

## 2022年汛期气候趋势预测与展望

彭京备 郑飞 范方兴 陈红 郎咸梅 詹艳玲 林朝晖 张庆云 林壬萍 李超凡 马洁华 田宝强 包庆 穆松宁 宗海锋 王磊 段晚锁 周天军

### Climate Prediction and Outlook in China for the Flood Season 2022

PENG Jingbei ZHENG Fei FAN Fangxing CHEN Hong LANG Xianmei ZHAN Yanling LIN Zhaohui ZHANG Qingyun LIN Renping LI Chaofan MA Jiehua TIAN Baoqiang BAO Qing MU Songning ZONG Haifeng WANG Lei DUAN Wansuo ZHOU Tianjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2022.22059>

### 您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

#### El Niño发展年和La Niña年东亚夏季风季节内变化的比较

Comparison of Intraseasonal Variation of the East Asian Summer Monsoon between El Nio Developing Years and La Nia Years

气候与环境研究. 2018, 23(3): 321 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17044>

#### 清江流域水热关系与东亚夏季风的联系

Correlation of Surface Air Temperature and Precipitation in the Qingjiang River basin and Its Connection with the East Asian Summer Monsoon

气候与环境研究. 2020, 25(6): 677 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20035>

#### 超长La Niña事件背景下东亚夏季风的季节内变化：1999~2000年和1984~1985年的对比分析

Intraseasonal Variation of East Asian Summer Monsoon under Multiyear La Nia Events: Contrast between 19992000 and 19841985

气候与环境研究. 2021, 26(2): 169 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20077>

#### 南海夏季风爆发与前期东亚冬季风异常的关系以及ENSO的作用

The Relationship between the East Asian Winter Monsoon Anomaly and the Subsequent Summer Monsoon Onset over the South China Sea and the Impact of ENSO

气候与环境研究. 2018, 23(4): 401 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17026>

#### 衰退年夏季西北太平洋异常反气旋季节内演变特征及其机制

Characteristics and Mechanisms of Sub-seasonal Evolution of Northwest Pacific Anomalous Anticyclone during the El Nio Decaying Summer

气候与环境研究. 2019, 24(4): 525 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18156>

#### 中国夏季降水的组合统计降尺度模型预测研究

Application of the Hybrid Statistical Downscaling Model in Summer Precipitation Prediction in China

气候与环境研究. 2020, 25(2): 163 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18168>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

彭京备, 郑飞, 范方兴, 等. 2022. 2022 年汛期气候趋势预测与展望 [J]. 气候与环境研究, 27(4): 547–558. PENG Jingbei, ZHENG Fei, FAN Fangxing, et al. 2022. Climate Prediction and Outlook in China for the Flood Season 2022 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 27(4): 547–558. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2022.22059

## 2022 年汛期气候趋势预测与展望

彭京备 郑飞 范方兴 陈红 郎咸梅 詹艳玲 林朝晖 张庆云  
林壬萍 李超凡 马洁华 田宝强 包庆 穆松宁 宗海锋  
王磊 段晚锁 周天军

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 中国是自然灾害频发的国家, 气象灾害造成的损失占自然灾害造成损失的 70%。2020 年夏季出现超长梅雨期, 长江和淮河发生洪水; 2021 年夏季, 华北雨季开始早, 结束晚, 期间发生了“21·7”河南地区特大暴雨事件。这些气象灾害都对人民生命财产造成严重损失。因此, 有必要提前对气候异常进行预测, 以提高国家的防灾减灾能力。2022 年 3 月, 中国科学院大气物理研究所开展汛期 (6~8 月) 的全国汛期气候趋势预测会商会。通过综合大气所各个数值模式和统计模型的结果, 在未来 4~6 个月全球短期气候仍处在 La Niña 事件恢复到 ENSO 正常状态的背景下, 预计 2022 年汛期 (6~8 月), 东北东部和中部、华北大部分地区、黄河中下游、东南沿海、西北地区中部、西藏大部分地区、西南地区东部和云南大部分地区降水正常略偏多, 其中环渤海湾地区降水偏多 2~5 成, 可能发生局地洪涝灾害。全国其他大部分地区降水正常略偏少, 其中长江下游地区和新疆北部降水偏少 2~5 成。预计今年登陆台风数正常略偏多。由于未来 ENSO 的趋势演变具有一定的不确定性以及夏季降水受到中高纬大气环流季节内变化的影响, 因此, 此次汛期预测结果具有一定的不确定性。我们将根据 2022 年春末、夏初大气环流和海洋等因子的实际演变趋势, 做进一步补充订正预测。

**关键词** 汛期气候预测 El Niño—南方涛动 东亚夏季风 夏季降水异常 登陆台风

文章编号 1006-9585(2022)04-0547-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2022.22059

## Climate Prediction and Outlook in China for the Flood Season 2022

PENG Jingbei, ZHENG Fei, FAN Fangxing, CHEN Hong, LANG Xianmei, ZHAN Yanling, LIN Zhaohui, ZHANG Qingyun, LIN Renping, LI Chaofan, MA Jiehua, TIAN Baoqiang, BAO Qing, MU Songning, ZONG Haifeng, WANG Lei, DUAN Wansuo, and ZHOU Tianjun

*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** China is a country prone to natural catastrophes, and the losses generated by meteorological events account for 70% of all natural disaster losses. In the summer of 2020, the unusually long Meiyu period occurred, leading to heavy floods in the Yangtze River valley and Huaihe River basin. In the summer of 2021, the rainy season in North China began earlier and ended later than usual, during which the “21·7” torrential rain event occurred in Henan Province. All of

收稿日期 2022-04-22; 网络预出版日期 2022-06-15

作者简介 彭京备, 女, 1970 年出生, 正研级高工, 主要从事灾害性天气成因机理及短期气候预测方法研究。E-mail: pengjingbei@mail.iap.ac.cn

通讯作者 范方兴, E-mail: fanfangxing@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) XDA19030403, 国家重点研发计划 2017YFA0603201

**Funded by** Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA19030403), National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFA0603201)

these natural disasters have had terrible effects on the local economy and society. As a result, seasonal climate predictions are extremely significant. In March 2022, the Annual Symposium on China Climate Prediction for the summer season (June–August) was held at the Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS). Climate anomalies in China for summer 2022 are expected based on the results of several numerical and statistical models of IAP against the background of a transition from a La Niña event to an El Niño/Southern Oscillation (ENSO) normal state in the next 4–6 months. During the flood season (June–August) 2022, slightly more than normal seasonally averaged precipitation might occur in eastern and central parts of Northeast China, most parts of North China, the middle and lower reaches of the Yellow River, the southeast coastal region of China, central Northwest China, most parts of Tibet, the eastern part of Southwest China, and most parts of Yunnan Province. In particular, 20%–50% above average may be forecast in the Bohai Bay area, meaning a high risk of local flooding disasters. In contrast, other portions of China may see drier than normal weather this summer, and the precipitation amount might be reduced by 20%–50% in the lower reaches of the Yangtze River and the northern part of Xinjiang. This summer’s landfall typhoon may be slightly more than normal. Due to the uncertainty of ENSO evolution and limited ability to predict intra-seasonal variations of mid- and high-latitude atmospheric circulations, these climate prediction results for flood season are uncertain to some extent. The authors will make additional estimates based on the observed fluctuations in atmospheric and oceanic processes in the late spring and early summer of 2022.

