

2022 年度科研工作进展

(一) 东亚气候多尺度变异的机理和可预测性

1、揭示了初夏东北冷涡形成和发展的动力学机制

东北冷涡是中高纬行星波发展过程中形成的切断低压，是东亚大气环流的重要组成部分。东北冷涡的发生发展常伴随东北地区的极端降水和低温事件。然而，关于东北冷涡演变动力学过程目前仍是有待揭示的科学问题。利用逐 6 小时的再分析数据，从局地波流相互作用的角度揭示了初夏东北冷涡演变的三阶段物理过程。在冷涡形成初期，来自北大西洋副极地地区的 Rossby 波列传播至东北亚地区，形成气旋式环流异常；随后在波动通量平流和局地斜压波反馈的共同作用下，东北亚地区的气旋式环流异常迅速加强，形成切断低压；最后，能量向北太平洋频散，冷涡消亡。进一步分析表明，影响东北冷涡生命史的动力过程受背景环流的调制作用。在初夏季节，东北亚地区处于欧亚温带急流的出口处和东亚副热带急流的北侧，有利于气旋式环流的形成和能量的聚集。在冷涡形成初期，Rossby 波列沿着欧亚温带急流向下游传播。在平均流对异常动量的平流作用下，温带急流出口处的风场减弱，副热带急流处的风场加强。前者阻碍了波列进一步向太平洋传播，从而在东北亚地区产生能量聚集；而后者有利于副热带急流低层的斜压波产生。这两个过程共同导致东北冷涡快速增强。

2、揭示了 2021 年初夏东北冷涡异常活跃的成因

2021 年春末东北冷涡异常活跃，4—5 月的活跃日数创 1948 年以来历史新纪录。东北冷涡不但能够为东北本地带来伴随冰雹、龙卷等强对流天气，也能为长江流域等较远地区的极端天气气候的发生提供重要背景。研究发现，前期秋冬季热带中东太平洋海温和青藏高原东南部的积雪深度异常是造成 2021 年春末东北冷涡异常活跃的重要下垫面影响因子。一方面，在 2020 年秋冬季，热带太平洋发生了一次中等强度的拉尼娜事件，激发的 Rossby 波能量沿着中纬度西风急流向下游传播，在欧亚

大陆形成了 EU-II 型“负-正-负”遥相关波列，有利于东北冷涡产生和维持。另一方面，青藏高原冬季积雪异常能够通过热力和水文等作用影响未来春夏的大气环流特征，在 2020/2021 年冬季，青藏高原东南部的积雪深度异常偏少，位列历史第二，在 2022 年春季通过热力和水文效应引起了局地异常的反气旋环流和东北亚气旋式环流，为东北冷涡的产生提供有利大气环流背景场。与此同时，与东北冷涡活跃相伴随的异常大气环流型能够通过正压能量转换过程，从副热带和温带西风急流中获得能量，从而为冷涡长时间维持提供了能量条件。因此，本研究从外强迫和大气内部过程两个方面揭示了 2021 年春末东北冷涡极端活跃的成因，从而为进一步东北冷涡次季节-季节尺度活跃程度的气候预测提供了一定科学依据。

3、揭示 2021 年夏季中国东部降水季节内变化的物理机制

2021 年夏季中国东部地区降水发生显著的季节内变化，梅雨期（6-7 月）我国东部地区降水以北方偏多为主，梅雨偏弱，8 月份长江流域发生超强的到黄梅，而北方降水显著偏少。结合观测诊断、理论分析和数值试验，揭示了季节内变化的物理机制。6 月东部降水总体呈现“北多南少”分布，东北和华北北部降水偏多主要受到东北冷涡活动频繁的影响，而东北冷涡的异常活跃可能与春季以来 NAT 维持正位相有关。7 月东部降水仍呈“北多南少”分布，长江下游至内蒙古东部的经向型多雨带及河南特大暴雨，主要受到台风“烟花”长时间活动、以及偏强的大陆高压、偏东偏北的西太副高和异常偏强的东亚夏季风的共同作用，而副热带大气对 La Niña 衰减的滞后响应可能是副高偏东偏北、东亚夏季风异常偏强的原因之一。2021 年前冬青藏高原积雪异常偏少，有利于高原上层对流加热偏强、高原南北侧热力对比偏强，可能对 7 月东亚夏季风异常偏强有一定的贡献。2021 年 8 月，北太平洋西部强异常反气旋(WNPAC)和东亚中高纬环流异常的共同作用与青藏高原地区的极端强降水异常密切相关。此外，海温异常的背景是春季迅速衰减的强东太平洋 La Niña 事件和夏末出现的第二次 La Niña 事件，并伴有夏季弱热带印度洋变暖和强热带大西洋变暖。快速衰减的 La Niña 事件和弱热带印度洋变暖似乎不足以诱导 2021 年 8 月

的强 WNPAC。观测证据和数值实验表明，晚春至夏季热带大西洋的快速变暖显著促进了 WNPAC 的增强和西移，与第二次 La Niña 事件相关的热带东太平洋海温冷异常也为 2021 年 8 月的 WNPAC 强活动提供了有利条件。总体而言，热带大西洋快速变暖和第二次 La Niña 的发展促成了 2021 年 8 月的强西 WNPAC，而控制冷空气活动的东亚中高纬度环流异常的维持机制尚不清楚。

