Niño3_A 和 AEA_A(AEA_A 指数在 2012 年特别强, 达 7.75, 对该年华北汛期降水偏多贡献很大)均高于各自标准差的一半, 因此选择模型(4)中的第 3 个方程, 得出年际部分降水为正距平(图 10b);(2) 年代际部分偏多, 从年代际分量来看(图 10c), 华北汛期降水近年来有年代际增加的趋势。总体上, 2012 年华北汛期降水是偏多(图 10d)。这与观测一致, 为业务部门提供了参考。可以说, 尺度分离降尺度预测理论和方法为提出以年代际变化为背景的东亚季风异常的年际预测理论和方法提供了思路。该成果在国家气候中心汛期业务预测中得到应用。

(5) 基于南半球环状模(SAM)的东亚气候预测模型

我国南方地区位于秦岭—淮河以南、青藏高原以东的广大地区, 东临东海、南面南海, 约占全国面积的 25%, 人口占全国的 55%。南方地区对我国社会经济的发展贡献巨大, 2011 年的生产总值占全国 GDP 总量的约 60%。同时, 也是气象灾害频繁且严重的地区, 2011 年南方造成的直接经济损失占全国比重达 70%。南方区域降水量的季节分布呈双峰型, 即峰值分别出现在春季和盛夏, 分别称为前汛期和后汛期, 这两个汛期的降水量占全年总降水量的 70%以上, 其中春季 3~5 月的降水量可占全年总降水量的 35%以上, 说明前汛期降水与后汛期降水同样重要。而且, 南方前汛期是我国每年雨季开始出现和雨带北移的第一个阶段, 年际变率很大, 因此, 南方前汛期降水的研究对全国汛期的长期预报也有重要的意义。

作为南半球中高纬大气环流变率的主要模态, SAM 除了对南半球气候有重要影响外, 对中国气候也有广泛影响(Nan and Li, 2003; 高辉等, 2003; 李建平, 2005a, 2005b; 南素兰和李建平, 2005a, 2005b; 薛峰, 2005; Wu et al., 2006; 吴志伟等, 2006; Wu et al., 2009b; Nan et al., 2009)。前期发现春季 SAM 和东亚夏季风(Nan and Li, 2003; 李建平, 2005b)、秋季 SAM 和东亚冬季风存在显著相关(Wu et al., 2009b), 提出“海气耦合桥”理论来

揭示其中的物理机制(南素兰和李建平, 2005a, 2005b; Wu et al., 2009b), 明确了 SAM 是东亚季风季节预测新的前期信号。就是说, 可以用秋季 SAM 的信号预测东亚冬季风, 利用春季 SAM 的信号预测长江以南的中下游地区的夏季降水。

在项目的支持下, 做了进一步的工作。发现前冬 SAM 对春季南方降水有显著影响, 两者之间表现出显著的负相关关系(郑菲和李建平, 2013)。前冬 SAM 影响南方春季前汛期降水也是通过“海气耦合桥”的方式实现的, 由此, 可以建立基于冬季 SAM 的春季南方前汛期降水预测模型。根据 1950/51~1979/80 年冬季的数据建立经验预测模型如下:

$$R_{sc} = -0.27 \times SAMI - 0.03, \quad (6)$$

其中 R_{sc} 是($20^{\circ}\text{--}30^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{E}$)范围内 11 个台站的春季(3~5 月)平均降水量指数, SAMI 前冬(12~2 月)SAM 指数。预测效果检验, 在建立模型阶段(1950/51~1979/80 年共 30 年), 降水实况和模型结果的符号一致率为 57%, 相关系数为 0.35; 在检验阶段或者回报阶段(1980/81~2010/11 年共 31 年), 符号一致率为 74%, 相关系数为 0.53(图 11a)。这说明该模型对南方前汛期降水确有一定的预报技巧, 并且比较稳定。模型对 2011 年的预测结果是南方春季偏旱, 这与实况也是相符的(图 11)。值得一提的是, 对南方前汛期降水连旱的情况, 该模型也有一定预报能力(图 11a)。

(6) 可预报性理论研究取得新进展

研究热带海温的持续性障碍问题发现, 热带北大西洋地区海温存在冬季持续性障碍(WPB)的现象, 其与 ENSO 在准两年尺度上存在着一种动力关系, 即强 El Niño 事件之前一般伴随着强 La Niña 事件, 作为对 ENSO 的遥响应, 北热带大西洋地区海温距平在冬季经历了由负到正的明显变化, 最终导致了冬季持续性障碍的现象。西北太平洋海表温度的持续性则存在夏季障碍特征, 而海洋内部过程和大气强迫作用可能是主要原因(Ding and Li, 2011)。

发现西北太平洋中部地区海表温度存在夏季持续性障碍(Zhao et al., 2012), 这与 ENSO 的春季可预报性障碍不同, 是与混合层、云—辐射反馈等局地海气相互作用机制有关, 而 ENSO 的遥强迫作用对这一现象的影响并不显著。