**Keywords** Climate prediction for flood season, El Niño–Southern Oscillation (ENSO), East Asian summer monsoon, Summer precipitation anomaly, Landfall typhoon

## 1 引言

在中国, 夏季的主要气象灾害包括暴雨洪涝、高温干旱等。在各种自然灾害造成的经济损失中, 与气象灾害相关的占 71% 左右 (孔锋, 2019)。2013 年夏季, 长江流域梅雨偏少, 发生了 1951 年以来的最强的持续性高温干旱事件, 南方部分地区高温强度突破了历史记录 (彭京备等, 2016)。在 2020 年夏季, 长江流域和淮河流域出现超长梅雨, 梅雨区平均雨量较常年偏多 168.3%, 显著超过 1996 年、1998 年和 2016 年, 为 1961 年以来最多。强降水导致淮河发生流域性较大洪水。降水造成经济损失约 1800 亿元 (Clark et al., 2021; Li et al., 2021; Zhou et al., 2021)。2021 年夏, 雨带偏北。华北雨季开始早, 结束晚, 雨季长达 59 d, 为 1961 年以来第二长。华北雨季监测区的平均降雨量为 276.4 mm, 较常年偏多 103.2% (<https://mp.weixin.qq.com/s/-d7V57cQac3Av-PMgVaAmA>[2021-09-12])。期间, 河南地区发生了“21·7”特大暴雨过程 (冉令坤等, 2021; 布和朝鲁等, 2022; 齐道日娜等, 2022), 造成河南省 1478.6 万人受灾, 因灾死亡失踪 398 人, 直接经济损失 1200.6 亿元 (<https://china.huanqiu.com/article/44BspR7MveW>[2021-08-02])。因此, 如果能在季度尺度上提前预测气候异常的分布, 就可以及早采取措施, 减轻气候灾害

所带来的损失 (丁一汇等, 2013; 王会军等, 2020)。

大气所是最早开展短期气候预测的研究机构之一。早在 1988 年, 中国科学院大气物理研究所 (大气所) 就利用气候模式开展了跨季度汛期降水距平预测, 获得了初步成功 (林朝晖等, 1998, 2003)。1991 年大气所的跨季度预测正式应用于中国夏季跨季度降水预测 (曾庆存等, 2003)。近 10 年, 大气所最新发展的 El Niño—南方涛动 (El Niño—Southern Oscillation, ENSO) 预测系统、大气模式、耦合模式、动力—统计方法、统计模型、资料同化方法和订正方法等不断地加入大气所汛期预测中, 形成包含 ENSO 预测系统, 大气环流模式、海—气耦合模式、统计模型和动力—统计模型及海洋四维同化方法、海气耦合积分方法、集合预测方法、可信度和概率预测方法以及订正技术等短期气候预测系统 (图 1)。

## 2 预测方法简介

目前, 有包括 ENSO 预测系统、大气环流模式、耦合模式等 9 个大气所自行研制的数值模式, 以及 2 个动力—统计方法和 4 个统计模型参加到汛期预测中。首先, 将模式和模型提供的夏季大气环流异常预测结果进行集成, 集成的同时综合考虑外强迫因子的影响和前期大气环流信号, 得到有物理

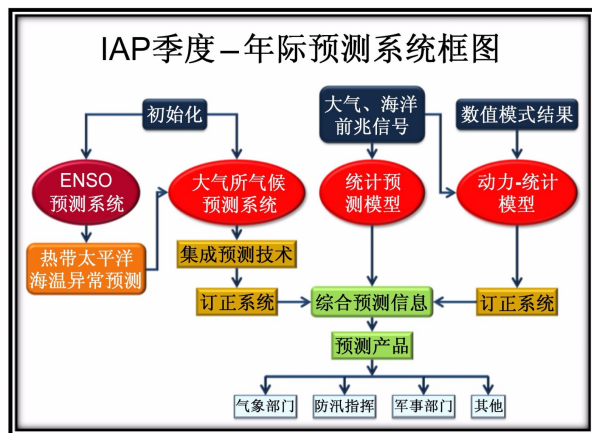


图 1 中国科学院大气物理研究所短期气候预测系统框图  
Fig. 1 Diagram of the short-term climate prediction system developed by the Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS)

意义的夏季大气环流异常预测结果。根据对夏季大气环流形势的估计，并结合数值模式和统计模型对夏季气候异常的预测意见，经专家会商，最终给出对夏季气候异常的预测意见，并提供给政府有关部门。这套多模式集成预测方法的优势在于综合考虑各动力模式和统计模型中的有效信息，形成有物理意义的预测意见，从而提高最终综合预测结果的准确性。经过多年的预测实践，这套预测系统预报效果逐步提高，趋于成熟。2013~2019 年预测平均分为 70 分。

目前有多个模式参加大气所 ENSO 短期气候预测。大气所 ENSO 集合预测系统是在发展耦合初始化系统 (Zheng and Zhu, 2010) 和随机模式误差扰动的集合预测方法 (Zheng and Zhu, 2016) 的基础上逐步建立和完善的，目前该系统的预测能力在实际预测检验中可达近一年的预测时效 (Zheng et al., 2022)。今年又新增了两个简单 ENSO 预测模式 LASG NFSV-ICM 和 FU-IAP ASCSM，为此次汛期气候预测提供新的信息。LASG NFSV-ICM 是 Tao and Duan (2019) 在一个中等复杂程度耦合模式基础上考虑非线性强迫奇异向量方法建立的动力预测模型，FU-IAP ASCSM 是 Fang and Zheng (2021) 通过春季海气信号与冬季 ENSO 峰值的统计关系建立的统计预测模型。

参加我国汛期降水等预测的大气所数值模式分为大气环流模式和耦合模式两类。两个大气环流模式 IAP AGCM-2L (张凤等, 2004) 和 IAP AGCM-9L (郎咸梅等, 2004) 以及陆气耦合模式 IAP-DCPv3