4、揭示了 2022 年夏季我国气候异常特征及其成因

2022 年夏季我国气候异常特征突出，区域性、阶段性旱涝灾害明显，降水空间差异显著。东亚夏季风季节进程整体提前，南海夏季风爆发和主要雨季开始时间均较常年偏早。我国东部地区降水呈“北多南少”异常分布，东北南部、华北南部、黄淮东部、西北地区东部和华南东部等地降水较常年明显偏多。长江流域降水异常偏少，发生了历史罕见的夏伏旱。6 月中旬至 8 月的大范围高温热浪在持续时间、影响范围和极端程度等方面均打破历史纪录。2022 年盛夏长江流域高温伏旱与西太副高异常偏强偏西直接相关。西太副高的异常多种因素共同作用的结果(图 2)。首先，在全球变暖背景下，副热带地区位势高度场存在加强的趋势。其次，2022 年夏季赤道中太平洋冷海温的发展加强，并通过 Gill-Matsuno 响应在其西北侧激发出反气旋异常环流，增强西太副高。再次，2022 年夏季热带印度洋偶极子负位相可以激发对流层上层青藏高原附近的异常反气旋环流，导致南亚高压偏强偏东，西太副高偏强偏西。8 月北大西洋中纬度暖海温异常偏强，北大西洋涛动正位相，激发沿着副热带西风急流传播的“丝绸之路”型遥相关波列，进一步导致西太副高加强西伸。最后，2022 年盛夏黑潮及其延伸区海温的异常偏高，也有利于西太副高加强并向北扩展。

5、提出了理解西风急流经向变化的新视角

西风急流的大尺度经向波动通常伴随槽脊的移动和演变，是引发中高纬地区寒潮、热浪等极端天气气候事件的重要系统之一。研究急流经向波动性的成因不仅是气候动力学重要且前沿的课题，也对提高中高纬极端天气气候事件的预测能力，理解极端事件对气候变化的响应等具有重大的现实意义。利用位涡示踪模式，研究了

北半球冬季急流经向波动变化的物理机制。模式中位涡的演变仅取决于平流风场，这种单项依赖关系，提供了模式框架可用于分析时间平均流和瞬变涡旋活动在急流经向波动时空变率中的相对贡献。分析显示，在年际时间尺度上，急流经向波动性增大的主要原因是背景风场的减弱。背景态的低频流变化是引起急流经向波动性变化的主要原因。该工作为分析极端事件的时间演变、气候变化背景下极端事件的成因等提供了一个有效的模式框架。

6、揭示了季节内尺度上北极-欧亚温度遥相关的不对称性与机理

从 20 世纪 90 年代以来，北极地区经历了快速增暖。几乎在同一时期，欧亚大陆冬季寒潮频发。这一现象被称作是“暖北极-冷欧亚”现象。然而，这种现象不仅存在于气候变化尺度，还存在于年际尺度和次季节时间尺度。作者着眼于次季节时间尺度，揭示出次季节尺度上“暖北极-冷欧亚”现象的非对称性。大气内部变率和北极海冰在“暖北极-冷欧亚”的次季节非对称性中扮演了不同的作用。分析指出，乌拉尔山反气旋所引起的温度平流是驱动“暖北极-冷欧亚”的直接因素。来自北大西洋的低频波列是激发乌拉尔山反气旋的主导因素。进一步分析显示，北极海冰的次季节变化是延长“暖北极-冷欧亚”异常的重要因子。北极海冰通过动力作用和热力作用，引起乌拉尔山地区背景风场减弱，有利于反气旋增强，进一步维持“暖北极-冷欧亚”的持续性异常。

7、揭示出高低层热力强迫影响温带急流的新机理和定量诊断方法

气候变化背景下，热带对流层高层和北极对流层低层同时增暖，但两者对温带急流位置的影响是相反的。理解对流层高、低层的热力强迫对温带急流位置影响的不同作用和相对贡献不仅是气候动力学中的前沿问题，也对气候预估有重要的现实意义。多层准地转通道模式是研究不同层热力强迫影响温带急流的有效工具，因为它去除了球面效应和副热带急流对温带急流的可能影响，仅仅包含了外强迫对单纯的温带急流的影响。该模式的敏感性试验表明，温带急流对高层热力强迫的变化更敏感。通过对数值模拟结果的波流相互作用诊断发现，温带急流对外强迫的响应取

决于瞬变涡旋生成项和瞬变涡旋耗散项的相对贡献。其中，高层热力强迫主要影响瞬变涡旋的生成，低层热力强迫主要影响瞬变涡旋的耗散。定量分析表明，瞬变涡旋的生成对温带急流的影响更高效。进一步建立了瞬变涡旋生成和耗散与热力强迫的定量关系，发现瞬变涡旋生成取决于热力强迫的垂直结构，而瞬变涡旋耗散仅依赖于垂直平均的外强迫强度。该定量关系首次将传统的瞬变涡旋参数化理论从垂直平均的背景扩展到垂直方向非均匀外强迫的背景，对理解其他热力强迫（海洋锋区、气溶胶、潜热等）对温带急流及其极端事件的影响过程具有重要的借鉴意义。

8、指出 QBO 东风位相能够增强 NAO 对中国北方气温异常的影响

观测分析发现，在后冬 QBO 对 NAO 与中国东北地表气温之间的相关关系存在显著的调制作用。当 QBO 处于东风位相时，NAO 与中国东北地表气温异常之间呈显著的正相关关系；而在 QBO 西风位相下，两者的相关关系较弱，几乎可以忽略不计。这种影响关系的变化与冬季 QBO 的 NAO 空间分布型的调控作用有关。QBO 东风位相有利于 NAO 北支活动中心的向东扩展，并伴随着东亚大槽的显著异常，使得 NAO 与地表气温的显著相关可由欧洲向东延伸至东北亚地区；而在 QBO 西风位相下，NAO 北支活动中心主要局限于北大西洋扇形区，对地表气温的影响也主要局限于北大西洋临近大陆。冬季 QBO 对 NAO 空间型的调制作用，则与大尺度行星波的垂直传播以及平流层-对流层耦合相联系。当 QBO 位于东风位相时，赤道平流层低层受东风控制，纬向平均西风零界线北移至赤道以北，使得向中高纬度地区的波导增强，行星波活动也增强。相反，当 QBO 位于西风位相时，赤道平流层低层受西风控制，纬向平均西风零界线南移至赤道以南，使得向赤道方向的波导增强，而中高纬度地区的行星波活动减弱。因此，冬季 QBO 东风位相有利于对流层-平流层耦合增强，NAO 呈现类似 AO 的准环状结构，NAO 对地表气温的影响能够扩展至东北亚地区；相反，QBO 西风位相不利于对流层-平流层耦合，NAO 主要局限于北大西洋扇形区，对地表气温的影响也主要局限于临近大陆。进一步利用 6 个能够较好模拟 QBO 信号的 CMIP6 耦合模式的历史模拟数据，分析了这些模式对 QBO-NAO-

