

国际气候与环境科学中心 2013 年度科研进展

一、主要科研进展

在科研进展及研究成果方面，2013 年度国际气候与环境科学中心在地球系统动力学模式研制和数值模拟、气象与环境预测及灾害评估理论和方法、资料同化理论和方法，以及地球系统科学理论与自然控制论研究等相关领域取得了如下一系列重要进展：

(一) 地球系统动力学模式研制和数值模拟

在中国科学院战略性先导科技专项“气候模式模拟和预估中的不确定性问题”、全球变化 973 项目“生态和环境过程模式的研制与改进”以及“高分辨率气候系统模式的研制与评估”的支持下，在大气、海洋、陆面水文、植被生态动力学模式等地球系统分量模式及相应的耦合模式方面取得了重要的进展，主要有：

1. 大气环流模式及其性能检验

(1) 高分辨率 IAP 大气环流模式的研发

高分辨率（ $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ）大气模式对内存要求较高，之前的版本仅能在内存很大的胖节点机器上运行，所能利用的核数有限，不能胜任长时间的模拟运行。本年度针对该问题对模式代码进行了优化，包括使用动态数组，用一维数组代替三维数组等，并修改了程序的一些 bug。优化之后的版本可以在天津超算以及中科院网络中心的超级计算机的普通刀片节点上运行。此外，之前的版本还存在并行效率偏低的不足，本年度对之前的版本进行了改进，主要采用数据打包的方法来减少数据通讯的时间。经过对 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 版本的详细测试，该版本在使用 1024 个 CPU 核时，加速比达到了 204，并行效率为 0.2。

对最新版本的高分辨率大气环流模式，采用气候态的海温强迫完成了 3 年的气候态积分试验，并与粗分辨率版本（ $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ ）的模拟结果进行了比较。初步结果表明，高分辨率模式对部分变量（如高度场，年平均降水等）的模拟性能要优于粗分辨率模式。

(2) IAP AGCM4.1 的调试和运行

上年度已经在技术上实现了 IAP AGCM4.1 在中科院地球系统模式（CAS-ESM）框架下的安装与运行。初步的 AMIP 试验结果表明，模式模拟的模式顶以及地表

的净辐射通量存在 6 W/m^2 的结余。进一步的分析表明，造成能量不平衡的主要原因是模式模拟的云量，尤其是低云云量偏少，从而造成对短波的反射率降低，从而到达地表的短波辐射增加，造成能量的结余。为了降低这一偏差，我们将模式中低云的相对湿度阈值从 0.8975 调低至 0.85，从而增加了低云云量，模式顶以及地表的净辐射通量结余也减少至 0.3 W/m^2 。此外，我们对模式中的其他参数也进行了一定的调试和优化。我们对优化后的版本进行了 25 年的 AMIP 积分试验，通过与 CAM5 的比较，初步结果表明 IAP AGCM4.1 的总体性能优于 CAM5。

(3) IAP 大气环流模式中不同积云参数化方案对 MJO 模拟的影响研究

利用 IAP AGCM4.0 模式，采用三种不同的积云对流参数化方案：Zhang-McFarlane (简称 ZM) 方案，修改后的 Zhang-McFarlane (简称 MZM) 方案及 Emanuel (简称 EMA) 方案，分别进行 30 年的 AMIP 积分，积分时段为 1979-2008 年，分析了模式对 MJO 的模拟能力，及其不同积云对流参数化对模式模拟结果的影响。分析表明，三种不同对流参数化方案均对 MJO 有一定的模拟能力，其中方案 MZM 方案模拟的结果也观测最为接近，基本上可以模拟出与观测相似的季节内振荡，但在高频部分强于观测；从纬向波数可以说，OLR 的波数夏季主要集中在为 1-2，模式模拟的波数范围相对观测更为集中。相比之下，EMA (图 1b) 和 ZM 方案模拟效果较差。总体看来，模式模拟的 MJO 强度与观测相比要偏小，且西移波和观测相比也更强。与夏季结果类似，三种对流参数化方案均对冬季的 MJO 有一定的模拟能力，模式模拟的 MJO 强度与夏季情况相比与观测强度更弱，且西移波和观测相比也略强。

针对赤道地区 ($10^{\circ}\text{N}-10^{\circ}\text{S}$) 850hPa 纬向风距平与印度洋地区 ($10^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{E}-100^{\circ}\text{E}$) 降水时间滞后-经度相关分析，分析了不同对流参数化方案对 MJO 传播特征的模拟能力。研究结果表明，三种对流参数化方案均对 MJO 夏季的传播特征有一定的模拟能力，其中 MZM 方案模拟的结果最好，基本上模拟出了 MJO 传播的主要特征，但在西半球传播速度略慢；EMA 方案次之，但模拟的 MJO 传播速度较快，范围也略小，降水的传播特征与观测也有一定的差异；ZM 方案模拟效果最差，模拟的 MJO 传播不连续，且传播范围也相比观测也小很多，与观测结果差异较大。冬季结果与夏季类似，但传播特征特别是降水的传播比夏季要差很多。

(4) IAP AGCM4.0 对太阳活动变化的模拟能力

设计了两组试验来研究太阳活动变化对全球辐射强迫及气候模拟的可能影响。两组试验的地球轨道参数均设为 1950 年时的值，下边界采用 HadISST 逐月海温及海冰分布，外强迫包括温室气体、气溶胶、臭氧、太阳常数等。两组试验分别取名 S1367 试验与 S1361 试验：S1367 为参照试验，太阳常数取 1367 W m^{-2} ；S1361 为敏感性试验，太阳常数取 1361 W m^{-2} ，此数值根据 SORCE 卫星上太阳总

辐照度监测仪 TIM 的测量结果给出 (Kopp and Lean, 2011)。两组试验积分步长均为 10 分钟, 共积分 31 年 (1978~2008), 这里重点分析后 30 年 (1979~2008) 的结果。

在冬季 (12~2 月), 当太阳常数从 1367 W m^{-2} 减小至 1361 W m^{-2} 后, 大气顶入射太阳辐射在全球范围内均为减少, 全球平均减少 1.54 W m^{-2} , 其中南半球中高纬地区显著减少 2.15 W m^{-2} 。大气顶与地表净短波辐射在不同区域有增有减, 海洋上主要为减少, 陆地上北美、西西伯利亚、中东以及澳洲东部则出现增加, 与这些地区云量减少相一致; 地表温度在全球范围内平均降低约 0.05°C , 其中北美南部、南美南部、非洲东部与南部、澳洲西部以及亚欧大陆地表温度均为降低, 其中亚欧大陆最大降温幅度达 2°C 以上。澳洲大陆降水呈现减少, 一方面与“澳洲大陆地表潜热通量 (蒸散发) 减少, 海-陆水分循环减弱, 从而水汽源减少”有关, 另外也与“北澳夏季风减弱, 澳洲大陆西北部低层流场形成一个反气旋式环流偏差, 导致对流上升运动减弱”相关联。

(5) 多模式集合预测能力的年代际差异研究

基于 1980 年左右中国气候出现的一个明显变化, 考察了 1960-1980 年和 1981-2001 年的多模式集合平均 (MME) 的预测能力的年代际差异。本研究采用了 NCEP/NCAR 全球月平均再分析资料集中的地面气温和 500 hPa 高度场数据作为观测资料与模式预测结果进行对比分析。