预测系统 (张贺等, 2011) 均以大气所 ENSO 集合预测系统的预测海温异常与观测海温异常的加权组合作为外强迫，采用两步法进行预测。“海—陆—气—冰”耦合模式包括基于通用地球系统模式 (CESM1.2.2) 构建的短期气候预测系统 (以下简称 NZC-PSM)、基于中科院地球系统模式发展的弱耦合同化预测系统 (以下简称 CAS-ESM-C; Lin et al., 2019) 和基于气候系统模式建立的季节内—季节气候预测系统 (以下简称 FGOALS-f2; 包庆等, 2019)。NZC-PSM 预测系统是在原有 NZC-PCCSM4 预测系统的基础上构建和改进的新系统，在多方面具有良好的预测性能。CAS-ESM-C 预测系统可将实时的海洋观测资料与耦合模式相结合，利用集合最优插值 (EnOI) 同化方案为模式的“海—陆—气—冰”4 个模块提供协调一致的预测初始场，然后将耦合模式向前积分得到预测结果。无缝隙预测系统 FGOALS-f2 核心为大气所的气候系统模式 CAS FGOALS-f2，其大气分量模式为大气所自主研发的大气环流模式 FAMIL2，其动力内核采用立方球面网格上的有限体积方法 (FV3)，主要的物理过程包括自主研发的显式对流降水方案 (RCP)。所有数值模式的基本信息和预测方案见表 1。

除了数值模式，动力模式与统计相结合的方法及统计模型也提供汛期预测意见，包括：基于 IAP AGCM-9L 的动力—统计模型 (Lang and Zheng, 2011)，基于前期外强迫信号的统计模型，基于 ENSO 演变 (宗海锋, 2017) 和基于前期冬季欧亚大陆新增积雪面积 (穆松宁和周广庆, 2010)，以及根据前期冬季高空纬向风的统计预测模型 (张庆云等, 2003)。

### 3 气候趋势预测

#### 3.1 外强迫因子的监测和预测

ENSO 是全球气候年际变化中最重要因子。根据美国气候预报中心的监测，2021/2022 年冬季，海洋 Niño 指数 (the Oceanic Niño Index, 即 Niño 3.4 区海表温度异常的 3 个月滑动平均，以下简称 ONI) 已连续 5 个月低于  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ，峰值达到  $-1^{\circ}\text{C}$ ，即发生一次弱至中等强度的 La Niña 事件。

大气所 ENSO 预测系统预测 2022 年春季，Niño 3.4 区冷海温距平 (Sea Surface Temperature Anomaly, 以下简称 SSTA) 将逐渐趋于正常，夏

表 1 中国科学院大气物理研究所短期气候预测系统所使用的数值模式

模式		模式简介		模式的初始化方案		模式的预测方案	
IAP AGCM-2L	大气环流模式	水平分辨率 $2.5^\circ$ (纬度) $\times 2^\circ$ (经度), 垂直分层为2层	预测所采用的大气初始场资料为美国国家环境预测中心 (NCEP) 的再分析资料; 下边界实测海温初始场来自美国国家航空航天局 (NASA) 喷气推进实验室 (JPL) 的月平均观测资料。	模式初始化方案	预测采用了28个集合样本, 初值分别取自2022年2月1~28日不同的大气初始场, 积分时段为2022年2月15日至8月31日。预测结果为28个集合样本的算术平均相对于模式气候态的异常。在模式积分过程中, 热带太平洋地区的月平均海温异常为当年2月实测海温异常和其他各月预测海温异常的加权组合; 在热带太平洋以外地区维持2月实测海温异常不变。预测的月平均海温异常由大气所ENSO集合预测系统提供。	模式的预测方案	预测采用了7个集合样本, 分别从2022年2月22~28日积分到2022年10月底。 预测过程中下边界驱动海温的取值方法同IAP AGCM-2L。
IAP AGCM-9L	大气环流模式	为全球大气环流格点模式, 水平分辨率为 $5^\circ$ (纬度) $\times 4^\circ$ (经度), 同IAP AGCM-2L 垂直分层为9层, 层顶为10 hPa。		模式初始化方案	预测试验的大气初始场中的主要变量 (包括风场、温度、比湿和气压) 来源于美国国家环境预测中心 (NCEP) 的FNL业务模式的全球对流层分析系统, 其余大气变量来自该预测系统的耦合模式AMIP试验的对应时刻的模拟结果。海面初始场也采用了该陆气耦合模式的AMIP试验结果。	模式的预测方案	大气初始场取值2022年3月1~5日00:00、06:00、12:00和18:00每天4个时段共20个样本, 积分6个月从2022年3月1日至9月1日。 预测过程中下边界驱动海温的取值方法同IAP AGCM-2L。
IAP-DCPv3 预测系统	气-陆耦合模式	此预测系统的模式由大气环流模式IAP AGCM 4.1和陆地模式CLM4.0耦合而成。 IAP AGCM 4.1的水平分辨率约为 $1.4^\circ$ (纬度) $\times 1.4^\circ$ (经度), 垂直方向为30层的 $\sigma$ 坐标, 模式顶为2.2 hPa。 采用了修改后的Zhang-McFarlane (MZM) 对流参数化方案。气溶胶模块为MAM3。		模式初始化方案	通过集合最优插值同化方案产生“海—陆—气—冰”四个模块协调一致的初始场。	模式的预测方案	预测采用了9个集合样本, 初值随机取自连续同化试验的2月15日至3月15日中9组不同的初始场积分时段为2022年3月1日至8月31日。预测结果为9个集合样本的算术平均相对于模式气候态的异常。
CAS-ESM-C 预测系统	海—陆—气—冰耦合模式	中国科学院地球系统气候分量模式 (CAS-ESM-C) 是大气所自主研发的全球耦合模式, 包含大气、海洋、陆地和海洋四个地球物理动力模块。 大气模式IAP AGCM4, 水平分辨率约为 $1.4^\circ$ (纬度) $\times 1.4^\circ$ (经度), 垂直方向为26层的 $\sigma$ 坐标, 模式顶为2.2 hPa; 海洋模式LICOM, 水平分辨率为 $1^\circ$ (纬度) $\times 1^\circ$ (经度), 垂直方向为30层; 海冰模式为NCAR研制的CSM海冰模式CISM5; 陆地模式为NCAR发展的通用陆地模式CLM3。		模式初始化方案	该预测系统使用NCEP FNL数据为大气模式和海面模式提供初始异常信息; 利用全球海洋同化系统 (GODAS) 数据提供海洋初始异常信息。	模式的预测方案	为了减小预测的不确定性, 采用12个样本的多初始场集合预测方案。本次预测从2022年3月1日起报, 积分至8月31日。预测结果为12个集合样本的算术平均相对于模式气候态的异常。
NZC-PSM 预测系统	海—陆—气—冰耦合模式	此预测系统是基于通用地球系统模式 (CESM1.2.2) 发展的新一代全球“海—陆—气—冰”耦合预测系统。 大气模式CAM5: 水平分辨率为 $1.25^\circ$ (纬度) $\times 0.95^\circ$ (经度), 垂直方向30层; 海面模式CLM4.5: 水平分辨率为 $1.25^\circ$ (纬度) $\times 0.95^\circ$ (经度); 海洋模式POP2.1: 非均匀网格, 水平分辨率 $1^\circ$ 左右; 海冰模式CICE4: 非均匀网格, 水平分辨率 $1^\circ$ 左右。		模式初始化方案	此预测系统采用松弛通近方法同化大气和海洋的再分析资料, 以获得动力协调的初始场。大气同化资料为FNL/GFS再分析资料, 海洋同化资料为OISST/OSTIA卫星反演海温资料。其中大气再分析包括标准等压面风场、温度场和高度场数据, 海洋再分析包括多层海温再分析数据。	模式的预测方案	本次预测采用了16个集合样本, 从2022年3月11日起报, 预测未来6个月的气候状况。
FGOALS-12 预测系统	海—陆—气—冰耦合模式	大气环流模式FAMIL2, 采用立方球网格 $96^\circ$ , 水平分辨率 $1^\circ$ , 垂直方向分为32层, 模式层顶为2.16 hPa (约45 km); 陆地分量采用CLM4.0模式, 水平分辨率 $1^\circ$ ; 海洋分量采用POP2模式, 采用 $gx1v6$ 网格, 水平分辨率 $1^\circ$ , 垂直方向有60层; 海冰分量采用CICE4模式; 各个分量之间通过美国国家大气研究中心研发的七代耦合器进行差值和数据进行交换, 完成耦合并行计算。		模式初始化方案		模式的预测方案	