地表气温关系之间关系的模拟性能。结果表明，所有模式均未能再现与观测类似的 QBO 不同位相下 NAO 空间结构及其与平流层极涡关系的变化，这可能与模式未能正确模拟在联系 QBO 与 NAO 中起到关键作用的 Holton–Tan 效应有关。

9、揭示西太平洋副热带高压次季节纬向振荡机制

研究了西太平洋副热带高压在 10-25 天和 25-50 天的次季节纬向振荡的演化特征和机制，包括对流-大气环流相互作用和海气相互作用。伴随着副高的西扩，一股抑制对流自西太平洋上空向西北方向传播，在西太平洋西北处出现反气旋环流异常。暖海温异常滞后于异常对流，在时间上表现为近四分之一相位差关系，且 25-50 天时间尺度海温异常振幅大于 10-25 天尺度海温异常振幅。进一步分析表明，两个时间尺度上副高的西扩主要是由于对流-大气环流的相互作用。抑制对流异常引起的冷却在其西北侧引起辐散异常，通过水平辐散导致大气反气旋异常。反气旋异常又使得行星边界层出现向下的干对流，从而有利于对流抑制的向西传播。通过这种相互作用过程，对流异常和大气环流异常紧密结合，一起向西传播，从而形成副高在纬向振荡。此外，由于海温异常振幅在两个时间段不同，海气相互作用在这两个时间段中的作用也不同。在 10-25 天时间尺度，海洋对大气环流没有明显的反馈；而在 25-50 天时间尺度，海温异常可以充分发展并更有效地对大气产生影响。

10、揭示北半球夏季东亚经向次季节振荡模态及其对东亚夏季降水的影响

次季节经向波列是东亚夏季风系统的主要特征，但其热带和热带外中高纬动力学途径的物理图像还没有被完全弄清。利用 1979-2019 年 NCEP-DOE 再分析资料（第 2 版本）的数据，分析发现东亚沿岸不同高度层次 10-30 天时间尺度纬向风变率占主导地位。通过对其进行以 7 天为时间单位的扩展 EOF 分析，分离并确定了两个 10-30 天时间尺度北半球夏季东亚经向次季节振荡模态（ISMO），即 ISMO1 和 ISMO2。ISMO1 和 ISMO2 都主要表现为准双周振荡，并在对流层具有相当正压结构。其中，ISMO1 在东亚地区自北向南传播，主要变率位于对流层上层，主要起源于欧洲西部大气内部变率与欧亚中高纬土壤湿度异常强迫；ISMO2 在东亚地区自南

向北传播，主要变率位于对流层中下层，与热带西北太平洋 BSISO2 有密切关系。ISMO1 和 ISMO2 能很好地解释东亚夏季风的主要次季节变率特征，它们分别对中国东部经向偶极型和中国南部地区夏季次季节降水异常有重要影响。总体而言，ISMO 引起的极端降水概率的变化与其相联系的 10-30 天次季节降水异常空间分布型有很好的对应关系。由于 ISMO1 和 ISMO2 能很好地分离起源于热带外中高纬和热带的东亚经向次季节振荡信号，它们能够作为东亚夏季风次季节变率及其相联系的极端降水的新的监测和预测因子。

11、揭示西北太平洋夏季海温和降水负相关性模态与成因

西北太平洋作为影响厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 发生发展以及东亚季风区的关键区域，其海气相互作用十分复杂。与热带其它海区海洋强迫大气的特征截然不同，西北太平洋夏季的海温 (SST) 和降水异常呈现显著的负相关关系，表现为大气驱动海洋为主的海气相互作用。目前针对西北太平洋夏季海温异常与降水异常负相关的成因还未得到一致性结论，因此，本研究基于 Hadley 海温资料和 GPCP 降水资料，通过 SVD 分析方法得到了海温异常和降水异常负相关的两个主要变率模态：第一模态在热带西北太平洋最为显著，常会出现在 ENSO 发展年夏季，被称为热带西北太平洋海气耦合模态；第二模态负相关性在副热带西北太平洋最为显著，往往出现在 ENSO 衰减年夏季，称为副热带西北太平洋海气耦合模态。热带和副热带模态的降水异常均由大气环流异常导致，其中，热带西北太平洋模态的降水异常主要受赤道东印度洋和赤道中太平洋反相 SST 异常的遥强迫，通过 Mastuno-Gill 环流响应激发的热带西北太平洋低层大气涡度异常所产生；副热带西北太平洋模态的降水异常则是受赤道印度洋和赤道中太平洋同相 SST 异常的强迫，通过经向 Hadley 环流导致的副热带西北太平洋的散度异常所产生。两个模态的局地 SST 倾向异常都主要受海洋热力过程的控制，其中，太阳短波辐射占主导，而西北太平洋水平海温平流异常则几乎没有贡献。与之相反，在 SST 和降水异常显著正相关的海洋区域，局地 SST 平流异常对 SST 倾向异常的形成起主导作用。因此，决定西北太平洋夏季大气