将研究第二类可预报性的强迫奇异向量方法

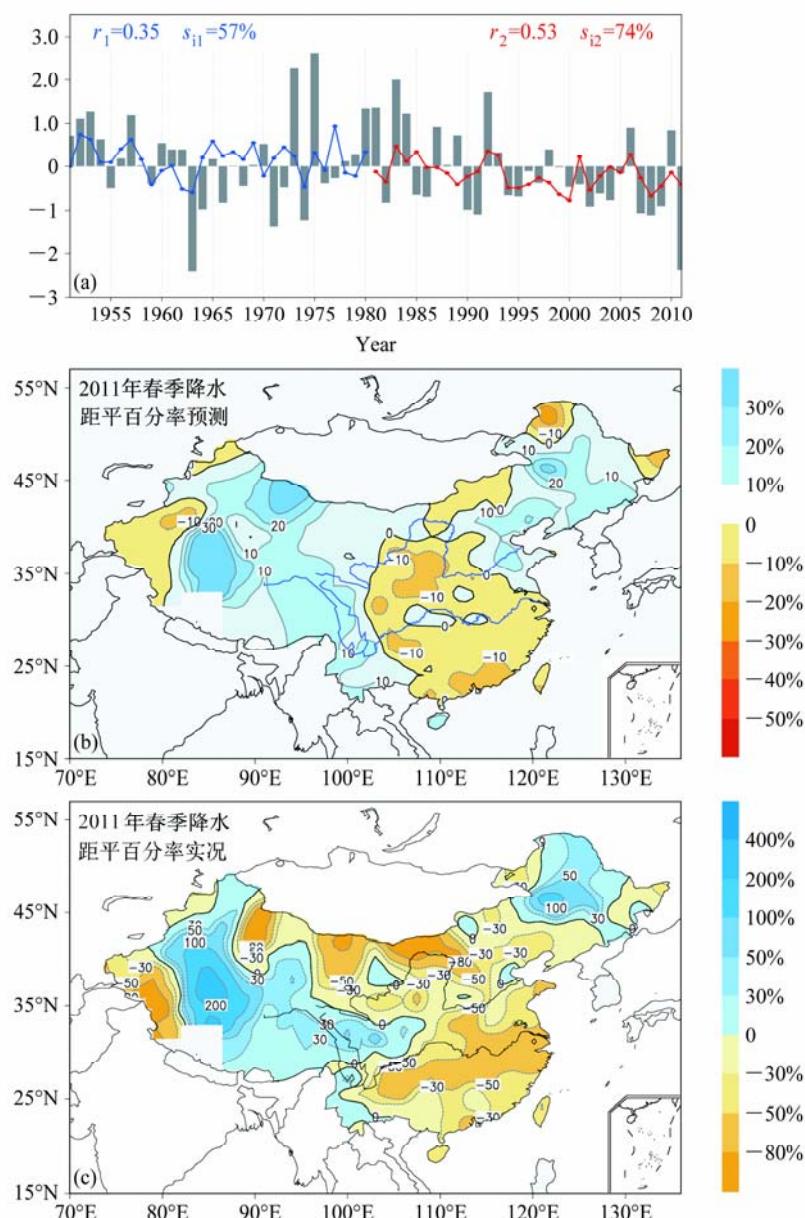


图 11 (a) 南方前汛期(3~5月)降水指数组序列(柱状)与基于前冬 SAM 的预测模型结果(点实线)(蓝色和红色分别表示建模时段和回报时段; 实况与模型结果的相关系数及符号一致率分别用 r 和 s_i 表示)。(b) 利用基于前冬 SAM 的预测模型预测的 2011 年春季降水距平百分率图(%)。(c) 2011 年春季降水距平百分率实况(%)

Fig. 11 (a) Time series of rainfall index (bars) in the first rainy season (MAM) over South China and predicted rainfall (dot solid lines) made by the preceding DJF Southern Hemisphere Annular Mode (SAM)-based empirical model (Blue and red represent values of the model fitting and hindcast, respectively, r denotes the correlation coefficient between the observation and model result, and s_i the accuracy of anomalous sign). (b) Seasonal precipitation prediction in spring 2012 (anomaly percentage) made by the preceding DJF SAM-based empirical model. (c) Same as (b), but for observation

拓展到非线性领域，提出了非线性强迫奇异向量的新方法，并研究了计算非线性强迫奇异向量的伴随算法 (Peng et al., 2012)。提出了局地动力相似的概念，进一步发展完善了通过寻找局地动力相似（不但相似点初始误差小，而且它们在短时间内的演化距离也要小）来估计非线性局部 Lyapunov 指数 (NLLE) 的方法 (Li and Ding, 2011)。该方法可以

利用实际观测资料和再分析资料来定量研究大气实际可预报性期限问题 (Ding et al., 2010b, 2011)，以及海温的可预报性期限问题 (Li and Ding, 2012)。对于海温而言，热带中东太平洋、热带印度洋和热带大西洋均有超过 10 个月的可预报性。此外，还研究了北半球海温的冬季重现的时空特征 (Zhao and Li, 2010, 2012)。

3.4 顺利实施了相关海域海洋观测，成功优化了海洋资料同化方法

(1) 顺利实施了 2010~2012 年南海 18°N 断面海洋综合观测

在前期海气 973 项目的基础上 (李建平等, 2011a, 2011b), 本项目继续支持了南海北部 18°N 断面的海洋大气综合观测工作, 为形成我国自主设计和实施的长期海洋一大气观测断面打下基础, 对我国南海海洋和大气研究积累长时间序列的现场观测资料集有重要意义。同时, 也有利于评估海洋和大气数值模式的参数化方案、检验和验证海洋和大气数值预报模式及资料同化系统的性能, 也对南海北部的国防建设意义重大。本项目顺利实施了 2010~2012 年南海 18°N 断面海洋综合观测, 获得了大量第一手资料, 取得了初步的分析结果 (葛黎丽等, 2012)。目前南海 18°N 断面观测已经被纳入 CLIVAR 国际气候与海洋计划框架。图 12 为 2011 年 8 月南海北部海洋观测开放航次站位的设置图。

(2) 成功完成黑潮源区潜标设计和布放

在海潮源区布放潜标, 形成新的黑潮源区海洋观测数据来揭示黑潮源区海域海流和温盐结构的年代际变化是本项目重点观测内容之一。通过收集、分析 17.875°N 和 18.125°N 附近断面 2 月和 8

月的温盐数据, 最终确定布放位置为北纬 18°4.9032', 东经 122°40.8178'。使潜标尽量贴近黑潮流核, 完成潜标设计之后, 2011 年 7 月顺利完成了布放工作, 正在获取相关观测资料, 为深入研究黑潮源区的基本情况打下良好的基础。