第一阶段 (1960-1980) 模式预测与观测的 500 hPa 高度场的相关在四个季节均小于第二阶段对应阶段的相关, 第一阶段预测与观测的相关仅在赤道地区通过了 95% 的信度检验; 第二阶段 (1981-2001) 预测与观测的相关在赤道至中纬度的大部分地区通过了 95% 的信度检验。就两个阶段的地面气温而言, 第一阶段的相关系数比第二阶段偏小。第二阶段预测与观测的相关在四个季节的中国大部分地区均为正相关, 尤其在夏季和秋季。本研究进一步对比分析了两个阶段模式的潜在可预报性。

2. 海洋环流模式的研制

(1) 高分辨率全球大洋环流模式的发展

基于混合坐标海洋模式 Hycom 建立了一个高分辨率全球大洋环流数值模式, 模式区域为 ($80^{\circ}\text{S} \sim 90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\text{E} \sim 360^{\circ}\text{E}$), 水平网格采用旋转极点投影的正交曲线网格, 投影极点分别设在 (50°N , 80°E) 和 (-90°N , 80°E), 分辨率约为 $4 \sim 30\text{km}$ (平均分辨率为 $1/4^{\circ}$), 垂直方向采用 $z-\rho-\sigma$ 混合坐标, 共分为 30 层。

目前模式已能运行超过 20 年，模式较好地再现了世界大洋的主要流系，大洋恒定温跃层、热带海温分布、赤道流系、西边界流系等结构特征和观测结果吻合；大洋涡旋主要集中在强流区等。

(2) 基于一个中等复杂程度耦合模式，发展了一个热带太平洋盐度模型用于改进模式的 ENSO 预测：

原有的中等复杂程度耦合模式缺失了模拟海洋盐度的变化，为了能进一步地将热带太平洋盐度变化对 ENSO 演变的反馈机制考虑到 ENSO 预测中，我们依据中等复杂程度耦合模式中对海表温度分量的控制方程，完成编写了海表盐度的控制方程，并与中等复杂程度耦合模式嵌套起来，实现了海表盐度的模拟。

通过合理地考虑对影响海表盐度变化的物理过程的描述，保证了耦合模式对海表盐度的合理模拟。模拟得到的 SSSA 在赤道地区的年际变化与 SSTA 的变化是一致的，证明了热带太平洋盐度模型的合理性。未来工作将进一步地考虑海表盐度变化对 ENSO 演变的反馈机制，进一步地完善热带太平洋的 ENSO 模拟和预报。

(3) 基于经验的热带太平洋大气模式，重新构建了用于气候研究的 153 年次表层资料：

基于热带太平洋地区的海表温度（SST）与次表层海温场存在密切的物理联系，利用历史的 SST 观测资料重新构建了过去 153 年的次表层海温资料。对资料的检验结果表明，重构的次表层海温资料与三种观测的/模拟的次表层海温资料在最近 50 年有着很好的相关和较小的均方根误差。同时用重构的次表层海温资料驱动一个海洋模式得到的海表温度异常的模拟，能够真实地反映 ENSO 的年际和年代际变率。表明了该长时期的次表层海温资料能够用于气候研究，特别是大尺度的年际和年代际气候变化研究。

3. 陆面过程模式及陆气相互作用研究

(1) 系统评估 CLHMS 陆面水文耦合模式对淮河流域水文过程模拟的不确定性【

基于陆面水文耦合模式 CLHMS，采用最新的高分辨率 CFSR 再分析资料以及观测降水、气温资料，通过设计了三组不同降水强迫驱动数值试验，对淮河流域 1980~2003 年共 24 年的水文水循环过程进行了模拟，考察了不同降水强迫、以及不同随机时间降尺度方法对 CLHMS 模式模拟结果的影响，并分别利用实测流量、还原后的天然流量系统评估了 CLHMS 陆面水文模式对淮河流域水文过程的模拟能力。

总体说来 CLHMS 模式对淮河流域水文过程具有良好的模拟能力，CLHMS 对淮河流域河道流量的模拟空间分布可以准确地反映淮河水系的主要分布，模拟流量的季节变化也和淮河流域降水的季节变化相一致。进一步分析表明，对降水偏多的湿润年份，CLHMS 模式对流域的水量平衡以及河道流量的季节、年际变化有更

好的模拟能力，然而模式对偏早年水文水循环过程的模拟存在着较大的偏差，此外 CLHMS 模式对淮河流域水文过程的模拟技巧还具有显著的年代际差异，相对而言模式在 1980 年代的模拟能力较强，而对 1990 年代淮河流域水文过程的模拟能力则相对偏低。基于不同降水强迫的三组数值试验比较结果进一步证实了降水是水文模拟不确定的最主要来源之一，不同的降水解集方法对模拟试验的结果同样具有相当重要的影响。

(2) CLM4 陆面过程模式对淮河流域径流深的模拟能力评估

基于 CLM4 50 年的离线数值模拟结果，系统考察了 CLM4.0 对淮河流域径流深的模拟能力，其中选取的水文站点为淮河流域王家坝、蚌埠站和中渡站三个水文站。评估结果表明：(1) 从空间分布上看，在淮河流域，CLM4 模拟值相对于全球径流数据中心 (GRDC) 提供的合成径流深数据要相对偏大，尤其是在中上游区域，最大偏差达到 1 mm day^{-1} 左右 (图 2)；(2) 从年际变化上看，在王家坝站、蚌埠站控制的集水面积以及中渡站以上集水区域，模式均能一定程度地再现逐月径流深的变化趋势 (相关系数 PMC 较高)，但多年平均模拟径流深均大于同期的实测和天然径流深，此外模式对峰值的模拟能力还有待加强 (效率系数 NSI 较低)。

(3) CMIP5 模式对东亚区域降水及径流的模拟能力评估

分析评估了 CMIP5 模式对当前东亚区域 (15° - 55°N , 70° - 140°E) 降水和径流的模拟能力，其中降水观测数据采用 GPCP v2.2 的全球网格化降水 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 分辨率数据，时间范围为 1979 年至今，这里取 1980-2004 共 25 年的数据作为当前气候的观测数据与 CMIP5 模拟结果进行对比；径流观测数据取自 GRDC 合成径流数据集，空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ，时间范围为 1986-1995 年。评估结果表明：(1) 所有模式均能刻画出东亚降水全年各月的变化情形，但多数模式存在夏季模拟雨量偏低、冬季偏高的偏差，模式集合平均比绝大多数单个模式更接近观测水平，较好地抓住了“7 月降水最多、8 月略低”的特征；(2) CMIP5 模式能够刻画出东亚径流“夏多冬少、春秋过渡”的总特征，但多数模式模拟的 2-7 月径流量值低于观测值，其它月份量值则高于观测值。模式集合平均虽然成功地模拟出 8 月份的径流峰值，但在 3-6 月，集合平均量值明显比观测偏高，7-12 月量值则比观测偏低，只有 1 月和 2 月与观测吻合。此外还发现，GRDC 数据显示东亚径流 8 月达到峰值，而降水峰值在 7 月，所以东亚径流总体属于“降水补充型”。