强迫海洋这一独特热带海气相互作用的关键因素在于西北太平洋较弱的 SST 平流项。进一步研究发现，西北太平洋夏季 SST 平流项与低层纬向风气候态之间存在着密切的耦合关系。850hPa 纬向风气候态零线呈 S 型分布，南侧零线拐点与夏季季风槽相对应，恰巧位于热带西北太平洋上方，而北侧零线拐点与副热带高压西脊点对应，恰巧位于副热带西北太平洋上方。正是由于西北太平洋上空接近于零的低层纬向风速，海表面 SST 平流作用受到抑制。因此，850hPa 纬向风气候态的零线可用来准确地指示西北太平洋夏季 SST 和降水异常显著负相关的区域位置。

12、提出理解我国西南准静止锋的气候视角：结构、变化和影响

云贵准静止锋是影响我国西南地区冬季天气气候的重要系统，与西南地区冬季的极端天气气候事件有密切联系。以往的研究多从天气尺度对云贵准静止锋的极端事件进行分析，但是云贵准静止锋的气候特征还没有得到很好的揭示。本研究基于云贵地区近地面大气位温水平梯度，对云贵准静止锋特征进行了客观定量化，从气候角度对云贵准静止锋的结构、变率和影响进行了全面系统的分析。研究发现云贵准静止锋在 1-3 月最强最活跃，并且其强度具有显著的次季节变率。从气候态上看，来自东亚地面冷高压东南缘的东北风将冷空气平流到云贵高原东部较低的地形上，冷的东北气流受到西侧较高地形的阻碍而堆积并转向向上，将近地面的水汽向上输送，形成了大片的低云。因此，云南和贵州虽然几乎位于同一纬度上，气候特征却形成了强烈的对比，云贵准静止锋东侧的贵州总是低温、寡日照、连阴雨，而锋面西侧的云南却总是温暖、晴朗。从次季节变异上看，锋面西侧的暖异常和东侧冷异常都能够引起云贵准静止锋的增强，其中东侧的冷异常起了主导作用。云贵准静止锋异常增强伴随着云贵高原东侧近地面东风异常增强，受地形阻挡而上升，由此导致的水汽异常向上输送形成了锋面东侧上湿下干的比湿异常结构，对流层低层云量异常增加。贵州和云南的气候差异加剧，即锋面东侧贵州异常寒冷，日照时间异常减少，降水频率异常增加，而西侧云南则异常温暖，日照时间异常增加，降水频率异常减少。

13、指出北太平洋模态海气耦合过程能够引起大气环流异常隆冬反转

过去研究发现，冬季中纬度北太平洋海表温度异常存在一个显著的独立于 ENSO 变率的年际模态，即北太平洋模态（NPM）。然而，由于受热带海气异常的强烈影响，NPM 模态的性质以及与 NPM 相联系的海气系统异常特征等还不清楚。我们的研究发现，NPM 型海表温度异常在初冬发展，在隆冬成熟，在冬末衰减，而相关的大气环流异常在前后冬表现出强烈的反转。动力学诊断分析表明，NPM 型海表温度异常在初冬主要是受大气强迫发展，然后通过非绝热加热强迫和大气瞬变涡旋强迫对大气产生反馈，导致整层大气环流异常在后冬发生反转。反转的大气环流异常和海洋主导的海表湍流热通量异常一起，使得 NPM 型海表温度异常在冬末衰减。因此，NPM 是一种大气强迫的、海气耦合的阻尼模态。相关关系分析表明 NPM 在前冬与北极涛动（AO）密切相关，而在后冬关系不显著。通过这种模态，海洋提供了一种记忆机制，使得前期大气异常可以产生跨季节的后续影响。NPM 型海温异常反馈使得前冬北太平洋上空大气异常在后冬发生反转，这为北太平洋附近地区，特别是东亚气候异常的前后冬差异从中纬度海气相互作用角度提供了一种可能的机理解释。

14、揭示北极放大效应对中高纬大气向极输送的影响及其反馈作用

北极是全球气候变化的敏感区和关键区。近几十年来，北极的增暖速率是全球平均的两倍以上，这一现象被称为“北极放大效应”（Arctic amplification）。北极放大效应可能对中纬度大尺度环流以及极端天气等产生重要影响，但它与中纬度气候变化的联系目前还存在很大的争议。此外，冬季中纬度波流系统的变化会引起怎样的向极热量和水汽输送反馈仍不清楚。因此，研究北极放大效应对中高纬大气向极输送的影响及其反馈作用，有利于弄清北极对中纬度天气气候的影响，并且完善对北极放大效应形成机制的认识。本研究使用了五套不同分辨率的再分析资料。一方面考虑到北极观测相对较少，再分析资料不确定性较大；另一方面，研究组前期工作指出，高分辨预报模式得到的再分析资料能更准确地分辨出中纬度瞬变波活动以及

瞬变波和平均流的相互作用过程。结果表明，伴随北极放大性变暖，北极对流层显著增温、增湿。中高纬定常波，特别是定常一波向极的热量和水汽输送增加，有利于北极进一步增温和增湿，因此定常波输送对北极放大效应可能起到正反馈作用。同时，北极放大性变暖会减弱大气经向温度梯度，导致大气斜压性减弱，从而引起瞬变波活动减弱。因此，瞬变波向极热量和水汽输送相应减少，不利于北极增温、增湿，对北极放大效应可能起到负反馈作用。由于相反的定常波和瞬变波向极热量输送相互抵消，导致总的向极热量输送变化较小，对北极温度和水汽贡献也较小。而对向极水汽输送而言，增强的定常波作用占主导，造成总的向极水汽输送在中高纬明显增加。这些变化特征在年代际和年际时间尺度上均成立。四套高分辨率再分析资料中向极输送变化结果较为一致，而与相对低分辨率的 NCEP2 再分析资料差异较大。我们的研究区分出了北极放大对中高纬不同尺度波动的热量和水汽输送的影响，强调了水汽输送的正反馈作用及其对冬季北极放大性增暖的重要性。