(3) 爪哇上升流区潜标观测顺利进行

延续了前期海气 973 项目的观测内容, 开展了印尼爪哇上升流潜标观测, 通过 2011 年度一个航次的爪哇沿岸上升流观测, 取得了大量现场实测的海流、温度、盐度、深度观测剖面数据。对资料所反映的上升流演变特征进行了初步分析发现, 观测资料可以反映热带东印度洋对 MJO 和赤道急流的响应过程, 以及夏季季风强迫下爪哇沿岸上升流的建立过程。该资料也将用于后期海洋浪-潮-流耦合模拟的检验验证。

(4) 发展了新的海洋资料同化方法

基于新版的垂直混合坐标的 HYCOM 海洋模式, 构建了所研究海域的海洋资料同化系统 (闫长香和朱江, 2011)。新版的 HYCOM 模式不仅改进了海洋垂直混合的物理过程, 而且在淡水与风场驱动、空间分辨率、关键的印尼海域地形及 MPI 并行技术等方面也做了较大改善。数值试验显示, 新版的 HYCOM 模式在温跃层的模拟、印尼贯穿流输送

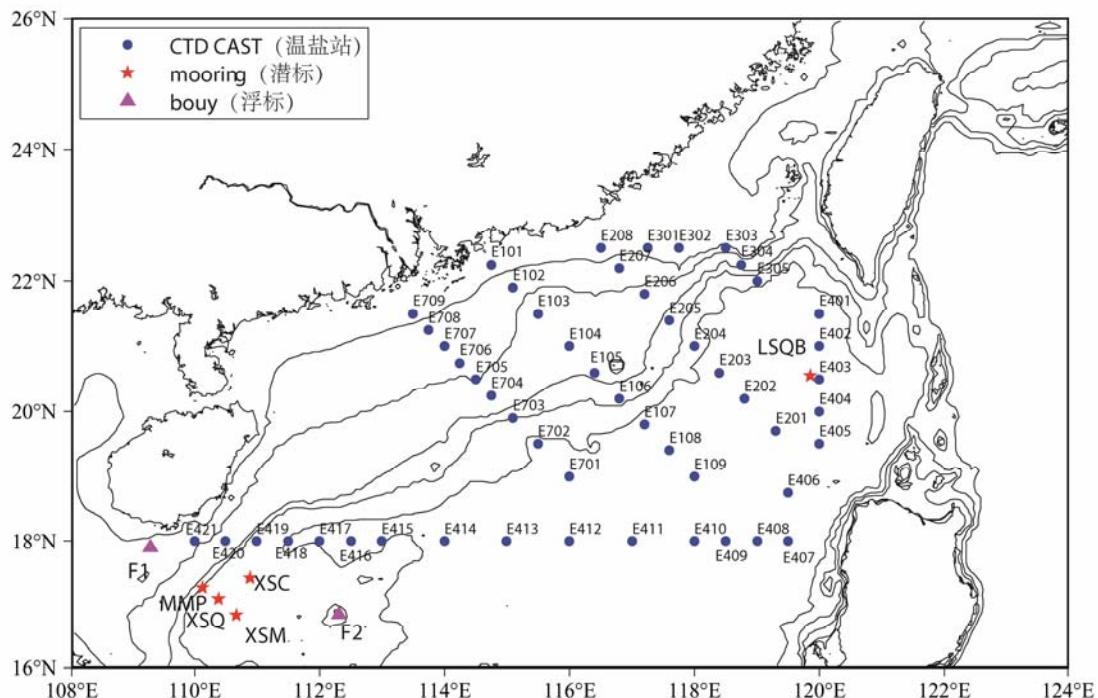


图 12 2011 年 8~9 月南海北部海洋观测开放航次站位的设置图

Fig. 12 Observation stations of the northern South China Sea open cruise in August–September 2012

量等方面的性能明显好于旧版本。同时，同化方案采用了计算比较经济的集合最优插值方法和局地化技术，并基于分布不均匀的观测采用了一种新的分块技术，以模式格点数 192000 为例，采用分块技术可以提高 36 倍的计算效率。新的海洋资料同化方法为项目下一步建立亚洲区域海洋资料同化数据集的奠定了基础。

4 总结与展望

本文总结了全球变化研究国家重大研究计划项目“亚洲区域海—陆—气相互作用机理及其在全球变化中的作用”执行两年多以来取得了阶段性科研成果。总体而言，项目进展顺利，完成了预定的研究目标，在印太暖池对全球热带气候年代际变化的调控机理、季风预测方法和模式改进以及相关海气补充观测与资料同化方法等方面取得了较为突出的进展，主要包括：

(1) 阐明了亚洲区域海—陆—气过程是全球热带大气环流年代际变化的主要驱动力，提出了热带东太平洋海温变率的冷舌模态，揭示了 ENSO 型态变异及其影响东亚降水年际变化的机理。

揭示了 Hadley 环流存在年代际变化主模态，印太暖池海温年代际非均匀增暖是该模态的重要驱动力，同时也是全球尺度副热带干旱年代际变化的重要调控器；ENSO 是 Hadley 环流年际变化的重要驱动因子。发现热带东太平洋海表温度变化的冷舌模态，它是一个海气耦合模态，在全球变暖背景下其表现为长期增强，这种显著增强对 ENSO 型态变异产生重要影响，是 1980 年代以来 WP 型或 CP 型 El Niño 或 Modoki 事件频繁出现的重要原因之一。系统研究了两类 El Niño 对中国气候的不同影响及机理。

揭示了热带印度洋海盆的年代际增暖与 ENSO 事件持续时间的年代际变化存在密切关联；揭示了 ENSO 事件影响平流层环流的年际—年代际异常的特征与机理；发现皮纳图博强火山爆发对 1990 年代初平流层年代际变冷突变有重要贡献，阐明了其中的影响机理；揭示了西北太平洋暖池对台风活动的年代际变化影响机理；发现 ENSO 与东亚夏季风之间的关系存在年代际增强现象，春季 NAO 对调节 ENSO 与东亚夏季风之间的这种年代际增强有重要作用，阐明了其中调节机理，为建立基于 NAO—ENSO 的东亚夏季风预测经验模型奠定了物理基