(4) 以淮河流域为重点研究对象，定量分析了不同再分析资料对陆面-水文耦合模式 CLHMS 模拟结果的影响。

以我们自主研发的陆面水文耦合模式 CLHMS 为模式工具，在淮河流域开展了 24 年 (1980-2003) 的长期积分试验。模式采用 $20\text{km}\times 20\text{km}$ 的网格分辨率，降水采用中国区域站点日降水观测资料，其它要素驱动场分别采用一日 4 次 CFSR

再分析资料 (T382) 和 NCEP R1 (T62) 再分析资料, 探讨了不同再分析资料对模式模拟结果的影响。分析结果表明, 更为精细准确的大气强迫场可以在一定程度上提高模式对流域水文水循环过程的模拟能力。分析结果表明, CFSR 驱动的模拟流量和观测降水在 1980-1989 年的时间相关达 0.49, 在 1990-2003 年的时间相关达 0.45, 说明模式对降水等气候强迫因素的综合响应能力很好。用 CFSR 驱动的模拟结果和观测流量在 1980-1989 年的时间相关达 0.95, 在 1990-2003 年的时间相关达 0.89, 均比用 NCEP 驱动的模拟结果有一定改进。通过评估 CLHMS 的各项模拟性能指标可以看到, 模式对 80 年代的水量平衡模拟比 1990 年以后的好; 对偏湿年份的水量平衡模拟比偏干年份好; 模式对 80 年代以及偏湿年份的流量的年际变化模拟较好, 而对偏干年份的流量年际变化模拟较差。干旱年份的模拟结果较差的主要原因在于地表水拦蓄使用和地下水抽取等人类活动对地表水、地下水系统的影响, 如农业取水灌溉、工业用水等。

(5) 构建可用于气候模拟的陆面覆盖数据

基于 2000 年中国区域 1 km 栅格土地利用数据, 得到 0.50×0.50 分辨率的中国区域城市下垫面覆盖数据, 并与公用地球系统模式 CESM 全球陆面覆盖数据相融合, 进而构建了一套既反映了中国城市下垫面信息、又可用于气候模拟的陆面覆盖数据 (命名为 U2000 数据)。通过与 CESM 默认的陆面覆盖数据相比较, 表明默认数据一定程度地低估了我国山东、江苏及安徽等省市的城市化水平, U2000 数据较好地修正了这一不足。

设计了两组试验来研究城市地表反照率变化对全球城市热岛及气候模拟的影响及可能机制。两组试验均应用相同海温及海冰场作下边界条件运行大气环流模式 CAM5, 且考虑了人为热对城市热岛的贡献。两组试验分别取名 CTL 试验与 ALB 试验: CTL 为参照试验, 城市地表反照率采用默认设置; ALB 为敏感性试验, 城市不透水路面和屋顶的反照率分别增加 0.15 和 0.25, 其余设置同 CTL 试验。ALB 试验与 CTL 试验结果之差表明: 无论冬季或夏季, 城市地表反照率增加使得城市热岛效应显著减弱; 相较于夜间城市热岛, 城市地表反照率增加后将更有助于日间城市热岛的减缓; 在夏季, 城市热岛减弱后, 空调排放废热也有所减少; 在冬季, 我国东部采暖排放废热出现减少, 而欧洲大陆采暖排放废热略有增多, 这可能与夜间城市热岛略有增强有关; 城市地表反照率增加后, 欧洲大陆地表气温出现增加, 这与相应的“云量减少、降水减少”具有较好的关联。

(6) CESM 对中国区域整体及典型城市群区的城市气候效应的模拟研究

采用 CESM (版本 1.0.3) 开展了城市热岛效应的数值模拟研究, 考察了模式对城市热岛效应的模拟能力。并根据城市化发展水平及模拟的城市热岛 (记为

UHI) 空间分布并参考国内基于观测分析的工作, 将中国区域分成 5 个区, 然后就模拟的 UHI 气候平均、季节循环及年际变化等展开分析, 结果表明: I) 从气候平均而言, 模拟的夜间城市热岛要强于日间城市热岛, 且冬季强度明显偏强; II) 从季节循环而言, 模拟的夜间城市热岛随季节变化显著, 且与城市热岛变化具有较好的同步性。东北、华北和京津冀地区夜间城市热岛在冬季显著加强, 长三角和珠三角地区夜间城市热岛则在夏、秋季增强较快; III) 从年际变化而言, 夜间 UHI 具有较大的年际变化, 而日间 UHI 基本不随年份变化。由于采用了静态的城市覆盖率数据进行模拟, 夜间 UHI 没有呈现上升趋势, 珠三角和长三角地区甚至出现了下降趋势

4. 全球植被动力学模式

(1) 植被生态-大气相互作用参数化方案改进及气候系统模式的耦合集成

改进群体动力学光竞争及萌衍参数化方案。在原光竞争方案采用的树-灌木-草等级基础上, 进一步取不同植物功能型受其它植物的遮荫系数与植物高度成指数反比, 并对光分配进行归一; 同时将不同植物类型的萌衍竞争改为树-草-灌木等级, 并考虑格点最大萌衍率随气候条件(降水、温度)变化。

实现了改进后全球植被动力学模式(IAP-DGVM)与中科院气候系统模式的陆表分系统模式(CoLM)的代码耦合及调试, 并初步进行全球植被分布模拟评估。

(2) 陆面产品的全球陆表变化示范研究

参考生态学已有物候理论, 建立了基于叶面积指数的叶子物候的统计模型, 并确定以物候气候态匹配每年实际物候期的方案; 使用物候模型, 生产了基于项目叶面积指数产品的不同分辨率的全球物候数据集; 分析物候的空间特性, 并进行物候数据在全球变化研究的应用示范, 如物候的全球及区域分布特征格局及变化。

进行了陆表特征参量产品在地球系统模式中的应用示范: 利用多年 LAI 数据生成用于地球系统模式模拟的陆表状态参数数据, 并进行陆表过程模式离线模拟及陆表-大气耦合模式模拟, 研究其对地表气温、对流层气温、降水等气候因素的多年平均值、变化趋势、年际变化等的影响。

(3) 植被生态系统群体结构的统计动力学模型的建模与计算方法研究

建立具有年龄结构的群体竞争/共存的理论模型: 首先针对生态学经典资源竞争模型(莫诺模型)的不足, 引入生长的自抑制现象, 使得模型理论上可允许无穷多物种共存, 且优势物种随资源供给率上升而逐渐变化。然后引入个体年龄特征, 使个体的生长率、死亡率以及个体形态特征均为年龄的函数, 并引入课题组发展的光竞争方案, 建立单个物种/群体年龄结构演化的动力学方程组。该模

型可很好地再现群体的年龄结构分布特征。

空间非均匀性与生态系统结构的参数化表达：首先分析气候/环境空间非均匀性特征及其与植被生态系统多样性的关系，发现植物多样性与降水场或降水/温度组合场非均匀性的大值区大致吻合；以此为基础建立了物种分布随气候变化的概念模型，考虑区域内降水分布的方差可较好提高对植被分布的模拟。其次在草原动力学理论模型中，考虑不同物种具有不同的叶/根比，隐式考虑荒漠-草原过渡带植被斑块结构等小尺度植被非均匀性现象，具有较小叶/根比的物种更适宜在相对干旱的条件下生存，而在相对湿润的区域叶/根比较大的物种占有优势。