（二）全球气候系统和东亚区域气候模式发展

1、初步建成中国多模式集合预测系统（CMME）2.0 版本

在 CMMEv1.0 系统的基础上，通过新增模式成员，优化月季预测子系统，新建次季节预测子系统，改进气候现象预测产品，完善多模式集合预测技巧检验评估等方面的工作，初步建成了 CMME 系统 2.0 版本。在 CMME-月季预测子系统方面，增加了自主运行的气科院 CAMS-CSM 模式、南信大 NUIST 模式和国外直接获取的日本 JMA-CPS 数据，模式数量增加到 9 个，完成了新增模式的历史回算和实时运行，开发了 2m 气温距平和降水距平百分率预测产品。时间尺度包括逐月与 3 个月滚动季节平均，空间范围包括全球、亚洲、中国、10 个中国陆地气象地理一级地区区划（东北、华北、华东、华中、华南、西北、西南、新疆、西藏、内蒙古）、7 个全国主要流域（松花江流域、辽河流域、海河流域、黄河流域、淮河流域、长江流域、珠江流域）。新建了 CMME-次季节预测子系统，包括中国气象局（CMA）、中国科学院大气物理研究所（IAP-CAS）、美国国家环境预测中心（NCEP）提供的三

个次季节模式（BCC-CPS-S2Sv2、Fgoals-f2、CFSv2）数据，采用滞后集合方法建立了候平均的次季节数据集。气候要素预测产品包括：1）全国降水距平百分比、气温异常和全球 500hPa 位势高度及其异常的月尺度预测产品，每月 11、16、21、26 号对次月预测结果各更新一次；2）全球降水距平百分比和气温异常的次月预测产品，每月 1、6 号对当月中下旬预测结果各更新一次；3）全国降水距平百分比、气温异常和全球 500hPa 位势高度及其异常的逐旬预测产品，每旬的第 1 候更新对未来 4 旬的预测结果；4）全国降水异常、气温异常的候尺度预测产品，每候第 1 天更新对未来 8 候的预测结果。在 CMME-气候现象预测子系统方面，开发和优化了全球海温距平预测产品，以及月尺度 ENSO 指数、印度洋海温指数、大西洋海温指数、MJO、副高、南亚高压、AO 等监测预测产品。提供了相应的数据集和图形产品，增加模式成员后的集合预测产品在实时预测业务中得到了应用。

2、BCC-ESM 地球系统模式研发取得重要进展

BCC-ESM 模式分辨率大幅提升，水平分辨率从 280 公里提高到 75 公里，大气垂直模拟范围从距地面 40 公里提高到 80 公里；改进了气溶胶和大气化学过程模块，目前该模式能够较好的模拟硫酸盐气溶胶的分布；针对国际上地球系统模式普遍低估 20 世纪后半叶地面气温的问题，开展敏感性试验，确定二氧化硫及硫酸盐沉降相关过程为误差来源，为进一步改进模式性能提供了依据；发展平流层大气化学模块，将大气化学过程扩展到平流层，合理再现了平流层臭氧三维空间结构。

3、持续推进高分辨率气候系统模式 BCC-CSM4 研发

积极准备参与国际 CMIP7 计划，持续推进高分辨率气候系统模式 BCC-CSM4 的研发，同时为下一代 CMA-CPSv4 气候模式预测系统研发奠定了基础。目前全球高分辨率气候系统模式的大气水平分辨率由 45 公里提高至 30 公里，垂直分层由 56 层增加至 70 层，模式顶由 0.1hPa 提高至 0.01hPa，具备了模拟中层大气环流的能力。模式对风场、温度场垂直结构、对热带平流层准两年振荡（QBO）、热带季节内振荡（MJO）以及全球降水分布等具有较理想的模拟能力。

4、CWRF 区域气候模式改进及其应用

基于 BCC_CSM2_HR 延伸期预测信息，嵌套 CWRF 区域气候模式，开展中国区域 15 公里分辨率延伸期预测，形成全国 15 公里分辨率延伸期（15-30 天）基本气象要素预测产品。面向 2022 年北京冬奥会服务需求，提供了 CWRF 区域气候模式冬季延伸期预测产品服务，在重大活动气象服务保障中发挥了重要科技支撑作用。基于 BCC_CSM 全球气候模式驱动 CWRF 区域气候模式，开展中国区域 30 公里分辨率逐月滚动的多物理方案配置集合月季气候预测，每年 14 个起报时次，共计 28 个集合样本，逐月发布月季基本气象要素预测产品。丰富了我国气候趋势客观化预测模式和方法，为业务预测提供月季尺度的模式预测参考信息。CWRF 模式预测系统为庆祝中国共产党成立 70 周年、2021-2022 年冬奥测试赛、冬奥和冬残奥运动会等重大活动提供逐月滚动气温、降水、高度场和风场等预测产品，为社会安全和防灾减灾提供了有力的科学支撑。

