

国际气候与环境科学中心 2014 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，2014 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）IAPAGCM 积分试验及与 CAR 系统的初步耦合积分试验

对 IAPAGCM4 分别进行高分辨率（ $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ）和低分辨率（ $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ ）的 30 年（1979-2008）的 AMIP 积分试验，并对试验结果进行了系统的对比分析。分析结果表明，在全球的尺度上，两种分辨率的模式的模拟性能相当，低分辨率模式的结果要略好一些，这是因为在全球尺度上，高分辨率的优势并未显现，同时，随着分辨率的提高，某些物理参数也需要进一步的修改和调试；在东亚季风区，无论是气候态，季节变化还是年际变化，高分辨率模式的模拟结果均好于低分辨率模式。东亚地区地形复杂，受到的环流系统也复杂多变，因此，高分辨率模式有利于更好地刻画这些细致的结构，模拟结果也得到了明显地提高。

分别完成了对高分辨率（ $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ）和低分辨率（ $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ ）版本的 IAPAGCM4.1 与云-辐射-气溶胶集合系统（CAR 系统）的耦合，并开展了 12 个集合成员的短期积分试验，初步的试验结果表明，不同集合成员模拟的辐射通量、降水等均有明显的差异，集合平均的结果要优于单个方案的模拟结果。

利用 IAPAGCM4.1 进行 1900~2005 年的模拟试验，分析了模式对过去百年全球和中国气温变化的模拟能力。开展多株敏感性试验模拟分析温室气体浓度、

太阳辐射、土地利用等变化对过去百年气候变化的影响。

(2) IAP AGCM4.1 中引入了新的云微物理参数化方案

与中科院地球环境所合作,将考虑了云滴谱离散度的云水自动转化过程参数化方案引入到 IAP AGCM4.1 中,并完成了 30 年的 AMIP 积分试验。初步的分析表明,新方案模拟的气候态与老方案相近,更深入的分析仍在进行中。

(3) 考察太阳总辐射度数据对大气环流模式模拟的影响

将中国科学院国家天文台最近重建的一套长达 135 年(1874-2009)的太阳总辐射度逐月数据引入到大气环流模式 IAP AGCM4.0 中,通过数值模拟,考察了太阳活动对近 30 年气候变化的综合影响。结果表明: I) 模式能反映这 30 年间的全球增暖趋势,观测的增温趋势为 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,模拟的趋势偏弱($0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。从地表气温年际变化而言,模拟值与观测值的相关系数达 0.86;去除线性趋势后,模拟值与观测值的相关系数仍有 0.73,并通过了 5% 信度的显著性检验; II) 这 30 年间全球地表气温的线性倾向是变暖的,观测结果是 $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,模拟结果为 $0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,比观测稍强。北半球普遍为变暖,观测的最大增暖区主要分布于亚欧大陆及加拿大东部地区;模式模拟出了该趋势,但对增暖区的位置模拟不好,另外强度比观测明显偏弱; III) 北半球地表气温存在年代际差异,1979-1988 年主要为冷距平,1998-2008 年则转为暖距平;模式模拟出了该转变,只是模拟的气温升高范围偏小; IV) 模式模拟出了 80 年代(90 年代后期)对流层负(正)温度距平的特征。模式对平流层温度的模拟不太理想,虽然抓住了 80 年代 100~10hPa 低平流层先暖后冷的特征,但对于 90 年代中后期平流层变冷未能抓住。

2.陆面过程模式及陆气相互作用研究

(1) 陆面水文耦合模式的参数率定及改进研究

基于淮河流域的地形、岩石地质类型等空间分布特征,对陆面水文耦合模式 CLHMS1.0 的河道曼宁糙率系数、水力传导度两个关键参数进行了率定;在此基础上,通过基于 CLHMS1.0 的多组数值模拟试验,分析了河道曼宁糙率系数、水力传导度对 CLHMS1.0 模拟淮河流域水文过程的影响。研究表明,淮河流域上游王家坝子流域的曼宁糙率系数的减小,可以显著提高模式对王家坝水文控制站上游模拟的水流流速,减小了模式对王家坝洪峰来临时间模拟偏迟的偏差;依据淮河不同子流域的岩石地质类型选定更为合理的水力传导度参数后,模式能够更加准确地刻画淮河流域河道流量等水文过程。基于淮河流域 1980-1987 年逐日水文过程的模拟评估结果表明,采用了新的河道曼宁糙率系数和水力传导度参数后,改进的 CLHMS1.0 对淮河流域逐日水文过程的模拟能力显著提高,模式

对流域河道流量源汇的模拟也得到一定的改善。

(2) 陆面-水文耦合模式 CLHMS1.1 的建立及模拟评估

在 CLHMS1.0 的基础上,提出了可考虑网格间坡度、网格内高程差异以及网格土壤湿度等因子影响的次网格坡面直接产流参数化方案。分析结果表明:次网格坡面直接产流参数化方案的引入可显著提高耦合模式对淮河流域各水文控制站水文过程的模拟能力。基于 CLHMS1.1 模式对淮河流域 1980-2003 年陆面水文过程的模拟及验证结果表明:陆面水文耦合模式 CLHMS1.1 能较好地模拟出观测的土壤湿度的年际变化特征和垂直层次变化,对观测地下水位的季节变化也有较好的模拟能力;模式可以很好地模拟出 1980-2003 年王家坝、鲁台子和蚌埠站观测流量的逐日变化过程,对主要洪峰模拟精度更高,误差更小。针对淮河流域 3 次洪水过程(2000、2003、2007 年)的模拟检验表明,CLHMS1.1 可以较准确地模拟出洪峰的来临时间和峰值。