(4) CO₂ 浓度及动态植被对碳循环模拟的影响

选取了国际耦合模式比较计划 (CMIP5) 中的 8 个地球系统模型进行评估，包括过去 150 年的历史模拟 (1850-2005) 和 RCP4.5 情景下的未来 100 年的模拟。主要关注的是陆气间净 CO₂ 通量及陆地碳循环的其他分量，以及它们与气候变量 (温度，降水和土壤湿度) 间的关系。21 世纪各陆地碳通量 (除了净生态系统生产力，NBP) 均加速增长。在所有模式里陆地截止到 2100 年均起着碳汇的作用，其中大部分模式显示热带和寒带地区为最大的碳汇。尽管大部分模式没有包含重要的氮循环过程，大部分地球系统模式在不同生物群落模拟的微生物呼吸与观测接近。包含氮循环的一些模式如 CLM4 在寒带地区的模拟需要改进。气候条件、植被状况和土壤状况对该呼吸量年均值有着较大影响，但是模式中这些影响偏大，意味着某些重要过程尤其是土壤中的过程在目前的模式里有所缺失。

在 CLM-CN 框架下研究了动态植被 (DV) 的影响：DV 通过降低氮限制了 CO₂ 的施肥效应，通过矿化作用弱化了变暖对生态系统生产力的积极作用。当分析时间范围超过 80 年 (即在 RCP8.5 情景下模拟至 2100 年)，碳循环对 CO₂ 和温度的反馈系数接近于 0.52PgC ppm⁻¹ 和 -50PgC K⁻¹。此情景下碳源主要来自升温导致的寒带森林的消亡而碳源来自于施肥效应导致的热带生产力的增加。这两种反馈系数的不确定性有 5~10% 来自于 CO₂ 和温度的交互作用 (泰勒展开的二阶项)，而且对碳循环-CO₂ 反馈系数来说这种不确定性更小。

5. 沙尘气溶胶模式

(1) 基于 NCAR 地球系统模式 (CESM) 的沙尘起沙过程改进

在 CESM 中引入了更具有物理基础的 Shao04 起沙参数化方案, 然后分别利用耦合了 Shao04 起沙方案以及模式原有的 Zender03 起沙方案的 CESM 地球系统模式对 2010 年 3 月 19~22 日发生在东亚地区的一次典型沙尘暴天气过程进行了模拟试验, 并将模拟结果与多种观测资料进行了比较。分析结果表明, 采用 Shao04 方案模式能较合理地模拟出沙尘的起沙区域及起沙强度的时间变化, 模式模拟的沙尘天气演变过程、以及源地附近及下游地区测站沙尘浓度的量值及其时间变化特征与观测较为接近; 从模式模拟的沙尘浓度的空间分布及时间变化来看, Shao04 方案下的模拟结果均明显优于模式原有的 Zender03 方案下的模拟结果。进一步地, 将 Zender03 方案采用与 Shao04 方案一致的潜在沙源分布 (称为 Zender03_New) 同样进行模拟, 结果表明, Zender03_New 相比于 Zender03 方案, 模拟能力有所改进, 但总体上仍较 Shao04 方案差, 说明了 Shao04 方案对沙尘起沙过程模拟的改进。

(2) 应用改进后的 CESM 对全球沙尘气溶胶循环和直接辐射强迫进行模拟

利用改进后的 CESM (即耦合了 Shao04 起沙方案的 CESM) 对全球沙尘循环进行了模拟试验, 试验中采用观测的海温和海冰覆盖驱动模式, 从 1979 年 1 月 1 日开始积分 27 年, 分析了 1981~2005 年共 25 年的模拟结果。与观测的对比表明, 模式能较好地模拟出全球主要的沙尘分布带以及起沙源地, 合理地再现了全球沙尘循环的基本特征, 包括年平均和季节变化。模拟的全球起沙量为 3546.4 Tg yr⁻¹, 其中 0.1~1 μm 粒径档沙尘起沙量为 180.8 Tg, 占总起沙量的 5.1%。模拟的全球沙尘总柱含量、干沉降量、湿沉降量、生命期和光学厚度分别为 27.2 Tg、2119.8 Tg、1427.9 Tg、2.8 天和 0.0296, 其中湿沉降量占总沉降量的比重是 40.3%, 这些模拟结果在 AeroCom 沙尘模式比较计划多模式结果的变化值之间。从不同源区对全球总起沙量的贡献来看, 北非是最大的源区, 起沙量为 1541.7 Tg, 占全球起沙量的 43.5%; 东亚也是重要的源区, 起沙量为 398.6 Tg yr⁻¹, 占全球总起沙量的 11.2%。

进一步利用改进后的 CESM 进行 5 年的气候态积分试验, 分析沙尘气溶胶的直接辐射强迫。在大气顶, 模拟的全球平均沙尘短波和长波辐射强迫分别为

-0.029 W m⁻² 和 0.118 W m⁻²; 在地表, 沙尘气溶胶的短波和长波辐射强迫分别为 -1.585 W m⁻² 和 0.476 W m⁻², 净辐射强迫为 -1.109 W m⁻², 表明了沙尘气溶胶具有明显的冷却效应。

6. CAS-ESM 模式的发展和评估

(1) CAS-ESM 中不同分量模式的耦合研究

目前, CAS-ESM 中包含 8 个分量模式, 有些分量模式还包含不同的选项。每个分量模式都实现了各自的离线运行。而不同分量模式的相互耦合工作正在进行当中, 并取得了初步的进展, 其中, 我主要负责完成了大气模式 IAP AGCM4.1 与相同分辨率的陆面模式 CLM4 以及 CoLM 的耦合, 以及大气模式 IAP AGCM4.1, 陆面模式 CLM4, 海洋模式 POP2, 海冰模式 CICE4 的耦合。以上两个耦合版本都完成了 15 年以上的模拟试验, 初步的分析表明试验结果是合理的, 但某些方面仍存在一定的偏差, 需要进一步的调试优化。

(2) CAS-ESM 对 ENSO 循环和冰岛低压-阿留申低压关系的模拟能力

本研究利用中国科学院气候系统模式 (CAS-ESM-C) 200 多年的参照试验积分结果, 评估了该模式对 ENSO 循环的模拟能力。结果表明, 模式能合理再现热带太平洋海表温度的季节循环和年际变率的极大值中心, 对 ENSO 季节锁相的模拟也较为理想。此外, 模式还较好模拟了 El Niño 发生的两个必要条件, 即赤道西太平洋的暖水堆积和西风异常。但由于副热带北太平洋经向风强迫过强, 导致西风异常更为显著; 加之温跃层偏浅、倾斜程度较弱, 使得暖水东传过程偏快, El Niño 发展过程较为迅速。而在衰减过程中, 由于模拟的 El Niño 普遍偏强, 热带大气对东太平洋增暖的 Gill 型响应较为频繁, 赤道西太平洋出现东风异常。同时, Ekman 抽吸抬升了西太平洋的温跃层, 暖池出现冷异常, 二者共同作用导致了 El Niño 衰减成为 La Niña。模式中 ENSO 周期偏短、振幅偏大, 这与赤道太平洋温跃层偏浅有关。温跃层偏浅将导致上层海洋中质量和热量的再分配迅速完成, 并通过海气通量交换使得大气环流发生更为显著的异常, 进而导致模式中 ENSO 发生过于频繁。