（三）全球气候现象和东亚气候预测关键技术

1、动力-统计相结合模型提升我国次季节气候预测能力

在系统检验 BCC-CSM2-HR 模式次季节预测能力的基础上，通过聚类分区建立动力-统计预测模型（DSPM），对我国候尺度降水异常进行预测，并对模型的可预报性来源进行分析。研究表明，BCC-CSM2-HR 模式能够较好的抓住我国东部雨带移动的气候特征，但对大部分地区降水异常的预测技巧仅局限在 3 候左右。通过 K-means 聚类分析将我国按照冬半年和夏半年各分为 7 个气候区，对每个区域寻找降水同期环流和对流预报因子。进一步考虑次季节降水-环流/对流相互匹配的连续演变特征，利用 E-SVD 建立预报模型，将模式实时预测的环流和对流投影到相应模态上，重构出未来 6 候我国降水异常。独立样本检验表明，DSPM 在华北、长江和华南等地预测技巧有明显提升，部分地区技巧可达 6 候。可预报性来源分析表明，当初始时刻 MJO 和 BSISO2 信号较强时，DSPM 预测技巧提升更加明显，这说明模型可能更好地把握了 MJO 和 BSISO 的环流影响，从而将 BCC 模式对这两个主模态的

较高预测技巧转化到降水的预报中。

2、基于海温驱动因子的经验预测模型提升东北盛夏降水预测能力

基于观测和再分析资料，研究了东北盛夏降水年际变异的海温驱动因子，结合敏感性试验揭示了其影响机制，在此基础上，构建了东北盛夏降水的经验预测模型。研究表明，东北盛夏降水年际变率与热带印度洋、太平洋和大西洋海温异常的协同影响密切相关。通过诊断分析和模式验证相结合的办法，揭示了三大洋冬春季海温演变对东北盛夏降水年际变率的协同影响机理。春季热带北印度洋海温暖异常、热带西-东太平洋海温梯度增大和北大西洋三极子海温负位相（从热带到中高纬呈现+--的距平分布）发展，通过海气相互作用，共同加强了盛夏西北太平洋反气旋异常和中国东北地区上空的南风异常，有利于增强东北夏季风和水汽输送。此外，春季北大西洋三极子海温负位相发展，通过激发中高纬度遥相关波列，在东北地区上空形成低压，有利于水汽辐合。在此基础上，选取热带北印度洋海温、热带西-东太平洋海温梯度春冬季倾向变化和北大西洋三极子海温春冬季倾向变化作为预测因子，采用线性回归方法建立了东北盛夏降水的经验预测模型。该模型在1961–2019年的交叉检验时间相关技巧(TCC)为0.72，2003–2019年的独立预测TCC为0.70，显著高于五个国内外先进气候模式的预报技巧（1979–2019年集合平均的预测技巧TCC为0.24）。因此，本研究所提出的经验模型对东北盛夏降水预测具有应用价值。

3、基于CFSv2模式和海冰强迫的新疆冬季气温动力-统计降尺度预测

针对新疆地区的冬季气温，建立了动力-统计降尺度预测模型。该模型利用CFSv2模式11月起报冬季U200，关键区45-80N/30-70E，以及9月北极海冰，关键区72-83N,30-150E。研究时段为1983-2018年。利用年际增量方法，基于EOF-SVD的场信息耦合统计降尺度模型，建立统计降尺度预测模型。通过CFSv2模式原始结果、年际增量和距平的统计降尺度结果TCC空间分布场可以看到，CFSv2原始模式的冬季气温TCC预测技巧在新疆的绝大部分区域为负值，经过统计降尺度之后，新疆全区的TCC均转为正值，尤其在新疆的中部地区提高更加显著，距平场的

TCC 能够达到 0.27 以上（通过 95%信度检验水平）。多年平均的空间距平相关系数从 CFSv2 原始模式的 0.08 提高到 0.23，利用该统计降尺度模型进行了 2013-2018 年的实时预测检验，该模型的 6 年平均 ACC 能够达到 0.36，较新疆的业务预测结果的 0.02 提高显著，说明该模型能够很好的抓住近几年新疆冬季气温的年际变化特征，能够有效提高新疆冬季气温的业务预测能力。。

4、动力统计相结合的西太平洋台风盛行路径季节预测模型构建

西北太平洋和南海是全球台风活跃最为频繁的地区之一，每年生成的台风总数占全球三分之一左右。准确预测台风活跃季节的移动路径，对防灾减灾具有重要意义。针对西太平洋台风盛行路径季节预测，基于国家气候中心第二代气候系统模式 BCC_CSM1.1m 研发了动力统计相结合的预测模型，并在业务预报中得到应用。根据西太平洋台风盛行路径与海温和大气环流背景之间的物理联系，建立了动力统计相结合的台风路径季节预报模型。该预测模型选取西太平洋台风活动盛期路径密度分布作为预报对象，提取台风路径密度时空分布的主要模态。针对年代际和年际变化分量，利用多元线性预测模型进行预测，最终通过加权组合得到台风路径密度空间分布预报。检验结果显示，构建的预测模型较好地反映了西太平洋热带气旋盛行移动路径的年际变化。不同 ENSO 位相背景下的预测技巧评估结果表明，西北太平洋台风路径密度的可预报性主要来源于 ENSO，特别是强厄尔尼诺事件。

5、基于机器学习和深度学习算法研发气候预测关键技术

基于梯度提升决策树（GBDT）实现了我国季节气温和降水的机器学习预测，并在空间异常模态技巧方面较 MODES 原有方法有明显提高，2012-2021 年汛期降水和冬季气温后报的 160 站 ACC 分别超过 0.15 和 0.25。机器学习算法的预测结果通过汛期专题会商和年度专题会商提交给预测室值班班组，在 2022 年汛期和年度气候趋势预测业务中得到应用。此外，将深度学习图像超分辨率技术和气候预测背景知识相结合，对增强的深层残差网络算法（EDSR）进行改进，构建了我国 25 公里气温降水超分辨率技术模块。数据输入为 S2S 多模式集合的 150 公里分辨率候平均

气温和降水异常数据，并且包含了地形、850hPa 风场和 500hPa 高度场数据；输出为 25 公里分辨率的候平均气温降水异常数据。与双线性插值等传统方法相比，超分方法对气温和降水极值的误差明显减小，说明该方法有效降低了传统插值方法的空间平滑效果，与真实观测更接近。