(3) CLHMS 陆面水文耦合模式在中国不同流域的建模及应用

建成适合于珠江流域的大尺度陆面水文耦合模式,并开展珠江流域水文水循环过程的数值模拟。数值模拟结果发现,模式对梧州、石角、博罗三个水文站水量平衡系数(WBI)的模拟结果分别为 1.00、1.06、1.00,PMC 相关系数分别为 0.84、0.87、0.84,IOA 相似度系数分别为 0.91、0.92、0.91,NSI 效率系数分别为 0.70、0.74、0.62,说明 CLHMS 模式对珠江流域关键水文站逐月流量具有较好的模拟能力,但相对而言,模式对流量峰值的模拟能力还有待提高。

(4) 城市冠层参数化方案

实现了 IAP 城市地表粗糙度参数化方案(简称 z0 方案)与地球系统模式 CESM 的耦合,包括 z0 方案的子程序化、相关参数的初始化、设置运行脚本开关项等。此外,基于 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 分辨率城市参数原始数据,聚集得到 $0.9^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 分辨率的次网格城市地表非均匀分布的全球陆面覆盖数据。

基于 WRF V3.6 及其耦合的城市冠层模式,模拟分析了不同的天气背景下,在典型高温城市(广州)使用冷屋顶方案对于降低城市热岛效应等的平均作用及机制。结果表明:冷屋顶一般只使得城区地表反照率在白天大于其周边郊区,白天市区地表气温明显降低,中午(13:00)广州主城区的降温程度最为显著(约为 1.2°C);我国东南沿海地区,夏季白天盛行海风,有助于冷屋顶降温效应向下

风方扩散，所以位于市区下风方的临近郊区地表气温在下午 15:00 后也呈现一定的降低。

在城市冠层物理模型中，加入人为热及冠层热储存项，以考虑工业散热、城市居民发热（如空调散热）、城市机动车辆及人体生物源等对城市冠层表面能量平衡的影响。

(5) 陆表模式植被凋落物参数化方案研究

对于温带阔叶落叶林、针阔混合林、针叶常绿林、草地等不同植被覆盖的自然下垫面，考虑植被凋落物在地表的覆盖层的水热特性；总结不同种群和年龄植被陆表的凋落物覆盖情况下的地表径流速度、沙粒随地表径流的启动流速、表层土壤比热容、含水量、毛管孔隙等机理，建立了一套较为完整的物理模型，将作为 CAS-ESM 的子模块。

(6) 黄淮海地区水汽通量变化的模拟及归因分析

利用新版 V3 气象数据和卫星反演资料，分析计算了黄淮海地区水汽通量时空变化规律，分析研究近 50 年来气候变化对黄淮海地区水汽通量变化影响，发现年蒸散发总体呈下降趋势，主要是夏季蒸散发整体下降引发，其他季节蒸散发量无显著变化趋势。变化的主要物理机制为：1) 黄淮海地区春季、秋季、冬季气温呈上升趋势，导致饱和水汽压差呈上升趋势，对该地区蒸散发为正贡献；夏季该地区南部气温呈下降趋势，饱和水汽压差 90 年代后才呈上升趋势，上升强度北强南弱；2) 黄淮海地区风速四季呈下降趋势，对该区域蒸散发为负贡献；3) 太阳入射能观测资料正交分解显示，60—90 年代太阳入射能呈下降趋势，之后呈上升趋势，在多年平均值附近浮动。时间系数相关性分析显示，夏季太阳时间系数与黄淮海夏季蒸散发时间系数相关达 0.79，因此黄淮海地区夏季蒸散发变化是由太阳能变化引起的。

3. 全球植被动力学模式

(1) 全球植被动力学模式的模拟评估与气候系统模式的耦合集成

实现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) 的耦合，排查代码错误，进一步诊断和评估耦合的模拟误差。发现 CoLM 提供的初始场中的地表多年平均最低温度明显偏高，导致高纬度地区寒带灌木无法生存。对初始场进行修正，并氮限制之后，可以看出高纬度地区灌木覆盖度明显增加。

评估了 IAP-DGVM 分别与 CLM3 和 CoLM 耦合，对全球植被分布、植被特

征、陆-气水、热、碳通量等的模拟能力。结果表明，模式能较好地模拟不同植被类型的覆盖率与降水间的映射关系，但对树和草过渡区的模拟能力有待提高；IAP-DGVM 与 CLM3 耦合，能较好地模拟不同植被类型的覆盖率与气温间的映射关系，优于 IAP-DGVM 与 CoLM 的耦合及 CLM3-DGVM；模式能较好地模拟 GPP / NPP 的空间分布，及其与降水/温度间的映射关系，但无论在生态系统水平上还是植物功能型水平上，模拟的 NPP 及地上生物量分别偏低和偏高；IAP-DGVM 可提高陆面模式对冠层蒸发和蒸腾贡献率的模拟能力，但未改进对蒸散发全球总量的模拟。

(2) 植被生态-大气相互作用参数化方案改进与评估

针对 IAP 火模式应用于 CLM4.5 时高估欧亚北方森林地区的燃烧面积(在极端干旱的情况下尤为明显)的问题，改用 30 天滑动平均的相对湿度作为燃料可燃性的重要因子，可反映燃料密集地区燃料脱水对气候响应的延迟性。并对经济因子影响火灾的参数化方案作了调整。新方案不仅可以反映美国 30 年代到 60 年代经济快速发展所伴随的人为火抑制明显增加，还可反映观测的火灾与 GDP 映射关系。