基于最新发展的中国科学院气候系统模式 (CAS-ESM-C), 考察了冰岛低压-阿留申低压的跷跷板关系 (AIS) 及其年代际变化。结果表明, CAS-ESM-C 不仅能合理再现北半球冬季海平面气压的气候态分布, 同时还能更好地把握 AIS

及其年代际变化。此外，通过将模式积分时段 496-535 年分为 496-515 年和 516-535 年两个时段，发现 AIS 的年代际变化源于 PDO 由负到正的位相转换。伴随这种变化，赤道东太平洋和北太平洋分别出现增暖和变冷，北太平洋和北大西洋中纬度地区西风随之减弱，从而导致向下游的 Rossby 波能量频散减弱，并进一步弱化了 AIS 关系。

(二) 气象与环境预测及灾害评估理论和方法

1. 组织大气所短期气候预测会商，代表大气所参加国家气候预测会商

- (1) 组织大气所短期气候预测会商会，并在总结全体成员的预测意见的基础上撰写综合预测意见。2013 年度举行的会商会分别为 3 月份的汛期气候预测、6 月份的汛期补充会商、入梅预测会商会（6 月）以及 10 月份的 2013/2014 年度全国气候趋势预测会商会等。
- (2) 代表大气所参加气候中心举办的会商会，并发表预测意见，包括：汛期气候预测会商会（3 月）、南海夏季风爆发预测会商会（5 月）、入梅预测会商会（6 月）、盛夏气候预测会商会（6 月）和年度全国气候趋势预测会商会（10 月）。同时代表大气所参加黄委会-海委会联合举办的黄、海河长期预报会商会（6 月），并发表预测意见。
- (3) 将大气所的短期气候预测意见整理成书面材料，通过所办上报院办和国办。包括 3 月《汛期预测意见》、6 月的《汛期补充预测意见》、《盛夏我国降水趋势预测》、8 月的《南方高温和东北地区降水趋势预测意见》和《10 月年度气候预测意见》等，并对大气所的短期气候预测意见进行整理，形成了 9 期短期气候预测通讯。2013 年预测上报材料有三份为中办或国办采纳，分别为“中科院专家关于近期我国极端天气、气候灾害发生的趋势分析及建议”（2013 年 3 月 27 日），“中科院专家关于今年汛期全国降水趋势的补充预测”（2013 年 6 月 4 日），以及“中科院大气物理研究所预测我国南方地区未来十年可能频发夏季高温天气”（2013 年 9 月 18 日）。应中办约稿，完成了《2013 年夏季我国南方高温酷暑天气成因分析》，并上报院办和中办。
- (4) 代表大气所参加黄委会-海委会联合举办的黄、海河长期预报会商会（6 月），并发表预测意见。
- (5) 大型斜脊斜槽系统是引发我国冬季大范围持续性低温事件的关键影响系统。这是在前辈科学家的相关工作基础上获得的重要成果。通过监测和预测大型斜脊斜槽系统，给国家业务防灾减灾部门及气象部门提供重要

的科学依据。同时对春运等关键时段的交通完全部门的防范等工作提供了依据。同时，针对冬季大范围持续性低温事件，研究了其 1-2 周之前的前兆信号，为灾害性气象事件的监测及预测提供了依据。

2. 实时数值气候预测及预测系统发展

(1) 2013 年夏季异常气候的跨季度实时预测、补充预测及检验

检验表明，IAP 预测系统较好地预报出 2013 年夏季我国河套东部到华北西北部的多雨、长江中游和江南的少雨，但新疆南部的多雨区没有预测出来；系统也较好地预报出 2013 年夏季西太平洋副热带高压偏强、偏西的观测事实；2013 年预测东亚夏季风指数为 -0.02 。

(2) 利用 IAP 年度预测系统进行今冬至明年夏季的跨年度预测

对 2013 年冬季的气候趋势，系统预测东亚冬季风略偏强，东北、华北气温偏高、西南偏低，华南、西南降水偏多，东北、东南沿海降水偏少；综合今冬和明春的模式预测结果来看，2014 年春季北方沙尘气候正常略偏弱；对 2014 年夏季气候，系统预测东亚夏季风正常略偏强，黄淮、华南西部降水较常年略偏多，气温北方略偏高。

(3) IAP 季度水文预测系统的建立及其初步应用

基于 CFSv2 气候预测系统以及 CLHMS 陆面水文耦合模式，发展了相应的大气集合预处理分系统和水文集合预报评估分系统，初步建立了以流域月平均一季节平均的河道流量为预测变量的淮河流域动力学季度水文集合预测系统 SHEPS。对大气集合预处理系统的评估发现，前处理方法比较有效地改进了气候预测系统的回报 CFSRR 的概率分布并排除了预报年的非相似年份，从而提高了对淮河流域夏季降水和气温的预报技巧，并显著减小了 CFSRR 对淮河流域夏季降水和气温的负偏差。

利用 SHEPS 季度水文预测系统，结合气候预测结果，开展了淮河流域超前 1~6 个月的 25 年（1982~2006 年）CFSv2 和 ESP 集合回报试验，系统考察了 SHEPS 对淮河流域河道流量的季度预测技巧。回报结果表明：SHEPS 系统的集合平均预报对淮河流域夏季河道流量有较高的预报技巧（预报技巧要高于 ESP 试验）。进一步分析表明，SHEPS 季度水文预测系统的预报技巧随预报超前时间的增加而降低，当预报超前时间为 1 个月时，CFSv2 试验预报的蚌埠站 6 月月平均流量和观测流量的 PMC 可达 0.81。对于高值事件、正常事件和低值事件的概率预报，CFSv2 回报试验同样比 ESP 回报试验的预报技巧高。

3. 可预报性及预测方法研究

(1) 2011/12 年“二次探底型” La Nina 事件可预报性

2011 年底, 在热带太平洋发生了一次弱-中等强度的 La Nina 事件, 这次 La Nina 事件非常特殊, 其是在在 2010 年底热带太平洋发生了一次中等强度 La Nina 事件后, 随后紧接着发生的第二次大范围的海表温度变冷, 亦被称之为一次“二次探底型 (double dip)” La Nina 事件。这种“二次探底型” La Nina 事件在历史上较为罕见, 因此对该事件的预报也存在很大的困难。IRI 网站提供的 20 个 ENSO 模型, 除一个模型 (本课题所采用的一个中等复杂程度耦合模式 ICM) 外, 其余模式从 2011 年上半年 (1-6 月) 起始的预报, 均没有能够预报出这个“二次探底型” La Nina 事件。

由 Zhang 等 (2005) 发展的 ICM, 利用 Zheng 和 Zhu (2010) 发展的初始化方法, 提前 1 年就能够成功地预报出 2011 年赤道中东太平洋的海温演变, 对 2011 年连续变冷的“二次探底型” La Nina 事件给出了非常正确的预报。进一步地, 基于这次成功的预报, Zhang 等 (2013) 对该“二次探底型” La Nina 事件的可预报性进行了分析。结果表明, 2011 年“二次探底型” La Nina 事件的发生, 主要取决于中太平洋赤道外次表层冷水的持续存在, 并向赤道内的卷入, 从而形成了一次对西太平洋次表层暖水向东传播的阻断, 最终发展成了一次较弱强度的 La Nina 事件。