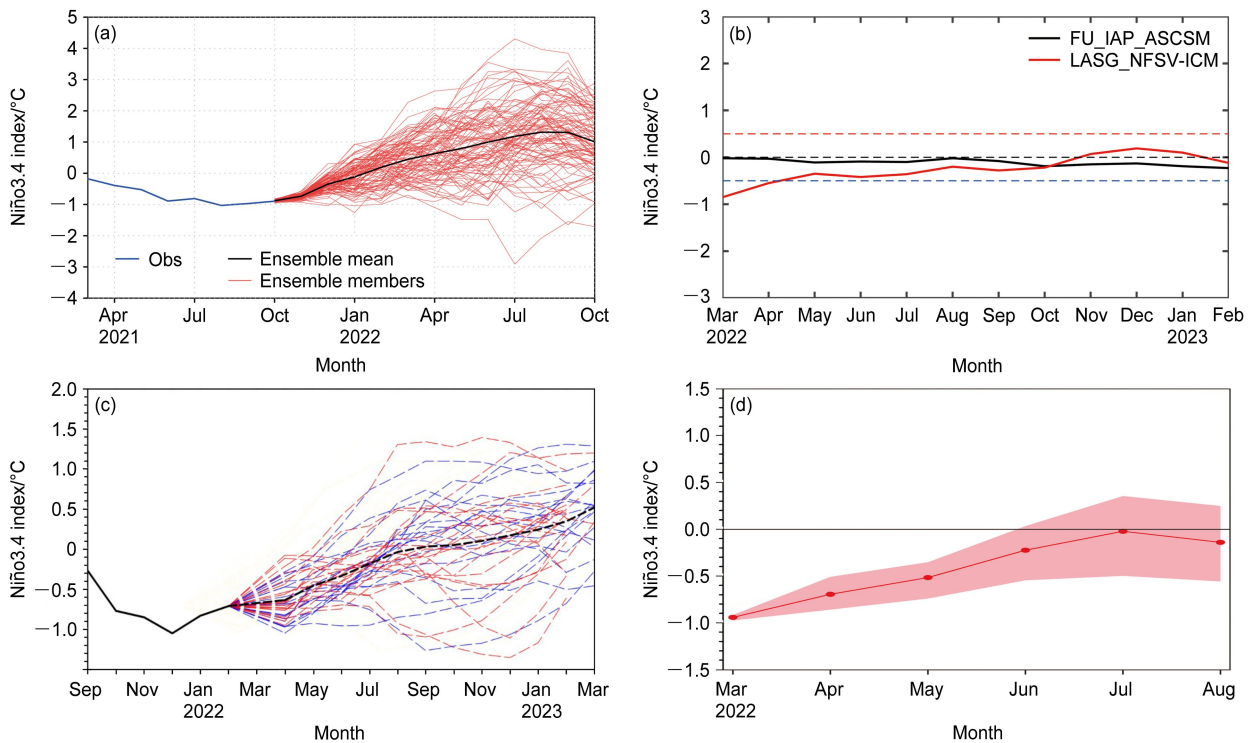


图2 中国科学院大气物理研究所模式 (a) IAP-ENSO 集合预测系统 (红线表示预测样本, 黑线表示集合预测结果, 蓝线表示实测)、(b) 两个简单的 ENSO 预测模式、(c) 大气所 FGOALS-f2 季节内—季节预测平台 (黑色实线表示实测, 黑色虚线表示集合预测结果, 红色和蓝色虚线表示预测样本) 和 (d) NZC-PSM 对 ENSO 的预测

Fig. 2 Predictions of ENSO from (a) IAP-ENSO ensemble prediction system (red line for sample prediction, black line for ensemble prediction, and blue line for observation), (b) two simple ENSO prediction models, (c) FGOALS-f2 intra-seasonal and seasonal prediction platform (black solid line for observation, black dashed line for ensemble prediction, red and blue dashed lines for sample prediction), and (d) NZC-PSM model

季的中东太平洋海温将处于 ENSO 正常位相 (图 2a)。大气所简单的 ENSO 预测模式、耦合模式 NZC-PSM 和 FGOALS-f2 均预测未来 Niño 3.4 区的负 SSTA 将逐渐减弱 (图 2b-2d)。综合上述结果, 预测 La Niña 事件将在 2022 年春季结束, 2022 年夏季, ENSO 将处于中性状态。这与国外大部分 ENSO 预测结果一致。如欧洲中心预测 2022 年夏季 Niño3.4 区 SSTA 在  $-0.5 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$  之间。