发展后的火模式将被美国 NCAR 明年 6 月全球发布的陆面模式 CLM5 采用。不论是离线还是 CAM-CLM 的耦合模拟，火模式均能合理模拟燃烧面积全球总量和空间分布、季节变化、气候-燃烧面积的映射关系。利用发展后的火模式完成了 CESM CAM-CLM 耦合的 20 世纪历史演替模拟及火灾方面的评估，并完成 CAM-CLM 的 20 世纪全球无火试验模拟；在此基础上完成火灾通过影响陆面生态进而影响温度降水的定量估算及相关机制分析。

此外，针对 IAP-DGVM 的一些模拟偏差，引入了个体生物量的动态分配方案，使得 NPP 在根、茎、叶之间的分配比例与光竞争、土壤水分等因素相关，能较好地刻画环境因素与个体生物量之间的关系，植物各组成部分的生物量比例更加合理。同时，利用课题组发展的基于遥感反演产品的植物物候数据集，分析了中高纬度温控落叶植物开始长叶期的气候特征，提出积温基准温度与春季平均温度的统计关系，建立了落叶植物开始长叶期的统计模型，并将进一步用于改进植被动力学模式中的物候方案。

(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

主要研究了小尺度的个体间光竞争表达及相应的年龄分布的统计动力学模型建模问题。(1) 参照现有植变动力学模型引入描述植物个体生长发育的关键生物化学、生理学、生态学过程的主导方程, 建立描述单一物种个体生长发育的高分辨率的(空间显式)模型, 进行大规模数值模拟, 模拟显示不同个体的冠层部分重叠, 与文献中自然界的观测结果相似。由模拟结果拟合得到遮荫系数(光能分配函数)随个体年龄(或植株高度)变化的分布曲线, 以及相同年龄的不同个体的特征(如高度)差异与遮荫系数的分布特性。(2) 利用该关系建立基于植物年龄结构的(空间隐式)模型, 得到物种统计特征(如生物量、高度、生态系统初级生产力等)随年龄的变化与空间显式模型大致一致。

(4) 植被—大气相互作用的模拟研究

研究植被—大气耦合模拟中植被特征变化对陆表过程及气候要素模拟的影响。主要研究北半球中高纬度地区植被特征(如叶面积指数 LAI)对蒸散发和反照率对地表温度的影响。主要结论如下。1) 蒸散发和反照率对地表温度在不同区域、不同季节的综合影响不同, 如春、夏和秋季美国东南部 LAI 增加后导致的蒸散发和反照率的变化都是对地表温度做贡献; 但在夏季其它大部分地区, 蒸散发和反照率变化对地表温度的影响相反, 即增加的蒸散发使地表温度降低, 同时降低的反照率使地表温度增加。2) LAI 导致的蒸散发和反照率变化对地表温度影响的相对主导性不同。夏季, 绝大部分地区蒸散发对地表温度的影响占主导作用; 但春季欧亚大陆的西北部和秋季欧亚大陆的中部, 反照率占主导作用。

4. 沙尘气溶胶模式

系统评估了 NCAR 地球系统模式 CESM 中起沙方案的模拟性能, 包括从沙尘暴个例的模拟到全球沙尘循环的模拟, 并通过考虑不同的地表风适度因子以及地表粗糙元对临界摩擦速度影响的参数化的多组敏感性试验, 深入分析相关地表下垫面特征及其参数化对沙尘暴期间起沙模拟的影响。

5. CAS-ESM 模式的发展和评估

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。上年度, 各分量模式已实现了离线运行, 并完成了大气模式 IAP AGCM4.1、陆面模式 CLM4、海洋模式 POP2 及海冰模式 CICE4 的耦合。本年度, 我们进一步实现了大气模式 IAP AGCM4.1、陆面模式 CoLM 及植变动力学模式 IAP-DGVM、海洋

模式 LICOM 及海冰模式 CICE4 的耦合, 其中除了海冰模式外, 全部是我国自行研发的模式。上述耦合通过 CPL7 实现, 可以方便地开展任意两个或多个分系统模式的相互耦合和与对应的 NCAR CESM 的对比试验。

利用该耦合版本进行了模式大气—陆面—海洋(含海冰)全耦合的工业革命前的控制试验(已完成 50 年), 其中大气模式和陆面模式的分辨率均为 $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$, 海洋模式和海冰模式的分辨率均为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。CO₂、太阳常数及气溶胶等外强迫均取 1850 年的数值。初步分析表明其模拟的基本气候态是合理的。不过模式模拟的海表面温度在北太平洋和中东太平洋存在一定的偏差, 目前正在针对以上偏差进行参数调试。

(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, 代表所参加国家气候预测会商

(1) 组织所里的短期气候预测会商会, 并发表预测意见, 包括: 汛期气候预测会商会(3 月)、汛期补充会商会(6 月)、梅雨预测会商会(6 月)、年度全国气候趋势预测会商会(10 月)。

(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)、梅雨预测会商会(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)。

(3) 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。

(4) 对大气所的短期气候预测意见进行整理, 形成 9 期短期气候预测通讯。

(5) 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 1 月《中科院专家关于今冬明春极端天气发生趋势预测》、3 月《汛期预测意见》、6 月的《盛夏我国降水趋势预测》和 10 月《年度气候预测意见》。