础。此外，还提出了水平非均匀基流中行星波传播的理论。

(2) 揭示了青藏高原热力强迫的异常特征及其气候效应。

阐明了青藏高原和局地海气相互作用、海温暖轴季节北跳影响 BOB 夏季风爆发的机理，BOB 区域海温暖轴北跳平均超前夏季风爆发 2 候，因此为预测亚洲夏季风爆发提供了有用的前期信号。系统揭示了青藏高原热力异常影响亚洲季风形成和北半球环流异常的机理；发现青藏高原积雪异常对 ENSO 与东亚夏季风的关系有显著的调制作用，前者偏多（偏少）年，ENSO 与东亚夏季风之间的联系削弱（加强）。青藏高原大气热源在 1990 年前后呈现显著的年代际突变，对东亚降水的异常变化有重要影响。

(3) 数值模型改进和季风预测方法研究初见成效，并成功应用于业务预测。

改进后的版本大气环流模式 SAMIL 和耦合模式 FGOALS2-s 对亚洲季风模拟性能显著提高，后者对赤道太平洋海温的季节特征模拟也显著提高。通过建立有限水深波致混合方案，改进了海洋浪—潮—流耦合模型的模拟性能。可预报性理论研究取得新进展

提出了一些有物理基础的经验预测模型，如尺度分离降尺度预测方法，成功应用于汛期气候预测业务，这为提出以年代际变化为背景的东亚季风异常的年际预测理论和方法提供了新思路；提出了基于 NAO—ENSO 的东亚夏季风预测模型，也成功应用于汛期气候预测业务；提出了基于 SAM 的东亚气候预测模型。这些成果在国家气候中心汛期业务预测中得到了应用，为业务部门提供了参考。

(4) 在亚洲区域海气补充观测和海洋资料同化方面也取得突出进展。

项目顺利实施了相关海域的海气补充观测，优化了海洋资料同化方法。成功实施了 2010~2012 年南海 18°N 断面海洋综合观测，为形成国际上有重要影响的、我国自主实施的第一条南海断面长期海气观测打下了基础。成功完成黑潮源区潜标设计和布放，为形成新的黑潮源区海洋观测数据做好准备。爪哇沿岸上升流区潜标观测工作进展顺利。发展了新的海洋资料同化方法，为建立亚洲区域海洋资料同化数据集的奠定了基础。

项目还继续推动和领导了“亚洲季风年”

(AMY2007–2012)与“东亚气候模拟”国际计划,举办了多次相关国际会议和国际会议分会,提升了我国在该领域的国际地位。

在上述进展基础上,项目未来还要进一步加强观测、机理和模式研究,突出“亚洲区域海—陆—气相互作用—全球尺度变化—东亚季风”的整体观,进一步突出印太暖池和青藏高原为主体的海—陆—气三者相互作用,主要研究包括:继续进行相关关键区域进行断面、潜标等补充海气观测,获取有关上层海洋温盐流及海表通量资料,并进行资料订正,完善相关海气数据集;在发展的新的海洋资料同化方法基础上,结合项目的观测资料和其他资料进行资料同化研究,生成亚洲区域高分辨率的长时间序列的海洋再分析资料,为相关研究奠定资料基础;深化亚洲海—陆—气相互作用的过程及影响全球气候异常的机理,特别是海—陆—气相互作用所导致的亚洲季风减弱对全球气候变暖速率年代际变化的贡献;系统说明亚洲海—陆—气相互作用过程影响东亚季风、旱涝的过程和机理,以及相关可预报性研究;进一步改进耦合模式系统,分析现有模式模拟气候变化的不稳定性;在理论分析、资料诊断和数值模拟研究结果的基础上,形成亚洲区域海—陆—气相互作用影响全球变化和我国年代际气候异常的理论框架,建立年代际背景下年际尺度东亚季风气候异常的预测理论和方法。

参考文献 (References)