除了海温, 积雪是另一个影响我国夏季气候的重要的下垫面因子。研究表明, 欧亚大陆前期冬季新增积雪面积关键区指数与江南降水指数之间的相关可以达到  $-0.57$ , 即当冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积偏大时, 我国江南至华南地区降水偏少 (穆松宁和周广庆, 2010)。监测显示, 2021/2022 年冬, 欧亚大陆北部新增雪盖面积偏少, 有利于我国江南地区夏季降水偏多。

### 3.2 大气环流和降水的预测

西太平洋副热带高压 (以下简称“副高”) 是影响中国夏季东部雨带分布的最重要的环流系统之

一。夏季, 副高西北侧为偏南气流所控制, 有利于水汽输送, 多有降水发生。而在副高控制地区, 则易出现高温晴热天气 (陶诗言, 1980; 卫捷等, 2004; 彭京备等, 2007; Xue and Fan, 2016)。而且, 对大部分的数值模式来说, 热带和副热带地区的预测技巧较高。因此, 首先来关注副高的预测。根据大气所 ENSO 预测系统提供的海温演变, 大气所大气模式 (IAP-AGCM-2L、IAP-AGCM-9L 和 IAP-DCPv3 预测系统) 均预测, 2022 年夏季副高较模式气候态面积偏大、西伸脊点偏西 (图 3 上行)。其中 IAP-DCPv3 预测系统预测副高脊线正常略偏北。大气所耦合模式 NZC-PSM 给出了去掉与不去气候趋势的两种预测。如果不去掉气候趋势, 副高表现出西伸脊点偏西、面积偏大的特点。而去掉趋势后, 预测的副高特征线与模式气候态基本接近, 即副高接近正常 (图 3 中红色虚线)。两种预测方案均预测副高脊线正常略偏北。CAS-ESM-C 预测副高较模式气候态脊线偏北、西伸脊点偏东。综合大气所各模式结果, 预测 2022 年夏季, 副高较气候平均

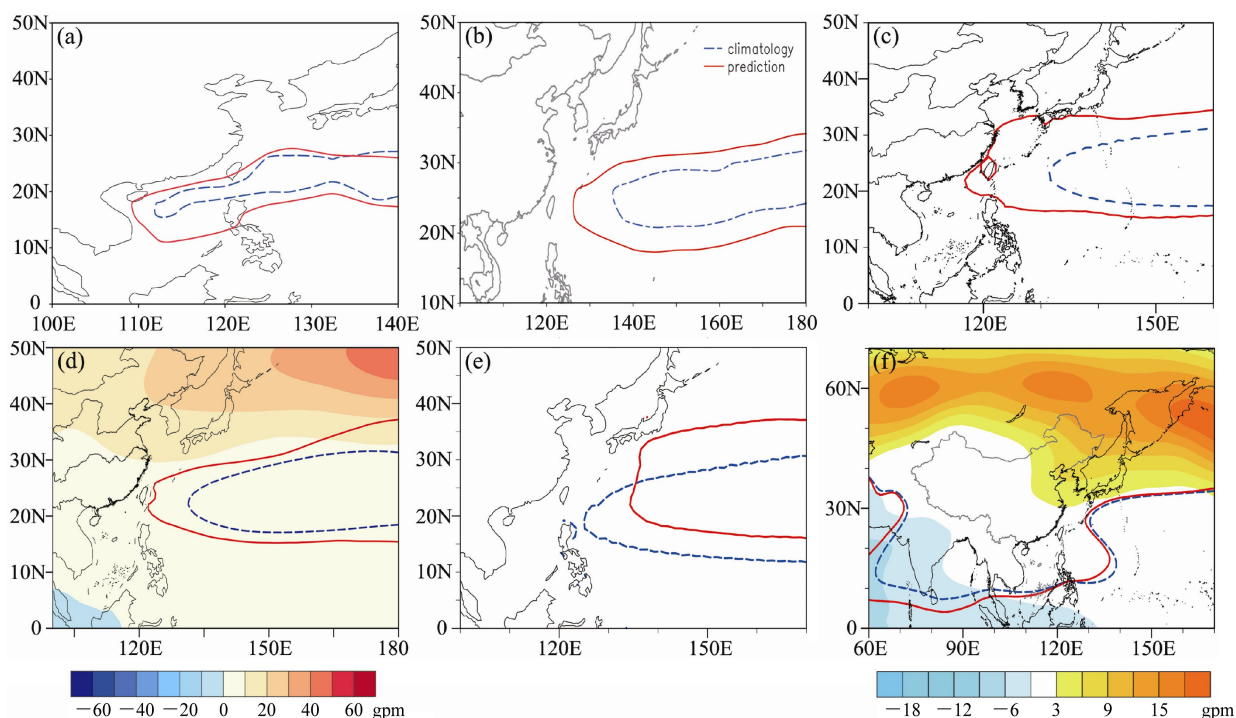


图3 中国科学院大气物理研究所数值模式 (a) IAP AGCM-2L、(b) IAP AGCM-9L、(c) IAP-DCPv3、(d) NZC-PSM、(e) CAS-ESM-C、(f) GloSea5 对 2022 年夏季西太平洋副热带高压的预测。红线表示预测, 蓝线表示模式气候平均; 图 3d 和 3f 中的阴影为 500 hPa 位势高度异常

Fig. 3 Predictions of the western Pacific subtropical high for summer 2022 from IAP numerical models (a) IAP AGCM-2L, (b) IAP AGCM-9L, (c) IAP-DCPv3, (d) NZC-PSM, (e) CAS-ESM-C and (f) GloSea5 models. The red and blue lines represent the projected value and the climatological mean, respectively; shadings in Fig. 3d and Fig. 3f are 500-hPa geopotential height anomalies

强度面积偏大、西伸脊点偏西、脊线正常略偏北。这与英国 GloSea5 对副高的预测基本一致。这样的副高形势有利于中国东部雨带偏北, 华南地区易受台风影响。

再来看数值模式对风场的预测。图 4 给出了大气所各数值模式对 850 hPa 风场异常的预测结果。在大气模式中, IAP AGCM-2L 和 IAP-DCPv3 预测系统的预测结果类似, 均表现为中纬度地区有一反气旋式距平, 中国东部地区盛行偏南风距平, 有利于夏季风偏强。3 个耦合模式 (NZC-PSM、CAS-ESM-C 和 FGOALS-f2 预测系统) 与上述两个大气模式的结果相似。综合模式结果, 预测我国长江以北的东部地区盛行偏南风距平, 夏季风偏强, 有利于水汽向北输送, 北方地区降水偏多。GloSea5 对低层风场的预测与大气所的基本一致。

东亚夏季风是另一个影响我国夏季气候的重要环流系统, 它的强弱与我国的雨带位置密切相关。张庆云等 (2003) 分析了东亚夏季风环流与中国东部夏季降水的年际变化之间的关系, 并定义了表征