(2) 发展了一个新的动力 ENSO 预测和统计方法相结合的印度洋海温预测模型

热带太平洋地区的海表温度 (SST) 与热带印度洋 SST 间存在密切的物理联系, 印度洋海温变化滞后热带太平洋海温变化大约为 1 个季度左右。基于这种变化关系, 利用大气所大样本 ENSO 集合预报系统的预报结果, 发展了一个热带印度洋 SST 的动力统计预测模型。该模型利用最优滞后动态建模方法, 建立了基于最优滞后相关关系的动力统计模型, 采用自适应线性回归的方法实现对热带印度洋 SST 的预测。该模型的有效预报时效 (即预报相关系数超过 0.5) 可达 6 个月及以上, 具有一定的预报水平。进一步地, 将预测的印度洋 SST 用于我国汛期的短期气候预测中, 对我国汛期的大气环流场、西太副高、东亚季风环流、以及降水等方面均有一定的预测价值。

(3) CMIP5 气候模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟性能评估

使用分类集合的方法评估了 CMIP5 多个耦合模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟性能。结果表明, 在评估的 38 个模式中, 仅有 6 个模式 (第 1 类模

式)可以成功地再现1970年代末中国东部夏季降水年代际变化的主要特征,即长江流域降水偏多、而华北和华南偏少。这些模式模拟的成功归因于它们能较好地再现1970年代末东亚夏季风的年代际减弱及相关的环流场的变化,包括东亚沿海的偏北风异常以及西太平洋副热带高压的偏向西南、强度增强。而对降水年代际变化模拟很差的第2类模式,则模拟出不出东亚夏季风的这种减弱特征。进一步的分析表明,两类CMIP5模式对太平洋年代际振荡(PDO)空间分布特征都有较好的再现能力,但对PDO年代际转变特征的模拟能力则差异较大。第1类模式能很好地模拟出1970年代末热带海洋的增暖和相关的PDO位相由负到正的转换,而第2类模式所模拟的PDO位相转变与观测完全相反,且不能模拟出热带中东太平洋海洋的年代际增暖及江淮流域夏季的变冷,因此导致该类模式对1970年代末东亚夏季风的减弱和中国东部夏季雨型的年代际转变没有模拟能力。由此也表明,对耦合模式来说,中国夏季降水年代际变化的模拟能力在很大程度上取决于模式对海洋年代际变化的模拟。

(4) NCEP CFSv2对中国区域温度和降水的预报技巧分析

基于NCEP第二代气候预测系统CFSv2,利用其1982-2008年(27年)的回报资料CFSRR评估了CFSv2对中国区域的夏季平均降水和气温的季节预测水平,分别评估了其确定性预报技巧和概率性预报技巧。CFSv2回报中很好地再现了中国区域夏季平均气温和降水气候态的空间分布,回报气温和降水与观测的空间相关系数分别为0.95和0.65。但回报减小了中国区域夏季平均气温的空间差异性。在较暖的东南、西南区域回报有冷偏差($-1\sim-3^{\circ}\text{C}$),在较冷的西藏、新疆和内蒙地区则有暖偏差($0\sim5^{\circ}\text{C}$),在较湿润的东南地区回报有负偏差(偏干 $0\sim4\text{mm/d}$),在较干燥的西南区域回报有正偏差(偏湿 $0\sim5\text{mm/d}$),表明CFSv2较难预报出夏季平均气温和降水的极值。

模式对中国区域平均的夏季气温和降水的TCC分别为0.52和0.15(图4)。模式和中国夏季平均观测气温异常的高相关性一部分是由于过去30年中气温有明显的增温趋势,而模式对这个趋势有很高的预报技巧(CFSv2对中国区域平均气温的TCC为0.53)。当去除趋势后,回报气温的预报技巧有所降低。模式对中国夏季平均降水的预报技巧较低可能有两方面原因:一是CFSv2的大气模式分辨率T126仍然很难描述中国地区复杂的地形特征,也就很难预报出夏季降水的空间分布;二是模式仍需要改进参数化方案来改进对亚洲夏季风降水的模拟能力。就温度而言,模式对中国各个区域的气温异常预报技巧均较高(西南地区TCC为0.58),但是对西北地区和东南地区的量值预报误差较大(RMSE大于4.2)。模式对华北地区的降水异常预报技巧较高(TCC为0.24),对降水量值的预报也较为准确(RMSE为1.68),对其他区域的预报技巧有待提高(TCC均低于0.15)。

(5) 利用太平洋地区四大涛动的相互转化特征对 ENSO 发生进行预测

目前, 仍存在提前 1 年甚至数月预测 ENSO 发生时间的不确定性。我们发现在太平洋地区, 与 ENSO 循环密切相关的四个大气涛动(北方涛动-NO、南方涛动-SO、北太平洋涛动-NPO 和南极涛动-AAO, 以下简称为四大涛动)存在相互转化的关系, 并依此建立预测 ENSO 开始时间的长期预报模型。

在 3~7 年的尺度上, 北方涛动和北太平洋涛动(南方涛动和南极涛动)是北(南)太平洋地区低层环流最主要的模态。涛动之间存在相互转化的过程。其转化的主要形式为 $SO^- \rightarrow AAO^+ \rightarrow SO^+ \rightarrow AAO^- \rightarrow SO^-$ ($NO^- \rightarrow NPO^+ \rightarrow NO^+ \rightarrow NPO^- \rightarrow NO^-$) 的循环过程。当大气涛动完成一次循环, ENSO 也完成从 El Nino \rightarrow La Nina \rightarrow El Nino 的循环。产生涛动循环转化过程的主要原因是海气耦合过程。统计表明, 在 El Nino 事件发生前 1 年~1 年半左右, NO^+ 达到最大(或 NPO 由正位相向负位相转化); 在 El Nino 事件发生前 3~6 个月, SO 从正位相向负位相转化。据此, 建立了预测 ENSO 开始时间的长期预报模型。

(6) 热带太平洋地区的盐度年际变化对障碍层形成的物理机制

障碍层是海表混合层和温度跃层之间的水体, 因其能阻止海表和温跃层下海水的热量和动量交换而得名。这一特殊层结是热带太平洋上层海洋结构的一个重要特征, 但是对其成因仍缺乏足够的认识。本研究利用最新的 Argo 三维温盐资料, 诊断分析了热带太平洋地区的温度和盐度年际变率对障碍层以及对 ENSO 事件演变的影响和作用, 并独立出了热带太平洋地区的盐度年际变化对障碍层形成的物理机制。研究强调了盐度变化对中太平洋区域的障碍层变化起到了决定性的影响, 并且该区域的障碍层变化会对 ENSO 的演变起到非常重要的调制作用。

(7) 风能数值预报的误差订正方法

发展了边界层风速预报的相似误差订正方法。现有的中尺度数值模式模拟风场, 特别是近地层风场具有较大的误差。使用一种国际上新的基于相似误差的模式后处理方法, 对 WRF 模式 24 小时预报的陕西延长风电场近三个月风机轮毂高度的风速进行误差订正。相似误差订正法通过寻找和当前预报相似的历史预报来进行误差订正, 克服了一般的基于时间顺序的误差订正方法的缺点, 即不能处理

由于天气系统的剧烈转变引起的预报误差的快速变化。相似误差订正法将统计和动力两种方法有机结合,在不改变现有数值预报模式的前提下,既充分利用了动力学发展的成就,又能够有效提取大量历史资料中的相似信息,达到减小模式误差、改进当前预报的目的。