2. 实时数值气候预测及预测系统发展

(1) IAP 数值预测系统对 2014 年夏季异常气候的跨季度实时预测及检验

IAP 预测系统较好地预报出 2014 年夏季我国河套、新疆的少雨和东北北部的多雨, 但江南的多雨区没有预测出来; 系统也较好地预报出 2014 年夏季中高纬乌拉尔山和鄂霍茨克海阻高偏强, 但未能预报出西太平洋副热带高压偏强、偏西; 2014 年预测东亚夏季风指数为 0.17, 属正常, 实际观测指数为 -0.2, 为正常略偏弱。总体来说, 对于 2014 年夏季实时预测, 模式对北方的系统和降水异常预测能力较好, 但对中低纬降水和环流系统异常状况则预测能力较低。

(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 2014 年冬季的气候趋势，系统预测东亚冬季风正常，东北、华北气温偏高，江南、西南气温偏低，江南、华南、西南及河套西部降水偏多，东北西北部、华北及青藏高原西南部降水偏少；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。

3.可预报性及预测方法研究

(1) 两类 El Niño 事件强度显著差异的原因分析

作为全球最显著的年际变化信号，对全球气候和环境均有着重要影响。近年来，El Niño 最大的年际异常信号主要集中在中太平洋区域，且出现频率明显增加。研究表明，中太平洋型（CP 型）El Niño 现象与传统的东太平洋型（EP 型）El Niño 事件在强度上的显著差异与 El Niño 事件发展期最为关键的 Bjerknes 正反馈机制有着很好的对应关系，即 CP 型 El Niño 事件对应较弱的 Bjerknes 正反馈过程。在 CP 型 El Niño 事件的发展过程中，1) “SST-云”热力学负反馈机制对 Bjerknes 正反馈过程起到强烈的削弱作用；2) 大气环流的年代际变迁使得 SLP（海平面气压）正距平中心向赤道外移动，造成了赤道上的纬向 SLP 梯度变弱；以及 3) 近年来大气在赤道中太平洋地区存在低层辐散的气候平均态，抑制了低层对流并将对流中心向西挤压。

(2) 厄尔尼诺事件爆发的关键先兆因子分析

利用卫星观测的高度计资料，精确地估计了表征次表层暖水东传过程的赤道开尔文波的变化。结果表明，相比自有 1993 年海表高度计卫星观测以来的六次厄尔尼诺事件，2014 年 3 月份赤道太平洋的开尔文波向东传播速度是同期最快的，甚至明显地超过了 1997 年的超级厄尔尼诺事件。这些特征集中表明，2014 年初的次表层暖水快速东传的现象，将有助于热带中东太平洋海表温度在未来几个月明显增暖，2014 年或将爆发一次厄尔尼诺事件。

(3) 发现并揭示“二次探底型”拉尼娜事件的爆发原因

利用 GODAS 三维海洋再分析资料和 NCEP 大气资料，首次系统全面地描述了 2011/12 年“二次探底型”La Nina 事件的爆发过程，发现并揭示了其爆发主要归因于南太平洋次表层冷水团向赤道的入侵。在 2010/11 年 La Nina 事件衰减期，赤道东太平洋已出现中性海温状态，而赤道外地区，尤其是在南太平洋，从表层到温跃层均持续维持冷海温状态，并由此产生了从南太平洋向赤道的风场（甚至

跨越赤道到达赤道以北地区)。异常的东南风与次表层冷水团相配合,形成了持续的次表层冷水沿温跃层向赤道内入侵,这次入侵成功地阻断了原来的西太暖池次表层暖水沿温跃层向东传播的过程,该入侵过程之后在赤道中东太平洋持续加强,最终导致“二次探底型”La Nina 事件于 2011 年秋天爆发。

(4) ENSO 衰减位相的年代际变化及其模拟

基于多种观测资料,分析了 ENSO 衰减位相的年代际变化。发现 1970 年代中期之后, ENSO 的衰减过程变慢,持续性增强,其衰减位相发生了明显的年代际变化,这与北太平洋年代际振荡(PDO)的位相转换密切相关。受 PDO 位相转换的影响,热带中东太平洋显著增暖, Walker 环流减弱,赤道太平洋产生西风异常,减弱了赤道东太平洋沿岸的上翻流和秘鲁寒流,使得后一年代赤道太平洋只存在单一的海温异常的东传模态, ENSO 衰减过程变慢。33 个 CMIP5 模式中,仅有 5 个模式较好模拟出了 ENSO 衰减位相的年代际变化,同时也再现了这种变化同 PDO 位相转换的关系。

(5) 南极涛动年际和年代际变化的数值模拟

基于 CAM3 四组模拟资料,分析了南半球夏季南极涛动的年际和年代际变化。结果表明,南极涛动的年际变化主要由海温异常驱动,但其年代际变化则主要由大气辐射变化造成。当大气辐射变化时,南半球高纬度地区出现变冷趋势,增大了南半球中高纬度之间的温度梯度,从而导致南极涛动从负位相转变为正位相。同时,变冷趋势也部分抵消了海温强迫的影响,使模拟结果更加接近于观测。因此,海温强迫对南极涛动的年代际变化也起到一定作用。

(6) NCEP CFSv2 对中国区域降水的预报技巧分析

利用 EOF 和 SVD 方法对美国 NCEP 的 CFSv2 的 1982—2008 年的 9 个月预报期的回报试验数据进行误差订正,选取其中每年的 2 月份(2 月 5 日、10 日、15 日、20 日和 25 日)的每天四个起报时次共 20 个样本。观测降水采用 CMAP 降水。结果表明, EOF 和 SVD 订正方法均使得中国区域的降水异常回报技巧有所提高,春季最大可达 0.7,夏季可达 0.5。例如,经过 EOF 或 SVD 订正后,27 年春季平均的 ACC 从订正前的 -0.07 提高到 0.13 / 0.08, T 评分从 0.49 提高到 0.54 / 0.52, P 评分从 76.22 提高到 86.69 / 83.19。