东亚夏季风环流强度的特征指数。这个指数主要考虑了夏季长江流域降水偏少和偏多的年份东亚热带季风槽区 ( $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) 和副热带梅雨锋区 ( $25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) 的对流强度呈现反向变化的特征, 可清楚地反映夏季风环流的年际变化与中国东部汛期降水的关系。当该东亚夏季风指数为正时, 东亚夏季风偏强, 易出现南北两条雨带; 反之, 东亚夏季风偏弱, 雨带主要出现在长江流域。根据数值模式对低层风场的预测,

表 2 大气所各数值模式或统计模型对东亚夏季风的预测  
Table 2 Predictions of the East Asian summer monsoon by IAP numerical models or statistical methods

数值模式或统计模型	预测
IAP AGCM-2L	指数为 0.07
IAP AGCM-9L	指数为 -0.5
IAP-DCPv3 预测系统	指数为 -1.67
CAS-ESM-C	指数为 0.32
NZC-PSM	强
大气前兆信号	强

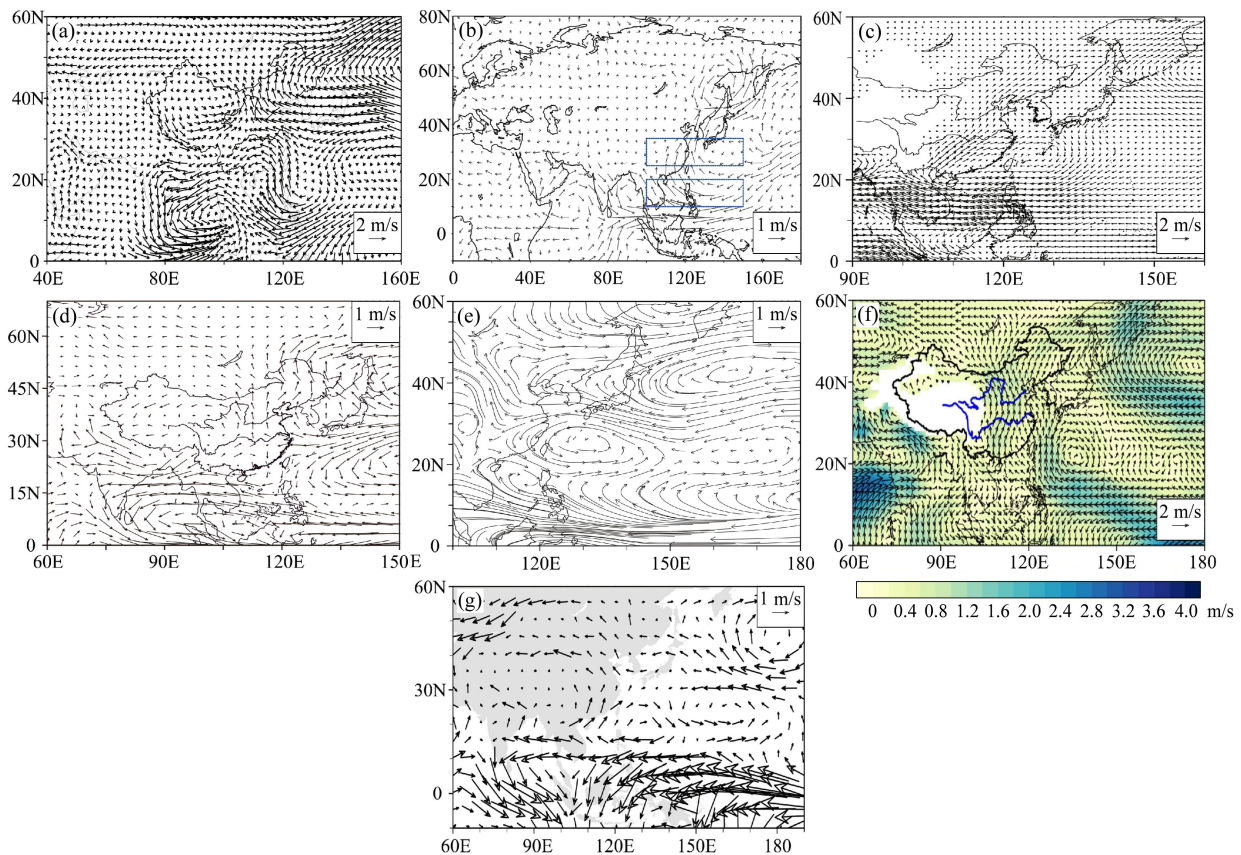


图4 中国科学院大气物理研究所数值模式 (a) IAP AGCM-2L、(b) IAP AGCM-9L、(c) IAP-DCPv3、(d) NZC-PSM、(e) CAS-ESM-C、(f) FGOALS-f2、(g) GloSea5 对 2022 年夏季 850 hPa 风场异常的预测  
Fig. 4 Predictions of 850 hPa horizontal wind anomalies for summer 2022 from IAP numerical models (a) IAP AGCM-2L, (b) IAP AGCM-9L, (c) IAP-DCPv3, (d) NZC-PSM, (e) CAS-ESM-C, (f) FGOALS-f2, and (g) GloSea5

大气所数值模式提供了东亚夏季风指数预测（见表 2）。IAP-AGCM-2L 和 CAS-ESM-C 预测 2022 年夏季东亚夏季风指数为正，夏季风偏强。NZC-PSM 预测东亚夏季风偏强。IAP AGCM-9L 和 IAP-DCPv3 预测系统预测东亚夏季风指数为负，夏季风偏弱。

除了动力模式结果，大气所预测系统也会考虑统计模型的预测。实际上，季风产生的直接原因是冬夏海陆热力对比不同。夏季，大陆偏暖，海洋相对偏冷，亚洲季风区盛行偏南风；冬季，海洋偏暖，大陆相对较冷，亚洲季风区盛行偏北风。当海陆热力对比强，季风就越强。反之，海陆热力对比弱，季风就偏弱。张庆云等（2003）发现东亚夏季风强度与前冬和前春亚洲中纬度地区高层纬向风的变化紧密相关，并将亚洲中纬度区域（32.5°N~37.5°N, 80°E~110°E）和东太平洋区域（22.5°N~27.5°N, 150°W~120°W）的 2 月高层纬向风距平之差定义为东亚夏季风强度变化的前兆指数。研究表明