首先针对两个重要参数气压权重和相似预报的样本数进行敏感性试验,选择相对最优的参数值,然后对其误差订正结果进行分析,有如下结论:相似误差订正方法可以有效地对模式原始输出进行订正,甚至在预报绝对误差的天变率非常大的时候更为有效。相似误差订正方法成功地减少了预报的均方根误差和中心均方根误差,相对原始模式输出分别减少 9%和 10%左右。这种方法不仅可以减小系统误差,还可以减小随机误差,提高原始预报的预报准确率。同时,订正后的结果表现出更好的预报和观测之间的 Taylor 图模态相关。相似误差订正方法对风能预报敏感区的订正效果更为显著,均方根误差和中心均方根误差分别减少了 12%和 22%左右,此方法尤其适用于基于风能模式预报的风速误差订正。

由于相似误差订正方法的特性,其具有的另外一个优点是对临近时间资料的要求低,适合数据缺测、或者甚至缺少预报时的订正,因此适用于更长时间(72 小时)的风能预报,对于中长时间的风能预报大大优于其它的订正方法。同时这种方法对其它的预测系统和预报变量也有着很好的应用潜力,例如对温度和降水,臭氧浓度,气溶胶和太阳辐射等的预报。

(三) 资料同化理论和方法

1、高分辨率南海海洋模式同化分析

利用 2004-2005 年 1 月逐日再分析资料分析,发现 1 月南海北部平均海洋环流冬季 1 月份在广东外海 30 米深度有明显的西南东北向流,且与低盐舌有较好的吻合,但在表层该流系不明显。围绕南海暖流的多条流速断面开展进一步分析表明南海暖流向东流速核主要分布在 20-50 米深度范围,相北的流速极大值也不是出现在表层。因而,总体而言暖流流速大约在 10cm/s 左右,且由西向东伴随低盐、暖水的特点。另外,暖流路径与 100 米等深线几乎一致,且几乎整层一致的西南东北向流,最大流速核依然出现在次表层 30 米左右。同时在该暖流的向南一侧均出现较为明显的正海面高度梯度且伴有高温、低盐特征,即预示着暖流与暖水的堆积有着密切的联系。

在 30 米深度,平均动能和涡动动能的空间分布呈现明显不同的特征。二者比值反映出两者的相对强弱,沿南海暖流路径南北两侧,涡动动能较平均动能大

两个数量级,如图 1 所示。结果表明:冬季南海暖流与中尺度涡旋过程的输送密切相关。

2、基于高分辨率近海海洋模式的潮汐锋面分析

国内对于海洋锋的研究起步较晚,但是中国海域的锋面的类型很多,在近海的研究中我们越来越发现锋面的重要性。渤海的黄河口的河口锋,对悬浮物的输运和河口生态环境有很大影响,渤海夏季也有潮汐锋(赵保仁等,2001);黄海夏季有潮汐锋的存在,这是黄海重要的高生产力区,在渔业和海洋生态学上是重点研究区域(Wei,2003);东海的长江河口羽状锋(朱建荣,2003)和黑潮锋(汤毓祥,1990)都是对整个东海的陆架环流有重要影响的锋面。综上,中国近海海洋锋的研究可以分为观测研究和数值模式两方面。在原有的陆面数据同化系统以及目前几乎所有的陆面数据同化之中都没有考虑到集合同化方法的局地化策略,往往会造成表层的陆地观测与深层土壤的模式变量之间的虚假相关,从而会影响的陆面数据同化的同化效果。在这年的工作中,我们通过在 LDAS-IAP/CAS 中引入垂直局地化方案,在很大程度上消除了陆表的(大约 2-5cm)的微波亮温观测与土壤深层的土壤湿度之间的虚假相关,由此土壤湿度的同化精度有所提高。通过在 PODEn4DVar 的分析算法中引入 R 型局地化方案,并采用逐点分析计算的方式进行同化,大大地简化了同化过程,而非非常易于并行化,并在一定程度上提高了同化精度。

卫星遥感数据因其空间覆盖率高,分辨率高和时间连续性强等特征,现在对锋面研究主要以卫星数据(SST、叶绿素、水色等)为主,但是卫星数据并不能观测到海表面以下的物理场分布,不能展示相关的物理过程,所以数值模式也成为了不可或缺的工具。因此,采用一个混合坐标海洋环流模式(Hybrid Coordinate Ocean Model)HYCOM 模式对中国近海海洋锋进行模拟,然后对模拟结果进行评估,并试图利用模式的在三维空间内的各个要素场揭示一些重要的海洋锋面的形成-发展-衰退-消亡的整个过程机理是必要的。

从位势密度垂直剖面可以看出在有潮汐的情况下,苏北浅滩外缘对应的锋面附近等密度线向上弯曲,基本变为垂直方向,温度垂直剖面也具有类似的结构,但盐度变化并不明显。在 122°E 附近地形起伏比较大,周围温度、盐度和密度都有明显的向上弯曲,这个锋面是由温度和密度共同作用下形成的。苏北浅滩外缘锋面附近的垂直速度在有无潮汐作用下变化并不显著,这与前面提到的锋面是由水平辐合作用引起的相一致,而朝鲜西岸锋面潮汐引起的上升流则十分显著。

中国近海的海洋锋,锋区位置相对固定;大多数海温锋面具有季节性变

化周期，冬季的海温锋面分布丰富、形态成熟；而在夏季，由对流产生的海温锋面基本消失，仅在沿岸地区和浅滩边缘存在由潮汐混合产生的温度锋面。春秋季节则体现典型的过渡时期的特征。 黄海夏季锋面是典型的由潮汐混合引起的，其显著水文特征是，在潮汐锋的靠岸一侧，水文要素垂向均匀一致，在向海一侧，层化作用显著且在其边缘存在较强的上升流。潮汐锋分布在黄海西部沿岸和整个朝鲜半岛西部沿海，在北黄海冷水团周围也有出现。

3、海洋资料同化中模式偏差订正的影响研究

基于集合最优插值同化方法，采用了能反应流依赖性、变量之间动力相关性的样本来构造背景误差协方差矩阵，利用新版本的混合坐标模式 HYCOM, 以及改进的温盐同化方案对来自 ARGO, XBT, CTD, TAO 等的现场温盐廓线数据，卫星遥感海表温度、卫星高度计资料在印度洋和太平洋区域进行了多年的同化试验（1990 - 2011），同时为了比较和获取样本，对 HYCOM 模式也实施了没有同化任何资料的模拟试验，并从多个方面对同化系统进行了评估。从多年平均的状态来看，模式模拟的海表温度偏高，主要是在热带太平洋，尤其东太平洋和西印度洋，同化后，可以将这种高温现象减弱，这要归咎于 SST 同化的贡献。对于海表盐度而言，在印度洋和太平洋的分布主要是在太平洋副热带海域存在着两个高盐区，在阿拉伯区和南印度洋也存在着高盐区，模式本身可以模拟出这种分布，但高盐区的范围以及强度都偏小偏弱，同化可以扩大高盐区的范围，提高高盐区水的盐度。同化也能很好地年际变率的信号，与独立观测的比较也进一步说明了同化可以比较合理地再现次表层的高盐水以及温跃层的结构。