(四) 气候变化的检测归因和影响评估

1、1901–2018 年中国气温变化的人为影响检测

由于早期观测数据有限，人类对近一个世纪以来区域变暖的影响很少受到关注。本文研究了 1901 年以来不同外部强迫对中国年和季节气温变化的相对贡献。首先，我们对四组观测数据集进行比较，以验证观测数据的代表性，特别是 20 世纪初的数据。然后，基于最优指纹法将观测到的温度变化与耦合模式比较计划第 5 次(CMIP5)和第 6 次(CMIP6)的输出结果进行比较。研究发现两代气候模式均能够可靠地再现 1901-2018 年中国的长期变暖特征。然而，这些模式也略微低估了年和冬季气温上升的幅度。1901 - 2018 年观测到的 1.54°C 的年变暖速度比全球平均值更快，主要归因于人为强迫信号。通过温室气体(GHG)、人为气溶胶(AA)和自然强迫(NAT)三种信号检测分析表明，1901-2018 年 GHG 和 AA 对年增温的贡献率分别为 2.06°C 和 -0.45°C 。CMIP6 单个模式的温室气体信号在中国的年、季气温变化中均可检测到。该研究成果发表在 *Journal of Climate*。

2、1901–2014 年中国极端温度变化的人为影响检测

气温日温差(DTR)表示为日最高温度(T_{max})与最低温度(T_{min})之差，对人类健康、生态和农业具有重要意义。本研究利用多个观测数据集发现自 1901 年以来，特别是在 20 世纪 50 年代中期以后，全球大部分陆地上的 DTR 普遍下降。DTR 的变化是由于 T_{max} 和 T_{min} 对外部强迫强响应的升温速率不同所致。CMIP6 气候模式通常能再现了 DTR 的大部分变化，以及 T_{max} 和 T_{min} 的变化。然而，这些模型低估了观测到的 DTR 变化。基于最优指纹法的检测和归因分析表明，人类活动排放的温室气体是 DTR 变化的主要驱动因素。1901-2014 年，全球和大部分大陆地区在 T_{max}

和 Tmin 的长期变化中都能检测到人为气溶胶信号，而 DTR 不能检测人为气溶胶影响信号。这表明观测到的 DTR 下降不是对人为气溶胶排放的简单反应。自然强迫信号可以忽略不计。据估计，在全球范围内，人类活动影响可以解释这三个变量中 90% 以上的观测变化。在中国，虽然模式模拟结果在区域尺度上有较大偏差，但人类活动的影响也很明显。

3、1961–2020 年中国区域极端降水变化的检测归因

基于 1961–2020 年最新观测资料和 CMIP6 多模式集合模拟结果，选取六个极端降水指数（包括：最大日降水量(Rx1day)、年最大连续五日降水量 (Rx5day)、基于百分位定义的极端强降水总量 (R99p) 和强降水总量 (R95p)，以及 R99p 和 R95p 对年总降水量贡献的百分比 (R99pTOT 和 R95pTOT)，设计了一系列归因方案。系统评估后发现，温室气体等人类活动是导致 20 世纪 60 年代以来中国极端降水长期变化的主要原因。采用不同极端降水指数、数据处理方法、观测资料和研究时段，均可以稳健地检测到人类活动的信号。与之前的研究相比，可看到更加有力且一致的人类活动导致极端降水增加的证据，而增加观测记录长度后导致样本量增加，再加上持续升温导致人类活动信号强度增强，这二者的共同作用进一步提高了检测能力和归因结果的可靠性。文中指出中国极端降水的增加主要是由于温室气体排放造成的，且温室气体强迫导致 Rx1day 随全球平均温度变化率与 Clausius-Clapeyron 方程中的变化率有很好的 consistency。由于 CMIP6 模式中存在对人为气溶胶强迫 (AER) 描述的不足以及模式参数化差异等问题，使得难以确定人为气溶胶对观测极端降水变化的贡献。

4、揭示了寒潮前后温度骤降以及风光资源的变化对我国用电需求和风光发电量的显著影响

气候变化背景下日益频繁的寒潮事件也将对我国电力系统产生影响。我们以 2021 年 1 月 6 日至 10 日中国发生了一次强寒潮为例进行了深度分析。这次寒潮事件期间，800 多个观测站达到历史极限。与以往分别关注电力负荷或发电响应的研

究不同，这里我们定量地揭示了对电网供需平衡的影响。在需求方面，研究发现，由于缺乏城市供暖系统，中国南方地区（0.533 GW/°C）的电力负荷增加敏感性远高于北方地区（0.139 GW/°C）。在供应方面，由于风速降低，每小时风力发电量从 1 月 6 日的最高值 110 GW 降至 1 月 9 日的最低值 54 GW。此外，1 月 8-10 日期间，太阳能发电量也明显减少。因此，电力系统的平衡受到这一寒冷事件的影响。作为一种有效的适应措施，我们进一步表明，通过一个可操作的气候模型可以在三周前获得预警。由于未来新型电力系统中风力和太阳能发电的比例预计会增加，中国电力系统对此类冷冲击事件的敏感性可能会显著增加。因此，气候科学家和电力工程师之间需要更密切的合作，以建立电力系统抵御极端寒冷的能力。