该前兆指数与后期东亚夏季风指数之间的相关系数达到了 0.50。此前兆指数之所以对随后的东亚夏季风强度有预测意义的原因是当前期冬季亚洲中纬度地区对流层上层出现西风距平时，则意味着南亚上空西风带位置偏北和南支槽的西风扰动偏弱，从而导致南亚冬春季降水偏少和土壤湿度偏低。至晚春和初夏，南亚大陆升温快，有利于夏季海陆热力对比加强，因此亚洲夏季风偏强。由于南亚夏季风和东亚夏季风之间有同相变化的特征，东亚夏季风也偏强。2022 年冬季，东亚夏季风前兆指数为 1.03，预示后期东亚夏季风偏强。综合数值模式和统计模型的结果预测，2022 年东亚夏季风偏强，有利于北方地区降水偏多。

实际上，除了热带和副热带系统，中国夏季降水也受到中高纬度环流异常的影响。如在梅雨期，乌拉尔山和鄂霍次克海出现阻塞高压时，长江流域易出现持续性强降水。而在华北雨季，当鄂霍次克海地区出现高压，中纬度大气环流呈现“西低东高”



的形势时, 华北地区易发生暴雨 (陶诗言, 1980)。大气所大气模式 (IAP-AGCM-2L、IAP-AGCM-9L 和 IAP-DCPv3 预测系统)、耦合模式 (NZC-PSM、CAS-ESM-C 及 FGOALS-f2) 的预测结果均显示, 2022 年夏季, 东北亚至鄂霍次克海地区为 500 hPa 位势高度正距平, 有利于这里出现阻塞高压及华北地区降水偏多 (图 5)。这与 GloSea5 的预测基本一致。

最后来看大气所关于台风的预测。2022 年大气所共有 3 种方法预测台风: 基于 IAP AGCM-9L 模式结果的西北太平洋台风生成数预测模型, 基于前期海温、大气环流异常和美国耦合预测系统 (NCEP coupled forecast system model version 2, CFSv2) 对大气环流预测结果的夏季登陆台风数的动力统计相结合的预测模型以及基于前冬 Niño-3.4 指数的西北太平洋热带气旋生成数和登陆中国的热带气旋数的统计模型。研究显示, 前冬 Niño-3.4 指数和后期夏季西北太平洋热带气旋的生成数、登陆中国大陆的个数都有很好的负相关关系 (Wang et al., 2020)。在 2021/2022 年冬季, Niño3.4 指数为负, 有利于 2022 年夏季西北太平洋热带气旋生成数和登陆中国的热带气旋数均偏多。考虑到 2022 年夏季, 副高西伸脊点可能偏西, 热带气旋

易向西移动, 影响东南沿海地区, 造成那里的降水偏多。

图 6 给出了大气所各数值模式或动力—统计方法对 2022 年夏季中国降水距平百分率的预测。可以看出, 所有的数值模式均预测华北至东北南部地区降水偏多。另外, 根据 ENSO 演变位相建立的降水异常统计预测模型预测多雨中心位于华北地区。GloSea5 也预测我国北方地区降水偏多。这与我们上面根据环流预测结果的分析基本一致。大部分模式 (IAP AGCM-2L、IAP AGCM-9L、CAS-ESM-C 和 FGOALS-f2)、基于 IAP AGCM-9L 的动力—统计预测模型和基于前冬欧亚大陆新增积雪面积的统计模型预测东南沿海地区降水偏多。

综合对环流的分析大气所各数值模式和统计模型的预测, 得到 2022 年夏季全国降水趋势预测意见: 预计 2022 年汛期 (6~8 月), 东北东部和中部、华北大部分地区、黄河中下游、东南沿海、西北地区中部、西藏大部分地区、西南地区东部和云南大部分地区降水正常略偏多, 其中环渤海湾地区降水偏多 2~5 成, 可能发生局地洪涝灾害。全国其他地区降水正常略偏少, 其中长江下游地区 and 新疆北部降水偏少 2~5 成。预计今年登陆台

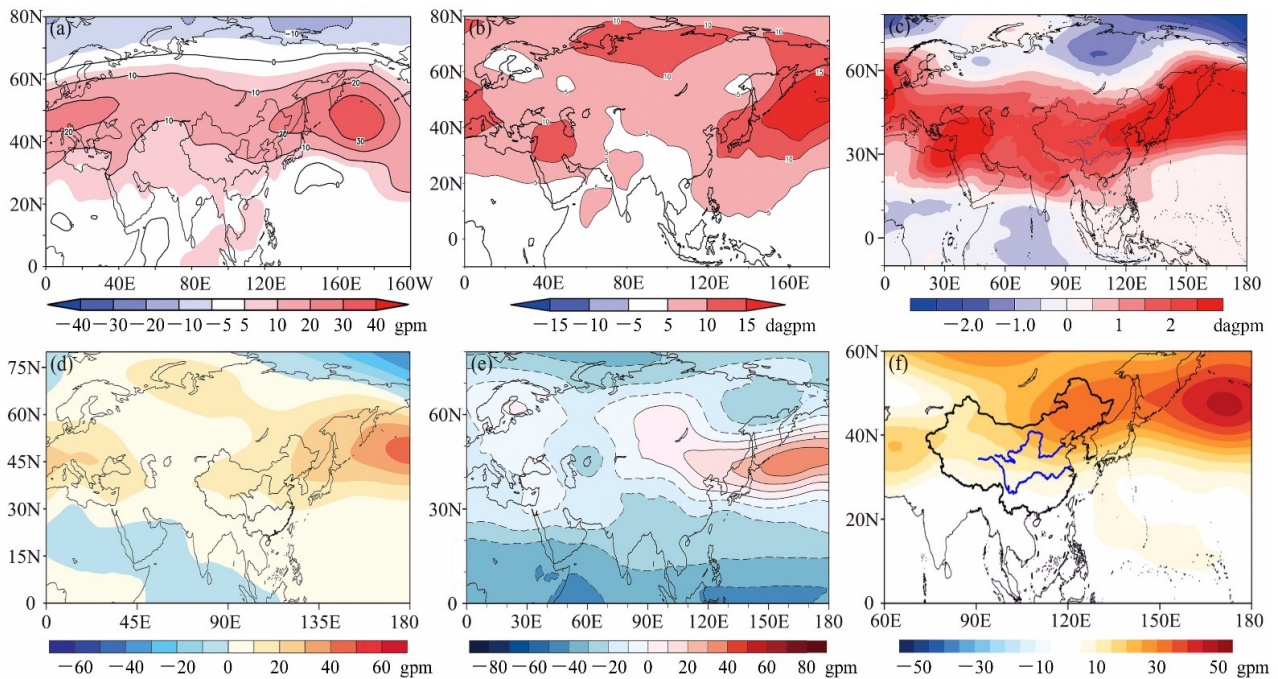


图 5 中国科学院大气物理研究所数值模式 (a) IAP AGCM-2L、(b) IAP AGCM-9L、(c) IAP-DCPv3、(d) NZC-PSM、(e) CAS-ESM-C、(f) FGOALS-f2 对 2022 年夏季 500 hPa 位势高度异常的预测