- Bao Qing, Lin Pengfei, Zhou Tianjun, et al. 2012. The flexible global ocean–atmosphere–land system model version: FGOALS-s2 [J]. *Adv. Atm. Sci.*, in press.
- Diaz H F, Bradley R S. 2004. The Hadley Circulation: Past, Present, and Future [M]. New York: Springer, 511pp.
- Ding Ruiqiang, Ha K, Li Jianping. 2010a. Interdecadal shift in the relationship between the East Asian summer monsoon and the tropical Indian Ocean [J]. *Climate Dyn.*, 34: 1059–1071.
- Ding Ruiqiang, Li Jianping, Seo K. 2010b. Predictability of the Madden-Julian oscillation estimated using observational data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 1004–1013, doi:10.1175/2009MWR3082.1.
- Ding Ruiqiang, Li Jianping, Seo K. 2011. Estimate of the predictability of boreal summer and winter intraseasonal oscillations from observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139: 2421–2438, doi:10.1175/2011MWR3571.1.
- Ding Ruiqiang, Li Jianping. 2011. Winter persistence barrier of sea surface temperature in the northern tropical Atlantic associated with ENSO [J]. *J. Climate*, 24: 2285–2299, doi:10.1175/2011JCLI3784.1.
- 丁仲礼. 2010. 中国西部环境演化集成研究 [M]// 孙鸿烈. 中国西部环境和生态科学研究丛书. 北京: 气象出版社, 364pp. Ding Zhongli.
2010. Integrated research on environmental evolution over western China [M]// Sun Honglie. A Series of Western China Environmental and Ecological Science Research. Beijing: China Meteorological Press, 364pp.
- Feng Juan, Wang Lin, Chen Wen, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D24122, doi:10.1029/2010JD014761.
- Feng Juan, Li Jianping. 2011. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over South China [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D13102, doi:10.1029/2010JD015160.
- Feng Ran, Li Jianping, Wang Jincheng. 2011a. Regime change of the boreal summer Hadley circulation and its connection with tropical SST [J]. *J. Climate*, 24: 3867–3877, doi:10.1175/2011JCLI3959.1.
- Feng Juan, Chen Wen, Tam C Y, et al. 2011b. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases [J]. *Int. J. Climatol.*, 31: 2091–2101, doi:10.1002/joc.2217.
- Feng Juan, Li Jianping, Xie Fei. 2013. Long-term variation of the principal mode of boreal spring Hadley circulation linked to SST over the Indo-Pacific warm pool [J]. *J. Climate*, 26, 532–544.
- Feng Juan, Li Jianping. 2013. Contrasting impacts of two types of ENSO on the boreal spring Hadley circulation [J]. *J. Clim.*, 26, in press.
- 冯然, 李建平, 王金成. 2011. 北半球夏季 Hadley 环流的主导模态及其变率 [J]. 大气科学, 35 (2): 201–206. Feng Ran, Li Jianping, Wang Jincheng. 2011. The principle modes of variability of the boreal summer Hadley circulation and their variations [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 35 (2): 201–206.
- 符淙斌, 延晓冬, 郭维栋. 2006. 北方干旱化与人类适应——以地球系统科学观回答面向国家重大需求的全球变化的区域响应和适应问题 [J]. 自然科学进展, 16 (10): 1216–1223. Fu Congbin, Yan Xiaodong, Guo Weidong. 2006. Aridification in northern China and human adaptation—Answers for national important demands-oriented global change with earth system science view [J]. *Prog. Nat. Sci. (in Chinese)*, 16 (10): 1216–1223.
- 符淙斌. 2007. 季风亚洲区域集成研究科学计划 [M]. 北京: 气象出版社, 67pp. Fu Congbin. 2007. The Science Program of Monsoon Asia Integrated Regional Study [M]. Beijing: China Meteorological Press, 67pp.
- 高辉, 薛峰, 王会军. 2003. 南极涛动年际变化对江淮梅雨的影响及预报意义 [J]. 科学通报, 48 (增刊): 87–92. Gao Hui, Xue Feng, Wang Huijun. 2003. Influence of interannual variability of Antarctic Oscillation on Meiyu along the Yangtze and Huaihe River valley and its importance on prediction [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 2003, 48 (Suppl.): 87–92.
- 葛黎丽, 程旭华, 齐义泉, 等. 2012. 南海 18°N 断面上的体积和热盐输送 [J]. 热带海洋学报, 31 (1): 10–17. Ge Lili, Cheng Xuhua, Qi Yiquan, et al. 2012. Upper-layer geostrophic volume, heat and salt transports across 18°N in the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 31 (1): 10–17.
- Guo Yan, Li Jianping, Li Y. 2012. A time-scale decomposition approach to statistically downscale summer rainfall over North China [J]. *J. Climate*, 25: 572–591.
- 何金海, 徐海明, 钟珊珊, 等. 2011. 青藏高原大气热源特征及其影响和