5、CMIP6 全球气候模式对北极气旋 21 世纪变化趋势预估

利用多个 CMIP6 全球气候模式的模拟结果，分析了在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种情景下，北极气旋在未来的变化情况。结果表明：北极气旋轨迹密度分布在冬季 SSP5-8.5 温室气体排放情景下与 SSP1-2.6 温室气体排放情景下的空间分布相似，但在 SSP5-8.5 情景下减少和增加的幅度都更大；夏季 SSP5-8.5 情景下在 21 世纪末期格陵兰岛南部、埃尔斯米尔岛、巴芬岛有显著增加区域，这与 SSP1-2.6 情景下夏季分布型相反。夏季在 21 世纪末期在大陆上，北极气旋基本显著减少。北极气旋轨迹密度变化趋势来看 SSP5-8.5 情景下气旋减少个数大于 SSP1-2.6，冬季减少范围比夏季小。SSP1-2.6 中，北极气旋个数无明显增减趋势，冬、夏季节，在格陵兰岛附近有相反的趋势，冬季北极气旋在此区域有负趋势，夏季则是正趋势。从时间序列上看，我们发现外来北极气旋夏季减少趋势大于冬季而北极内部生成北极气旋冬季减少趋势大于夏季。SSP5-8.5 情景下北极气旋个数减少更为显著。对于北极气旋强度，总体来看冬季在大西洋，太平洋都有所减小；夏季增加、减少幅度不明显，北大西洋有些区域气旋强度显著减小。SSP5-8.5 情景下北极气旋强度减少幅度比 SSP1-2.6 情景更大。从时间序列上看，北极气旋强度在冬季减少比夏季明显，北极内部生成北极气旋和外来北极气旋在冬季不同排放情景下都有所减少，SSP5-8.5 情景下减少

幅度更大。

6、CMIP6 全球气候模式对中国地区高温干旱模拟能力评估与预估以及 1.5°C 过冲路径下全球极端气候事件变化研究

利用多个 CMIP6 全球气候模式的模拟结果，在对模式模拟能力进行评估的基础上，分析了中国地区极端高温事件的变化特征及其可能带来的风险。中国区域年 TXx 总体表现为增温趋势，SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下线性升温速率分别为 0.13°C/10a、0.32°C/10a 和 0.69°C/10a，表现出排放情景越高，升温速率越大的特征。SSP1-2.6 情景下 2060 年之后，年 TXx 增温趋势基本停滞，但 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下，年 TXx 始终处于持续增温状态；到本世纪末，三种情景下的增温幅度分别为 1.5°C、3.0°C 和 6.1°C 左右。同时，基于 CMIP6 的 10 个全球气候的模拟结果，预估了全球平均气温在在 SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 温室气体排放情景下达到 1.5°C 升温及过冲后再次回到 1.5°C 升温时全球 23 个分区平均温度、降水的变化，并采用具有稳定统计意义的 23 个极端气候指标定量评估了全球 23 个地区相应情况下极端气候事件的可能变化。

7、亚洲地区未来 PM2.5 变化预估及其对人口暴露度的影响研究

使用耦合模式比较计划第 6 阶段(CMIP6) 多个全球气候模式的模拟结果，通过与 MERRA-2 和 SEDAC 的 PM2.5 再分析数据对比，评估了 CMIP6 模式对当代亚洲地区地表 PM2.5 及其分量的模拟能力，预估了不同共享社会经济路径(SSP)情景下亚洲不同地区地表 PM2.5 及其分量未来变化趋势及其对人口暴露度的影响。结果表明:CMIP6 多模式模拟的地表 PM2.5 浓度空间分布与 2 套再分析结果基本一致，在亚州北部 PM2.5 浓度较低地区，模式一致性较高，在浓度较高地区(沙特、伊朗和中国新疆)，一致性较差；能模拟出亚洲各地区 PM2.5 浓度年循环和季节性周期变化特征。相对于基准期 1995–2014 年，SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下，预估亚洲年平均地表 PM2.5 浓度将减少，不同 SSP 情景不同地区减少幅度和时间存在差异，减少幅度最大在南亚；SSP3-7.0 下南亚 PM2.5 浓度增加最为明显，2050 年将

增加 8；SSP370-lowNTCF 情景下南亚、东亚和东南亚减少最为明显；不同季节相比，与年平均变化趋势基本一致。不同 PM2.5 组份(BC、DUST、SO4、OA)的浓度变化与 PM2.5 浓度变化趋势基本一致；亚洲各个分区人口加权平均 PM2.5 浓度除西亚外，中亚、东亚、北亚以及东南亚在三种 SSP 情景下都呈减少趋势，大部分地区年均 PM2.5 暴露水平在未来将会得到改善，但西亚则有逐渐加的趋势，未来还需加强西亚地区碳排放的减少，而南亚地区由于人口较多，未来人体健康受到污染的态势依然严峻。总之，未来亚洲大多数地区地表 PM2.5 浓度下降，对于空气质量改善和人体健康有利，在 SSP370-lowNTCF 情景下，短寿命污染物的减少将更有利于空气质量的改善。

（五）气候科技成果转化中试基地建设

继续加强气候科技成果转化中试基地建设，对前期完成中试的项目进行推广应用，同时遴选新的科研成果进行业务转化试验。在业务部门组织的气候诊断预测论坛中推广气候科技成果转化中试平台及各项中试成果，重点推广“亚洲大范围降水和气温异常成因动力诊断和数值模拟系统”，该成果在汛期会商和 2022 年极端高温干旱材料中得到应用，为相关业务提供有力支撑。本年度引入中山大学 COAWST 海气耦合模拟框架，搭建了基于 WRF+ROMS 耦合的中国区域模式系统，分别进行了 10 年的耦合和非耦合（WRFv4.1.2）模拟验证模式性能。结果显示单纯 WRF 模式和 WRF+ROMS 耦合系统所模拟的大气气候态非常相似，WRF+ROMS 耦合系统能够对湖泊的局地气候效应如气温日变化、天气变化等进行合理的模拟。梳理了自 2019 年以来中试基地进行的各项科研成果中试项目，完成了中试基地自评材料的整理汇总。