继续协助业务部门完善基于集合同化技术和各种遥感、现场观测和 HYCOM 模式建立的同化系统的移植工作，为全球和印度洋海域海洋环境预报系统提供数值预报初始场。

(四) 灾害性天气气候过程及其动力学研究

1. 中国南方异常降水的成因研究

当大型斜脊的纬向尺度较大时，斜槽的负距平中心靠近东亚大槽区，西伯利亚高压大范围加强，南侵冷空气活动偏强，使中国南方地区降水偏少。相反，当大型斜脊的纬向尺度相对小时，斜槽位置偏西，西伯利亚高压加强范围偏小，南侵冷空气活动也偏弱，有利于中国南方地区降水偏多。在低温事件中我国南方地

区的降水多寡，也取决于西太副高和孟加拉湾南支槽的影响。

分析了我国南方极端降水事件对应的环流特征和前兆信号，揭示了南支槽的加深和西太平洋副热带高压加强北扩以及东亚大槽的减弱和高原西侧低压槽的建立是造成极端降水的主要环流型。并指出北大西洋-欧洲的波状异常流型的建立可以视为我国南方极端降水事件发生的前兆信号。该研究可为冬季我国南方降水中期-延伸期尺度的预测提供参考。

2. 20 世纪中国东部夏季降水年代际变化与 PDO 关系的分析及模拟

使用多种再分析资料和台站观测资料，分析了 20 世纪中国东部夏季降水和 PDO 的关系，结果表明，20 世纪中国东部夏季降水年代际转折点同 PDO 的年代际位相转变基本一致。具体而言，华北地区夏季降水同 PDO 为负相关，长江流域为正相关，华南为负相关，呈现明显的三极型分布特征。CMIP5 模式对 PDO 和中国夏季降水的模拟能力有较大差异，其中模式对 PDO 和降水空间分布的模拟要好于时间变化。

3. 冬季东北地区气温异常及前兆性信号研究

冬季我国低温事件具有显著的区域性特征，特别是我国东北地区气温异常往往与全国其它区域气温异常特征呈现不一致性的变化特点。本研究发现，东北地区气温异常偏低（高）年，东北亚上空呈现为气旋性（反气旋性）环流，东北地区受来自中高（中低）纬度的异常偏北气流加强（减弱）影响，有利东北地区气温偏低（高）；物理量诊断、统计及数值模式实验结果表明：东北地区 1 月气温年际、年代际异常变化与前期（12 月）海温、海冰状况有关，当西北太平洋海温呈正（负）异常以及巴伦支海-喀拉海海冰减少（增加），有利东北亚上空出现反气旋（气旋）性距平环流；交叉谱及谱能量计算发现：冬季（1 月）东北地区气温的年际变化主要受前期西北太平洋海温异常变化的影响，而年代际变化更多的受前期巴伦支海-喀拉海地区海冰异常影响；前期西北太平洋海温以及巴伦支海-喀拉海地区海冰的异常特征可作为预测冬季东北地区气温异常变化的重要外强迫信号。

4. 春季长江中下游旱涝的环流特征及对前期海温异常的响应

长江中下游降水异常偏多（少）年高层 200hPa 风场上东亚副热带西风急流中心位置比气候态偏北（南）；中层 500hPa 亚洲地区的阻塞高压主要发生在乌拉尔山（鄂霍次克海）附近、西太平洋副热带高压位置偏北（南）；低层 850hPa 风场的东亚沿海地区为偏南（北）风距平，有利于（不利于）水汽向长江中下游地区输送；大气环流内部动力过程的分析指出：东亚地区上空 Eliassen-Palm (EP) 通量散度在 40°N 为正（负）异常、 30°N 为负（正）异常，有利于东亚高空西风急流中心位置偏北

(南),从而导致春季长江中下游降水偏多(偏少);春季长江中下游降水异常偏多(少)年最显著的前期外强迫信号表现为赤道东太平洋海温呈现厄尔尼诺(拉尼娜)型.

5. 春末环贝加尔湖地区环流的年际和年代际变化特征及其影响

春末环贝加尔湖地区环流的年际和年代际变化特征及其与中国温度降水的关系:(1)春末贝加尔湖脊(简称贝脊)在1951-1979年间较弱,但在1980-1999年期间显著增强.进入21世纪后,春末贝脊呈显著减弱的趋势;(2)强(弱)贝脊使我国北方地区的温度显著升高(降低),使西南地区的温度降低(升高).贝脊的强弱变化,对北方地区温度的影响在1951-1979年期间最为显著,对西南地区温度的影响在1980-2011年期间显著.在1951-1999年期间,贝脊的强弱变化与长江下游的降水量存在明显的反位相变化关系.进入21世纪后,贝脊的强弱变化与西南地区降水量之间存在较为显著的正相关关系(99%置信度);(3)强贝脊与由北大西洋/欧洲上空向东传播的定常行星波密切相关,而弱贝脊主要与欧亚大陆次极区纬向伸展的行星尺度脊相联系.在不同的年代际时段,与贝脊强弱变化相联系的北半球异常环流特征也存在一定的差异;(4)5月的强份贝脊环流以前期的北大西洋涛动、东大西洋型以及弱东亚大槽环流为前兆信号.同年3月乌拉尔山气旋式异常环流为5月份贝脊弱的前兆信号.

6. 两种 A0 的动力学特征研究

在季节内尺度上研究了两种 A0, 即 S-type 和 T-type A0, 并指出了这两种 A0 在动力学性质及对表面温度场的影响方面的主要差异. 与 S-type A0 不同, T-type A0 对应一个对流层和平流层的非耦合状态, 同时也破坏北半球中高纬度地区温度异常的环状形态. 在波的垂直传播方面, 在 T-type A0 事件中, Rossby 波既可以通过东北亚上空的波导区传播到平流层, 也可以通过格陵兰地区上空波导区从平流层传播到对流层, 这些动力学过程最终导致 T-type A0 事件的典型环流特征. T-type A0 事件对我国东北和华北地区的气温影响显著.

7. 东北冷涡的研究:

东北冷涡是东亚地区一个持续时间较长且较为频繁的系统, 其天数占夏季的近 1/3. 东北冷涡活动的多寡, 是造成中国东北地区的洪涝灾害和持续性低温事件的主要原因. 它的盛行与否也对江淮梅雨形势能否正常建立具有重要影响. 我们总结了东北冷涡形成和维持的动力学原因: 1) 大兴安岭/小兴安岭的地形以及临海的水汽条件有利于东北地区移动性冷涡系统的形成和发展. 2) 与欧亚大陆

阻塞型环流相联系的准纬向低频 Rossby 波活动将其波能量直接频散到东北地区, 形成冷涡环流。3) 源自东北亚阻塞型环流以及副热带异常环流的 Rossby 波均可经向传播到东北地区, 有利于东北冷涡环流的维持(尤其在仲夏和晚夏)。4) 与相邻阻塞型环流有关的对流层中低层冷空气活动可强迫出东北地区局地上游 Rossby 波, 致使冷涡环流形成和维持。5) 来自东北地区上游的瞬变天气扰动与下游异常环流型相互匹配, 形成有效的瞬变涡动强迫作用, 使冷涡环流持续维持。6) 负位相的西太平洋(WP)遥相关型是东北冷涡活动的下游背景环流型, 其盛行是东北冷涡环流反复出现和持续维持的一个重要原因。