- 可能机制 [M]. 北京: 气象出版社, 243pp. He Jinhai, Xu Haiming, Zhong Shanshan, et al. 2011. Characteristics and Impacts of Atmospheric Heat Source on Tibet Plateau and Possible Mechanism [M]. Beijing: China Meteorological Press, 243pp.
- Huang Gang. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (1): 41–52.
- Huang Ping, Huang Ronghui. 2011. Climatology and interannual variability of convectively coupled equatorial waves activity [J]. *J. Climate*, 24: 4451–4465, doi:10.1175/2011JCLI4021.1.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1987. Influence of heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// Proc. International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, China, 1987: 40–45.
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. 大气科学, 12 (特刊): 95–107.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 12 (Special I): 95–107.
- 黄荣辉, 王磊. 2010. 台风在我国登陆地点的年际变化及其与夏季东亚/太平洋型遥相关的关系 [J]. 大气科学, 34 (5): 853–864. Huang Ronghui, Wang Lei. 2010. Interannual variation of the land falling locations of typhoons in China and its association with the summer East Asia/Pacific pattern teleconnection [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (5): 853–864.
- 黄荣辉, 陈文, 马耀明, 等. 2011. 中国西北干旱区陆—气相互作用及其对东亚气候变化的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 356pp. Huang Ronghui, Chen Wen, Ma Yaoming, et al. 2011. Land-Air Interactions over Northwest China Arid Region and Its Impacts on East Asia Climate Change [M]. Beijing: China Meteorological Press, 356pp.
- Jiang Xinwen, Li Jianping. 2011. Influence of the annual cycle of sea surface temperature on the monsoon onset [J]. *J. Geophys. Res.*, 116, D10105: doi:10.1029/2010JD015236.
- 冷疏影, 李秀彬, 宋长青. 2011. “中国西部环境和生态科学”重大研究计划结题综述 [J]. 中国科学基金, 19 (2): 71–76. Leng Shuying, Li Xiubin, Song Changqing. 2011. Review of the achievements of major research plan on Environmental and Ecological Research in Western China supported by National Natural Science Foundation of China [J]. *Bulletin of Science Foundation in China (in Chinese)*, 19 (2): 71–76.
- 李崇银, 黄荣辉, 丑纪范, 等. 2009. 我国重大高影响天气气候灾害及对策研究 [M]. 北京: 气象出版社, 187pp. Li Chongyin, Huang Ronghui, Chou Jifan, et al. 2009. High-Impact Weather and Climate Disasters in China and Countermeasures Studies [M]. Beijing: China Meteorological Press, 187pp.
- Li Jianping, Zeng Qingcun. 2002. A unified monsoon index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (8): 1274, doi:10.1029/2001GL013874.
- Li Jianping, Wang J X L. 2003. A new North Atlantic Oscillation index and its variability [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (5): 661–676.
- 李建平. 2005a. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系 [C]// 俞永强, 陈文, 等. 海—气相互作用对我国气候变化的影响. 北京: 气象出版社, 169–176. Li Jianping. 2005a. Physical nature of the Arctic Oscillation and its relationship with East Asian atmospheric circulation [C]// Yu Yongqiang, Chen Wen, et al., Eds. Air-Sea-Land Interactions in Asia Monsoon Region and Their Impacts on the Climate Variation in China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 169–176.
- 李建平. 2005b. 海气耦合涛动与中国气候变化 [C]// 秦大河. 中国气候与环境演变(上卷). 北京: 气象出版社, 324–333. Li Jianping. 2005b. Coupled air-sea oscillation and climate variations in China [C]// Qin Dahe. Climate and Environmental Evolution in China (First Volume) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 324–333.
- Li Jianping, Zhang Li. 2009. Wind onset and withdrawal of Asian summer monsoon and their simulated performance in AMIP models [J]. *Climate Dyn.*, 32 (7): 935–968, doi:10.1007/s00382-008-0465-8.
- Li Jianping, Wu Zhiwei, Jiang Zihong, et al. 2010. Can global warming strengthen the East Asian summer monsoon? [J]. *J. Climate*, 23: 6696–6705.
- Li Jianping, Ding Ruiqiang. 2011. Temporal-spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical analogues [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139: 3265–3283, doi:10.1175/MWR-D-10-05020.1.
- 李建平, 吴国雄, 胡敦欣, 等. 2011a. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响 (上卷) [M]. 北京: 气象出版社, 1–516. Li Jianping, Wu Guoxiong, Hu Dunxin, et al. 2011a. Ocean-Atmosphere Interaction over the Jointing Area of Asia and Indian-Pacific Ocean (AIPO) and Its Impact on the Short-Term Climate Variation in China (Volume I) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–516.
- 李建平, 吴国雄, 胡敦欣, 等. 2011b. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响 (下卷) [M]. 北京: 气象出版社, 517–1081. Li Jianping, Wu Guoxiong, Hu Dunxin, et al. 2011b. Ocean-Atmosphere Interaction over the Jointing Area of Asia and Indian-Pacific Ocean (AIPO) and Its Impact on the Short-Term Climate Variation in China (Volume II) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–516.
- Li Jianping, Ding Ruiqiang. 2012. Temporal-spatial distribution of the predictability limit of monthly sea surface temperature in the global oceans [J]. *Int. J. Climatol.*, in press, doi:10.1002/joc.3562.
- Li Jianping, Feng Juan. 2013. Tropical large-scale atmosphere-ocean interaction in association with subtropical aridity trend [M]// On Aridity Trend in Northern China, Fu Chongbin, Eds., World Scientific. In press.
- Li Qian, Ren Rongcai, Cai M, et al. 2012. Attribution of the summer warming since 1970s in Indian Ocean Basin to the inter-decadal change in the seasonal timing of El Niño decay phase [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39: L12702, doi:10.1029/2012GL052150.
- 李艳杰, 李建平. 2012. 水平非均匀基流中行星波的传播 [J]. 地球物理学报, 55 (2): 361–371. Li Yanjie, Li Jianping. 2012. Propagation of planetary waves in the horizontal non-uniform basic flow [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 55 (2): 361–371.
- Li Yanjie, Li Jianping, Feng Juan. 2013. Boreal summer convection oscillation over the Indo-western Pacific and its relationship with the East Asian summer monsoon [J]. *Atmospheric Science Letters*, in press.
- Liu Yimin, Wu Guoxiong, Hong Jieli, et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: II. Change [J]. *Climate Dyn.*, 39 (5): 1169–1181, doi:10.1007/s00382-012-1335-y.
- 马杰, 李建平. 2007. 冬季北半球 Hadley 环流圈的增强及其与 ENSO 关