(7) CMIP 气候模式模拟分析

利用 CMIP5 41 个模式的历史模拟资料,分析了耦合模式对北太平洋年代际振荡(PDO)的模拟能力。结果表明, CMIP5 多数模式对 PDO 的模态分布都有

较好的再现能力。模式对 PDO 强弱年代际变化的模拟能力则差异较大，大多数模式模拟较差，只有少数模式能模拟出 PDO 的年代际变化。进一步的分析表明，对 PDO 年代际变化模拟较好的模式，其对热带 SSTA (ENSO 空间结构和强度的年代际变化)、热带和热带外 SSTA 的关系模拟较好，ENSO 年代际变化导致的热带太平洋 SSTA 和大气纬向变化及对 AL 的影响模式均有所体现，且 AL 对北太平洋海温的影响模式也均较好模拟出来。

基于 CMIP5 模式模拟的南亚夏季风未来变化的机理。系统分析了 CMIP5 中的全球海气耦合模式对南亚夏季风的模拟结果，阐明了南亚夏季风环流变化的动力学机理，解释在全球气候变暖背景下南亚夏季风环流可能减弱的原因。

(8) 大气边界层湍流资料的分析方法研究

发展了基于经验正交分解 (EMD) 的大气边界层湍流资料的去趋势方法，并和常见的平均方法比较，新方法有利于在不破坏湍流大尺度相干结构的条件下去除日变化趋势，得到平稳的湍流信号。并进一步利用 EMD 方法区分大尺度湍流和小尺度湍流，比较了多种区分尺度的物理和数学判据，得到合理的尺度分解方法。

发展了基于希尔伯特-黄变换的湍流资料谱分析方法。与傅里叶变换相比，该方法可以处理非平稳的湍流资料，得到随时间变化的瞬时频率。利用该方法对杨梅山风电场的风速脉动资料进行分析。

利用小波最大模方法研究了城市冠层中间歇性湍流的多分型特性。发现在多雷诺数条件下，城市管层湍流的间歇性远强于中等雷诺数的风洞资料，奇异普宽度更大。在不稳定条件下，充分发展湍流的温度场的间歇性比速度场略强。

(三) 资料同化理论和方法

1. 先进集合四维变分同化方法 NLS-4DVar 的研发

以多年来持续研发的一种融合数据同化领域两大主流数据同化方法 (即 4DVar 与 EnKF) 之特点的集合四维变分同化方法 PODeN4DVar 为基础，通过严格的理论推导将集合四维变分同化方法的代价函数转换为非线性最小二乘最优化问题，实现非线性最小二乘最优化问题的理论体系与集合数据同化方法的融合，由此实现一种基于非线性最小二乘最优迭代的集合四维变分同化方法 NLS-4DVar 的研发，进一步的理论分析表明国际上现行的集合四维变分同化方法只是 NLS-4DVar 非线性最优解一步迭代的粗糙近似。基于中尺度模式 WRF 平台的仿真及真实数值实验表明，由于 NLS-4DVar 摒弃了之前集合四维变分同化

方法所惯用的线性化假设而采用非线性最优迭代，其分析场更为真实可信，同化结果也更为准确合理。

2.中国碳循环数据同化系统 Tan-Tracker 的研发：

相比较于其他领域的的数据同化，大气碳循环数据同化具有其独特的特点：其同化要素为陆表碳通量非而非通常意义的状态变量（为大气传输模式的下边界条件），同时陆表变量与大气 CO₂ 浓度变化存在着一点的滞后关系，国际流行的碳循环数据同化系统 Carbon-Tracker 进行了大量简化与假设，采用了拉长滞后窗口从而忽略初始的大气 CO₂ 浓度对于碳通量反演的影响，自然会造成计算代价大、初始误差不断累积的后果。我们所研发中国碳循环数据同化系统（Tan-Tracker）成功地实现了碳通量与大气 CO₂ 浓度的联合同化，一方面可以消除大气 CO₂ 浓度的初始误差对于碳通量反演精度的影响，同时还可以缩短滞后窗口从而极大地降低了计算代价。另外，该系统还实现对真实碳卫星柱浓度数据的同化，效果良好，目前国际上类似的工作还未见报道。

3.海洋资料同化研究

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，改进的温盐同化方案以及考虑了平均海平面动力地形对来自 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西太平洋区域进行了多年的同化试验（1993—2012），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，印度洋的暖水向西扩展太多，同化后，可以减小暖水的范围。对于海表盐度而言，模式模拟的盐度偏低，高盐区扩展的范围偏小，同化可以增加盐度，同时表层的盐度会影响次表层盐度，模拟的由于盐度偏低，导致的水团比较轻，难以下沉，基本都聚集在上表层，同化后由于表层盐度增大，水较重，可以下沉到与观测相适应的位置。相对于其他再分析产品，同化也能很好地扑捉年际变率的信号，更好地再现 20 年海平面的变化趋势。

提出了一套全新的订正全球 XBT 数据偏差方案，被国际 XBT 科学小组作为订正 XBT 数据的推荐方案，并发展了一套新的经过质量控制和偏差订正的 XBT

资料集。研究全球海洋观测资料从原有的船舶观测转变为基于 Argo 观测对“海洋热容量在本世纪初存在突变”的影响。发现并估计海洋观测资料垂直分辨率不足及变化对热容量估计的影响。