- 系 [J]. 自然科学进展, 17 (11): 1524–1531. Ma Jie, Li Jianping. 2007. Strengthening of the boreal winter Hadley circulation and its connection with ENSO [J]. *Prog. Nat. Sci. (in Chinese)*, 17 (11): 1327–1333.
- Ma Jie, Li Jianping. 2008. The principal modes of variability of the boreal winter Hadley cell [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L01808, doi:10.1029/2007GL031883.
- Matsumoto J, Wang B, Li Jianping, et al. 2010. The Implementation Plan for Asian Monsoon Years (AMY 2007–2012) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 38pp.
- Muhammad A, Li Jianping, Jin F F. 2013. The asymmetric influence of the two types of El Niño and La Niña on summer rainfall over Southeast China [J]. *J. Climate*, submitted.
- Nan Sulan, Li Jianping. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere Annular Mode [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (24): 2266, doi:10.1029/2003GL018381.
- 南素兰, 李建平. 2005a. 春季南半球环状模与长江流域夏季降水的关系 I. 基本事实 [J]. 气象学报, 63 (6): 837–846. Nan Sulan, Li Jianping. 2005a. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. I. Basic facts [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63 (6): 837–846.
- 南素兰, 李建平. 2005b. 春季南半球环状模与长江流域夏季降水的关系 II. 印度洋、南海海温的“海洋桥”作用 [J]. 气象学报, 63 (6): 847–856. Nan Sulan, Li Jianping. 2005b. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. II. The role of the Indian Ocean and South China Sea as an “oceanic bridge” [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (6): 847–856.
- Nan Sulan, Li Jianping, Yuan X, et al. 2009. Boreal spring Southern Hemisphere Annular Mode, Indian Ocean sea surface temperature, and East Asian summer monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D02103, doi:10.1029/2008JD010045.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 64: 373–390.
- Peng Yuehua, Duan Wansuo, Xiang Jie. 2012. Effect of stochastic MJO forcing on ENSO predictability [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (6): 1279–1290.
- 任荣彩, 向纯怡. 2010. 平流层极涡振荡与 ENSO 热带海温异常的时空联系 [J]. 气象学报, 68 (3): 285–295. Ren Rongcai, Xiang Chunyi. 2009. Temporal and spatial connections of the stratospheric polar vortex oscillation to the ENSO tropical SST anomalies [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 68 (3): 285–295.
- Ren Hongli, Jin F F. 2011. Niño indices for two types of ENSO [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- 任荣彩. 2012. 过去 60 年中 3–5 年时间尺度的强 ENSO 过程与平流层环流异常的滞后耦合及其机理 [J]. 气象学报, 70 (3): 521–535. Ren Rongcai. 2012. Study of the lag-coupling between the 3–5 year timescale ENSO events and the stratospheric circulation in past 60 years and its mechanism [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70 (3): 521–535.
- Ren Rongcai. 2012. Seasonality of the lagged relationship between ENSO and the Northern Hemispheric polar vortex variability [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5 (2): 113–118.
- Ren Rongcai, Cai M, Xiang Chunying, et al. 2012. Observational evidence of the delayed response of stratospheric polar vortex variability to ENSO SST anomalies [J]. *Climate Dyn.*, 38 (7–8): 1345–1358, doi:10.1007/s00382-011-1137-7.
- Song Jie, Li Chongyin, Pan Jing. 2011. Climatology of anticyclonic and cyclonic Rossby wave breaking on the dynamical tropopause in the Southern Hemisphere [J]. *J. Climate*, 24: 1239–1251
- Wang B, Matsumoto J, Wu Guoxiong, et al. 2010. The Science Plan for Asian Monsoon Years (AMY 2007–2012) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 67pp.
- 王军, 包庆, 刘屹岷, 等. 2012. 大气环流模式 SAMIL 模拟的夏季全球加热场和东亚夏季风 [J]. 大气科学, 36 (1): 63–76. Wang Jun, Bao Qing, Liu Yimin, et al. 2012. Performances of SAMIL on the global heating and the East Asian summer monsoon [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 36 (1): 63–76.
- 王晓聪, 包庆, 刘琨, 等. 2012. 两种对流参数化方案下降水和潜热加热空间结构的模拟及其影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 54 (11): 1779–1788. Wang X C, Bao Q, Liu K, et al. 2011. Features of rainfall and latent heating structure simulated by two convective parameterization schemes [J]. *Science China Earth Sciences (in Chinese)*, 54 (11): 1779–1788.
- WCRP. 2010a. 世界气候研究计划成就——气候适应、减缓和风险管理的科学知识 [M]. 李建平, 刘屹岷, 林征等译. 北京: 气象出版社, 84pp. The World Climate Research Programme. 2009a. The World Climate Research Programme Achievements—Scientific Knowledge for Climate Adaptation, Mitigation and Risk Management [M]. WMO/TD-No. 1499, Geneva, Switzerland: World Climate Research Programme, 56pp.
- WCRP. 2010b. 世界气候研究计划 2010–2015 年执行计划 [M]. 北京: 气象出版社, 64pp. The World Climate Research Programme. 2009b. The World Climate Research Programme Implementation Plan 2010–2015 [M]. WMO/TD-No. 1503, Geneva, Switzerland: World Climate Research Programme, 43pp.
- Weng Hengyi, Ashok K, Behera S K, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer [J]. *Climate Dyn.*, 29: 123–129.
- Weng Hengyi, Behera S K, Yamagata T. 2009. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events [J]. *Climate Dyn.*, 32: 663–674.
- 吴国雄, 李建平. 2005. 亚洲季风区海—陆—气相互作用对我国气候变化的影响 (4 卷) [M]. 北京: 气象出版社. Wu Guoxiong, Li Jianping. 2005. *Air–Sea–Land Interactions in Asia Monsoon Region and Their Impacts on the Climate Variation in China (4 Volumes)* [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 吴国雄, 李建平, 周天军, 等. 2006. 影响我国短期气候异常的关键区: 亚印太交汇区 [J]. 地球科学进展, 21 (11): 1109–1118. Wu Guoxiong, Li Jianping, Zhou Tianjun, et al. 2006. The key region affecting the short-term climate variations in China: The joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean [J]. *Adv. Earth Sci. (in Chinese)*, 21(11): 1109–1118.
- Wu Guoxiong, Guan Yue, Liu Yimin, et al. 2012a. Air–sea interaction and formation of the Asian summer monsoon onset vortex over the Bay of Bengal [J]. *Climate Dyn.*, 38: 261–279, doi:10.1007/s00382-010-0978-9.