利用一个区域海洋模式开展多项同化实验，比较了不同“静态样本”选取方式（SVD 模态、特征尺度过滤、动态静态样本结合、SEEK 等）对于同化结果的影响。结果表明，在同等观测信息的条件下，优化的“取样方式”可在相当程度上改善模拟结果。这项工作对于业务化的海洋预报有直接的意义。

4.无结构自适应网格的海洋资料同化研究

完成基于无结构自适应网格有限元海洋数值模式 FLUIDITY 的资料同化模式，初步应用于只有海表面风应力驱动的三维固定网格和自适应海洋环流模式中。将无结构自适应网格的海洋数值模式应用到中国南海区域，建立实际海洋边界条件驱动的三维正压模式，得到与实际观测相符合的潮汐模式和风应力驱动模式，验证了无结构自适应网格对实际海洋模拟的可行性。进一步用潮汐的实际观测资料对中国南海的潮汐模式进行同化试验，验证资料同化模式的可行性和有效性。对中国南海的无结构自适应网格斜压模式初步调试完成，将进一步引入实际的温盐边界条件。

（四）灾害性天气气候过程及其动力学研究

1.中国地区极端高温事件时空特征分析

基于中国地区 1961~2008 年的逐日温度观测资料，通过选取不同的极端高温指数，研究了过去 48 年中国地区极端高温事件的时空变化特征。研究表明，采用日最高气温(T_{max})大于 35°C 作为极端高温指标，分析了 1961~2008 年我国夏季极端高温事件的分布特征，结果表明，我国高温频发的区域主要位于黄淮、南方、新疆和川渝四个地区，每个地区平均每年的高温日数都有 6 天以上，特别是新疆，其高温日数可达 30 天以上。利用日平均气温(T_{mean})大于 30°C 的温度阈值作为极端高温指标，在黄淮、南方和川渝地区得到的高温日数与基于 T_{max} 的结果相近，但是对于新疆地区，由于昼夜温差较大的原因，得到的高温日数较基于 T_{max} 的指标明显偏少。此外，基于日平均气温、日最高气温资料的第 95 百分位温度阈值来定义极端高温事件，分析了第 95 百分位温度阈值的空间分布

特征,表明,黄淮、南方、新疆和川渝地区为温度阈值的高值中心,与前面绝对高温指数得到的高温频发区相对应。针对 1961~2008 年中国夏季极端高温日数的时间变化特征分析表明,在四个高温频发区(黄淮、南方、新疆和川渝地区),高温日数都呈现出明显的年际变化特征。此外,除年际变化外,不同地区高温日数还表现出明显的年代际变化特点:黄淮地区,1961~1979 年和 2001~2008 年间高温日数偏多,1980~2000 年高温日数偏少;南方地区,20 世纪 60 年代到 70 年代初,高温日数较多,70 年代中后期到 90 年代中后期,高温日数相对较少,之后高温日数又呈现偏多特点;川渝地区,20 世纪 60 年代和 70 年代,高温日数偏多,80 年代高温日数偏少,90 年代之后高温日数又偏多。

2.我国极端高温事件的可预报性分析

基于美国国家环境预报中心 NCEP 的第二代气候预测系统 CFSv2 1982~2008 年的集合回报试验结果,评估了 CFSv2 对中国地区夏季极端高温事件的预报技巧。结果表明,CFSv2 基本上能抓住中国夏季日平均气温气候态的空间分布形态,尤其是抓住了中国四个高温多发区的温度特点。但是模式回报的气温高值中心位于黄河下游地区和新疆地区,与观测相比有些差异,尤其是新疆地区,回报的气温远高于观测。采用 POD、SR 和 Bias 三个指标评估 CFSv2 的预报技巧,发现:由 POD、SR 两个指标可以看出,在南方沿海、内蒙西部地区,CFSv2 模式具有较高的预报技巧,而在东北东部、新疆西部及黄淮地区,模式的预报技巧较低;由评估指标 Bias 可以看出,对于全国大部分地区 CFSv2 预报的极端高温事件发生的次数多于观测,但是对于黄淮地区、新疆大部分地区,预报的极端高温事件发生的次数少于观测。再者,随着高温强度的增大,CFSv2 对极端高温事件的模拟技巧减小。

3.2013 年夏季我国南方地区高温热浪成因分析

2013 年夏季,我国江南、江淮、江汉及重庆等地出现大范围的高温酷热天气。高温天气范围广、持续时间长、强度大。浙江许多地区最高气温高达 42℃ 以上,多次破历史纪录。高温天气对国民经济和人民生活产生严重影响。

产生高温酷热天气的直接原因是西太平洋副热带高压的异常与稳定维持。与气候平均相比,2013 年副高的西伸脊点偏西、北界偏北、强度偏强。我们的初步分析表明,青藏高压东伸加强有利于副高西伸。中高纬度冷空气活动较弱有利