- Wu Guoxiong, Liu Yimin, Dong Buwen, et al. 2012b. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: I. Formation [J]. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-012-1334-z.
- Wu Guoxiong, Liu Yimin, He Bian, et al. 2012c. Thermal controls on the Asian summer monsoon [J]. *Sci. Rep.*, 404: doi:10.1038/srep00404.
- 吴立新, 刘秦玉, 胡敦欣, 等. 2007. 北太平洋副热带环流变异及其对我国近海动力环境的影响 [J]. *地球科学进展*, 22 (12): 1224–1229.
- 吴利新, 刘秦玉, 胡敦欣, 等. 2007. 变性副热带环流与我国近海动力环境 [J]. *地球科学进展*, 22 (12): 1224–1229.
- Wu Lixin, Liu Qinyu, Hu Dunxin, et al. 2007. Variability of the subtropical gyre in North Pacific and its impacts on dynamic environment of China marginal seas [J]. *Adv. Earth Sci. (in Chinese)*, 22 (12): 1224–1229.
- 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 2006. 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转 [J]. *科学通报*, 51 (14), 1717–1724.
- Wu Zhiwei, Li Jianping, He Jinhai, et al. 2006. The large-scale atmospheric singularities and the summer long-cycle droughts-floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 50 (16): 2027–2034.
- Wu Zhiwei, Li Jianping, He Jinhai, et al. 2006. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid- and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L05813, doi:10.1029/2005GL024487.
- Wu Zhiwei, Wang B, Li Jianping, et al. 2009a. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D18120, doi:10.1029/2009JD011733.
- Wu Zhiwei, Li Jianping, Wang Bin, et al. 2009b. Can the Southern Hemisphere annular mode affect China winter monsoon? [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D11107, doi:10.1029/2008JD011501.
- Wu Zhiwei, Jiang Zihong, Li Jianping, et al. 2012d. Possible association of the western Tibetan Plateau snow cover with the decadal to interdecadal variations of northern China heatwave frequency [J]. *Climate Dyn.*, 39: 2393–2402, doi:10.1007/s00382-012-1439-4.
- Wu Zhiwei, Li Jianping, Jiang Zihong, et al. 2012e. Possible effects of the North Atlantic Oscillation on the strengthening relationship between the East Asian summer monsoon and ENSO [J]. *Int. J. Climatol.*, 32: 794–800, doi:10.1002/joc.2309.
- Wu Zhiwei, Li Jianping, Jiang Zihong, et al. 2012f. Modulation of the Tibetan Plateau snow cover on the ENSO teleconnections: From the East Asian summer monsoon perspective [J]. *J. Climate*, 25: 2481–2489.
- 肖栋, 李建平. 2011. 皮纳图博火山爆发对20世纪90年代初平流层年代际变冷突变的影响机理 [J]. *科学通报*, 56 (4–5): 333–341.
- Xiao Dong, Li Jianping. 2011. Mechanism of stratospheric decadal abrupt cooling in the early 1990s as influenced by the Pinatubo eruption [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 56: 772–780, doi:10.1007/s11434-010-4287-9.
- Xie Fei, Tian Wenshou, Austin J, et al. 2011. The effect of ENSO activity on lower stratospheric water vapor [J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11: 4141–4166.
- Xie Fei, Li Jianping, Tian Wenshou, et al. 2012. Signals of El Niño Modoki in the tropical tropopause layer and stratosphere [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12: 5259–5273.
- 徐寒列, 李建平, 冯娟, 等. 2012. 冬季北大西洋涛动与中国西南地区降水的不对称关系 [J]. *气象学报*, 70 (6): (印刷中).
- Xu Hanlie, Li Jianping, Feng Juan, et al. 2012. The asymmetric relationship between the winter NAO and precipitation in Southwest China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70 (6): (in press).
- 薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 401–408.
- Xue Feng. 2005. Influence of the Southern Hemisphere circulation on East Asian summer monsoon [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 10 (3): 401–408.
- 闫长香, 朱江. 2011. 集合最优插值中的样本选取 [J]. *气候与环境研究*, 16 (4): 452–458.
- Yan Changxiang, Zhu Jiang. 2011. Choice of ensemble members for ensemble optimal interpolation [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 16 (4): 452–458.
- 杨永增, 孙玉娟, 王关锁, 等. 2011. 基于MASNUM海浪预报系统的北印度洋波浪特征模拟与预报分析 [J]. *海洋科学进展*, 29 (1): 1–9.
- Yang Yongzeng, Sun Yujuan, Wang Guansuo, et al. 2011. Analyses for modeling and forecast of sea waves in the North Indian Ocean by means of MASNUM wave forecast system [J]. *Adv. Mar. Sci. (in Chinese)*, 29 (1): 1–9.
- 宇婧婧, 刘屹岷, 吴国雄. 2011. 冬季青藏高原上空热状况的分析——II 年际变化. *气象学报*, 69 (1): 89–98.
- Yu Jingjing, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2011. An analysis of the diabatic heating characteristic of atmosphere over the Tibetan Plateau in winter. II: Interannual variation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (1): 89–98.
- Zhang Li, Li Jianping. 2008. Seasonal rotation features of wind vectors and application to evaluate monsoon simulations in AMIP models [J]. *Climate Dyn.*, 31 (4): 417–432, doi:10.1007/s00382-007-0327-9.
- Zhang Wenjun, Li Jianping, Zhao Xia. 2010. Sea surface temperature cooling mode in the Pacific cold tongue [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: C12042, doi:10.1029/2010JC006501.
- Zhang Wenjun, Jin F F, Li Jianping, et al. 2011. Contrasting impacts of two-type El Niño over the western North Pacific during boreal autumn [J]. *J. Meteor. Soc. Jap.*, 89 (5): 563–569.
- Zhang Wenjun, Jin F F, Ren Hongli, et al. 2012. Differences in teleconnection over the North Pacific and rainfall shift over the USA associated with two types of El Niño during boreal autumn [J]. *J. Meteor. Soc. Jap.*, 90 (4): 535–552.
- Zhao Xia, Li Jianping. 2010. Winter-to-winter recurrence of SSTAs in the Northern Hemisphere [J]. *J. Climate*, 23: 3835–3854, doi:10.1175/2009JCLI2583.1.
- Zhao Xia, Li Jianping. 2012. Winter-to-winter recurrence and non-winter-to-winter recurrence of SST anomalies in the central North Pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 117: C05027, doi:10.1029/2011JC007845.
- Zhao Xia, Li Jianping, Zhang Wenjun. 2012. Summer persistence barrier of sea surface temperature anomalies in the central western North Pacific [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (6): 1159–1173, doi:10.1007/s00376-012-1253-2.
- 郑菲, 李建平. 2013. 前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理 [J]. *地球物理学报*, 55 (11): 3542–3557.
- Zheng Fei, Li Jianping. 2013. Impact of preceding boreal winter Southern Annular Mode on spring precipitation over South China and related mechanism [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 55 (11): 3542–3557.