于副高北抬。ITCZ 西段的强度极强，从南侧支撑了副高的维持。此外，副高的年代际变化也为今年夏季副高的异常变化提供了年代际背景。

(1) 欧亚大陆大型斜脊斜槽的客观识别方法

欧亚大陆大型斜脊的客观监测和追踪方法使用逐日 500 hPa 高度场并由以下 4 个步骤实现：对原始场进行空间滤波；不同等值线类型的辨认；槽脊点的辨认；槽脊线的界定。我们将等值线分成三类：绕极等值线的波状部分、绕极等值线的经向翻转部分和局地闭合等值线。槽脊点的辨认：对波状部分和局地闭合等值线，我们采取了夹角最小法界定了其槽脊点，而对于翻转部分，我们采用其斜率为无穷大来界定其槽脊点。大型槽脊线的识别和界定：第一步，由等值线 $Z500_{\max}$ (5840 m) 上的某一脊点出发，以位势高度下降的等值线顺序，寻找下一个与之最近的脊点。令这两个脊点的距离为 d ，当满足下列两个条件之一时，可视这两个脊点为同属一条脊线：1) $d \leq L_{\min}$ ；2) $L_{\min} \leq d \leq L_{\max}$ 且两个脊点的等值线位势高度之差小于 50 m。最后，利用击中率、误报和 threat score 评估了 2011 年 11 月 15 日至 2012 年 3 月 15 日逐日槽脊线的界定能力，结果表明该界定方法能非常好地抓住实际槽脊线。另外也利用了波破碎界定方法来对比该界定方法对翻转波分的抓取能力，结果表明效果也非常好。同时我们也将这项客观界定方法应用于大范围持续性低温事件分析，结果表明西伯利亚高压的水平扩展范围跟大型斜脊斜槽的纬向尺度具有很好对应关系。

利用该方法，分析了大范围持续性低温事件和寒潮事件的大型斜脊的分布特征，结果表明欧亚大陆的大型斜脊在寒潮事件中较少出现，北太平洋脊具有同等重要，倒 Ω 型明显。而对于大范围持续性低温事件，欧亚大陆大型斜脊频繁或持续出现，纬向尺度大，而北太平洋大型斜脊较少。

2. 典型类型冷涡特征研究

利用旋转主分量分析，根据与冷涡相联系的阻塞型环流的位置，将冷涡活跃期（5.1-6.15）的冷涡分成了四种典型类型，即：贝加尔湖（BKL）型、叶尼塞河（YNS）型、乌拉尔（UR）型和雅库茨克/鄂霍次克海（YO）型。并且根据它们持续时间的长短，将每类冷涡又分成了持续型（5 天以上）和移动型（3~5 天）事件。其中 BKL 型和 YNS 型冷涡的阻塞型环流分别分布在贝加尔湖和叶尼塞河地区，它们的异常环流在欧亚大陆表现出波状环流特征。UR 型和 YO 型冷

涡的阻塞型环流分别分布在乌拉尔山地区和雅库茨克/鄂霍次克海地区，它们的异常环流在东亚地区表现出经向型特征。这四类冷涡系统均为深厚系统，分布于对流层至平流层，异常中心分布在对流层顶（250 hPa）。其中 BKL 型和 YNS 型表现出向西倾向的斜压结构，而 UR 型和 YO 型呈现出相当正压结构。

BKL 型冷涡形成起源于上游的波状环流，并且下游雅库茨克/鄂霍次克海阻塞型环流的维持有利 BKL 持续型冷涡的维持。BKL 型冷涡与贝加尔湖地区高位涡（PV）入侵相联系，对于持续型事件，PV 的波状环流于冷涡峰值日前后在东亚地区会形成反气旋式波破碎，导致波能量在该地区形成波阻，而移动型冷涡表现出波状结构，冷涡很快向下游移动。YNS 型冷涡的形成过程与 BKL 型冷涡相类似。UR 型冷涡在乌拉尔阻塞型异常环流向东南扩展下由贝加尔湖地区东移至中国东北地区。YO 型冷涡形成与阻塞型环流由白令海峡逐渐西扩至东北亚地区相联系。与 BKL 型所不同的是，YO 型的 PV 型环流表现出气旋式波破碎而引起暂时波阻。这四类冷涡的阻塞高压活动中心与它们各自的阻塞型异常环流中心相对应。

YNS 型冷涡不仅引导冷空气进入中国东北，并进入中国中南部地区，而其余三类主要导致中国东北地区气温偏低。四类冷涡均使得中国东北地区降水偏多，特别是 UR 和 YO 型冷涡，这两类冷涡引起中国东北地区降水分布更广。

3.冷涡与西太平洋遥相关（WP）型的动力学过程研究

分析了四类冷涡与西太平洋遥相关（WP）型的关系及 YO 型冷涡形成和维持的动力学过程。东北冷涡易生成于 WP 型的负位相(WP⁻)，并随着 WP⁻振幅的加强，东北冷涡变得更加活跃。特别是，YO 型冷涡与 WP⁻型具有非常显著的线性关系。

YO 持续型东北冷涡的环流发展演变和气候态背景非常相似，它是气候态背景环流在季节内强烈发展导致的。由于由加拿大向阿拉斯扩展的阻塞型环流，极涡分布于次极区，在乌拉尔山阻塞型环流的发展下，闭合低压由极涡切断出来并形成东北冷涡。而 YO 移动型异常环流与气候态背景环流是相反的，表现出显著的波状环流结构。

WP⁻型贯穿于 YO 型冷涡的整个生命史中，它的存在使得原先向白令海峡至勘察加半岛的极涡路劲偏向于贝加尔湖。同时使得西风在东亚分支，引起高频瞬

变波在雅库茨克/鄂霍次克海形成正高度异常反馈和中国东北地区负高度异常反馈。对于移动型冷涡，这种反馈作用更加突出。另外，中国东北地区的气旋式天气尺度 Rossby 波破碎有利于东北冷涡的形成和维持。而在移动型冷涡衰亡期，中国东北地区反气旋式波破碎特别活跃。

4.大范围持续性低温事件和寒潮事件的阻塞高压活动特征

利用 Tibaldi and Molteni、Pelly and Hoskins 和 Small 等人三种阻塞高压指数，分析了大范围持续性低温事件和寒潮事件的阻塞高压活动特征。结果表明：（1）不论寒潮还是大范围持续性低温事件，均与北大西洋中纬度地区阻高活动的加强为前提条件；（2）寒潮事件阻高分布于乌拉尔山附近，阻高的局地特征明显。（3）大范围持续性低温事件的阻高扩展至乌拉尔山以东，阻高活动呈西南-东北方向扩展，冷空气活动的空间尺度更大。

5.中国华北夏季降水和印度夏季风降水的协同变化研究

基于 1951–2012 年的再分析资料以及站点观测资料，针对中国华北夏季降水和印度夏季风降水的协同变化关系，利用集合经验模态分解法（EEMD）对两个降水序列进行时间尺度分解，并在年际尺度上分别考察了对两者正相关关系形成的有利和不利环流形势以及海温背景。结果表明，印度夏季风降水和华北夏季降水序列的较好正相关关系主要来自周期为 2~3 年的年际尺度分量，两者在该时间尺度上的相关系数为 0.34，达到 99% 的置信度。在年际尺度上，与印度夏季风降水异常有关的对流层中高层环半球遥相关型（CGT）波列能够衔接伊朗高原和环渤海地区上空的同位相环流异常（反气旋式或气旋式），从而有利于华北夏季降水和印度夏季风降水之间的协同变化。然而，这一协同变化关系并不总是成立。当伊朗高原上空异常中心的位置偏西时，CGT 波列无法形成。这时，即使印度夏季风降水出现显著异常，华北地区却易受东亚-太平洋型或西太平洋型遥相关型的影响而其降水形势可能与印度夏季降水形势相反。同样是强印度夏季风发生的前提下，春夏 La Niña 发展型海温异常有利于华北夏季降水增多，而冬春 El Niño 衰减型则易于使华北夏季降水减少。在同样是弱印度夏季风发生的前提下，春夏 El Niño 发展型易于使华北夏季降水减少，而冬春夏 El Niño 维持型（或小幅衰减型）则易于使华北夏季降水增多。这些结论有助于进一步理解印度夏季降水与华北夏季降水的正相关关系，从而对华北夏季降水的预测具有参考意义。

6.春季北半球蒙古气旋移动路径研究

基于 1948-2013 年 NCEP/NCAR 再分析资料的逐日数据以及站点地面沙尘资料,采用 850hpa 相对涡度场气旋追踪方法,界定了春季北半球蒙古气旋生成地、盛期位置、消亡地以及路径的分布。根据蒙古气旋的不同移动路径及其对我国不同地区造成的天气影响,定义了蒙古气旋的两种路径,并统计了这两类蒙古气旋的频数与强度的年际和年代际变化。同时还分析了两类气旋所对应的不同低频背景环流。贝加尔湖南部地区和东部地区山脉背风坡是蒙古气旋的主要发源地,我国东北地区是蒙古气旋达到盛期的主要区域。70 年代以后蒙古气旋个数处于减少的趋势,2000 年以后蒙古气旋个数略有增多。向东路径气旋会对我国华北、东北地区造成明显的沙尘影响。东南路径气旋大多生成于贝加尔湖南部,蒙古地区,会对我国华北、东北、甚至东南地区造成明显的影响。向东路径蒙古气旋的背景环流为正位相的斯堪的纳维亚环流型。东南路径蒙古气旋的背景环流场特征为,俄罗斯西部为负异常中心,拉普捷夫海附近延伸到我国西北地区为明显的正高度异常,东北低涡盛行。极涡在东西伯利亚海、楚科奇海以及波弗特海一侧显著减弱并伸向斯堪的纳维亚半岛至俄罗斯西部是该背景低频环流最早的前兆信号。两次典型个例的分析表明,两类气旋引起的沙尘范围明显不同,东北路径气旋会对我国华北,东北造成明显的沙尘天气灾害,东南路径所对应的沙尘影响范围则更为偏南。

7.南方冬季降水异常分析

对比分析了不同强度的 MJO 各位相对应的我国南方冬季降水异常分布、环流异常分布以及水汽通量异常分布特征差异,探讨了极强和强 MJO 各位相影响我国南方冬季降水的主要物理过程。分析了印度洋不同地区上空极端强盛对流活动事件,探讨了不同地区极端强盛对流活动事件对应的我国南方冬季降水异常分布特征、大气环流特征以及中纬度 Rossby 波活动,探讨了印度洋不同地区上空极端强盛对流活动事件影响我国南方冬季降水的主要途径。上述研究可为我国南方冬季降水的预测提供参考。

8.CMIP5 模式对中国气候变化显著信号出现时间预估分析

基于优选的 30 个 CMIP5 全球模式,预估了 RCP4.5 情景下中国气温和降水变化超出其自然变率的时间。结果表明:年和季节地表气温的信号最早出现在青

藏高原东部，比信号出现最晚的东北地区早 10~20 年。中国大部分地区地表气温信号出现时间最早发生在夏季，而东北和华北地区则最早在秋季。年降水的信号最早出现在青藏高原东北部，季节尺度上，则最早出现在东北北部和西北西南部的冬季以及青藏高原东北部的冬春季。对于中国南方来说，在 2090 年以前降水变化都未超过其自然变率。