Fig. 5 Predictions of 500-hPa geopotential height anomalies for summer 2022 from IAP numerical models (a) IAP AGCM-2L, (b) IAP AGCM-9L, (c) IAP-DCPv3, (d) NZC-PSM, (e) CAS-ESM-C, and (f) FGOALS-f2

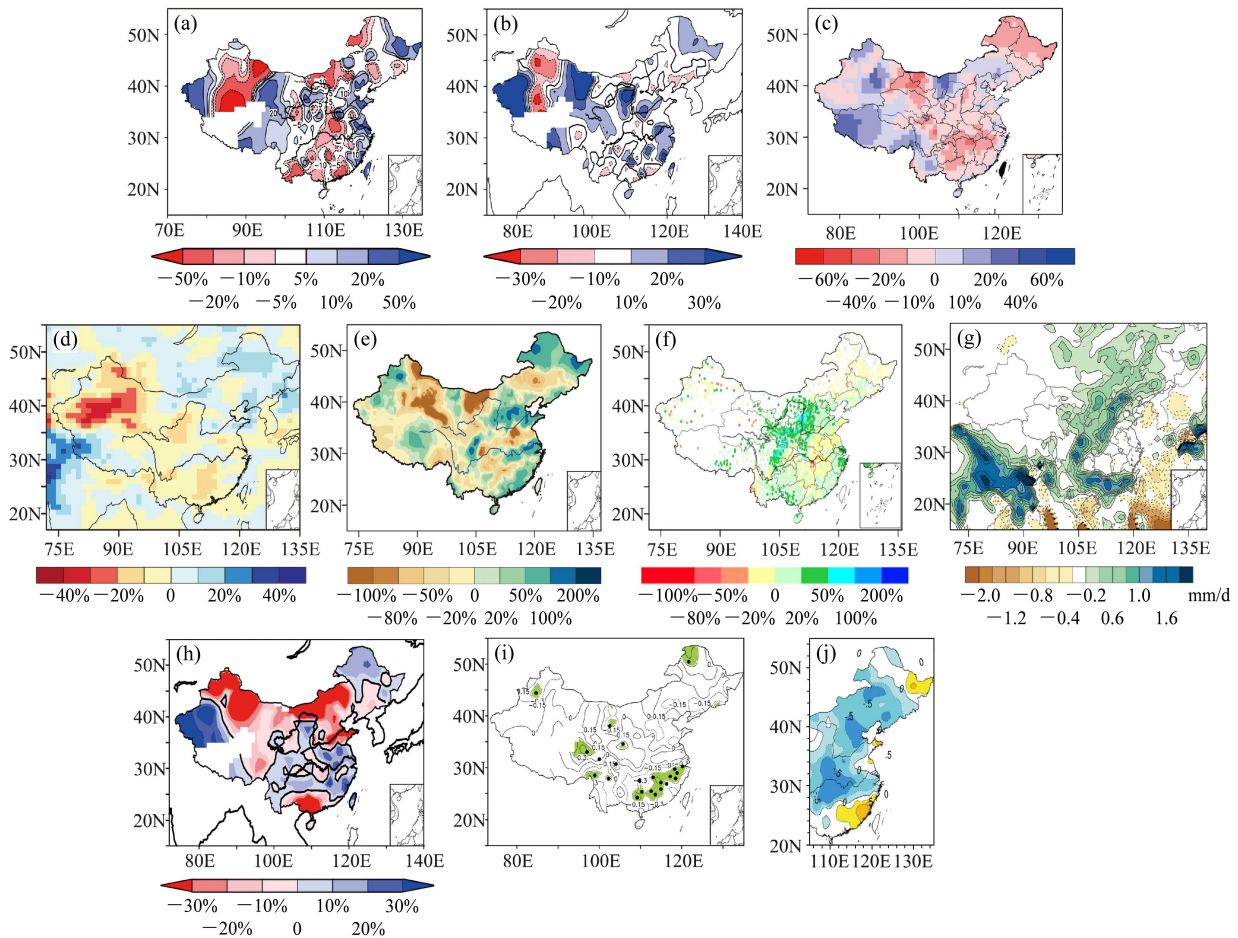


图 6 中国科学院大气物理研究所的数值模式或动力统计方法 (a) IAP AGCM-2L、(b) IAP AGCM-9L、(c) IAP-DCPv3、(d) NDC-PSM、(e) CAS-ESM-C、(f) FGOALS-f2、(g) GloSea5、(h) 9 层动力-统计、(i) 积雪统计模型、(j) ENSO 位相对 2022 年夏季中国降水距平百分率的预测

Fig. 6 Predictions of percentage of precipitation anomalies in China for summer 2022 by IAP numerical models or dynamic statistical methods (a) IAP AGCM-2L, (b) IAP AGCM-9L, (c) IAP-DCPv3, (d) NDC-PSM, (e) CAS-ESM-C, (f) FGOALS-f2, (g) GloSea5, (h) 9 layer dynamic-statistical method, (i) statistical model of snow cover, and (j) ENSO phase change

风数正常略偏多 (图 7)。

## 4 结论和讨论

根据大气所各数值模式和统计模型对未来 ENSO 演变、2022 年夏季大气环流和降水异常的预测, 预测了 2022 年汛期中国降水异常趋势。主要结论如下:

(1) 预计 2022 年汛期 (6~8 月), 东北东部和中部、华北大部分地区、黄河中下游、东南沿海、西北地区中部、西藏大部分地区、西南地区东部和云南大部分地区降水正常略偏多, 其中环渤海湾地区降水偏多 2~5 成, 可能发生局地洪涝灾害。全国其它大部分地区降水正常略偏少, 其中长江下

游地区和新疆北部降水偏少 2~5 成。预计今年登陆台风数正常略偏多。

(2) 预计, 长江中下游地区可能出现高温伏旱, 部分地区可能出现极端高温。华北地区和川渝地区东部出现暴雨的概率较高, 可能出现局地洪涝灾害。东南沿海地区可能受到台风影响。

对比 2022 年的预测 (图 7) 和 2021 年夏季降水距平百分率 (图略) 发现, 今年降水异常预测结果与去年的观测比较相似。这可能有两个原因。一是 2021 和 2022 年春夏季均处于 La Niña 衰减位相, 前冬欧亚大陆新增积雪面积均偏少, 前冬亚洲上空西风急流偏北。外强迫信号和大气前兆信号具有一致性。二是大气所各模式预测 2022 年夏季西太平洋面积偏大、西伸脊点偏西及北界偏北, 我国东部

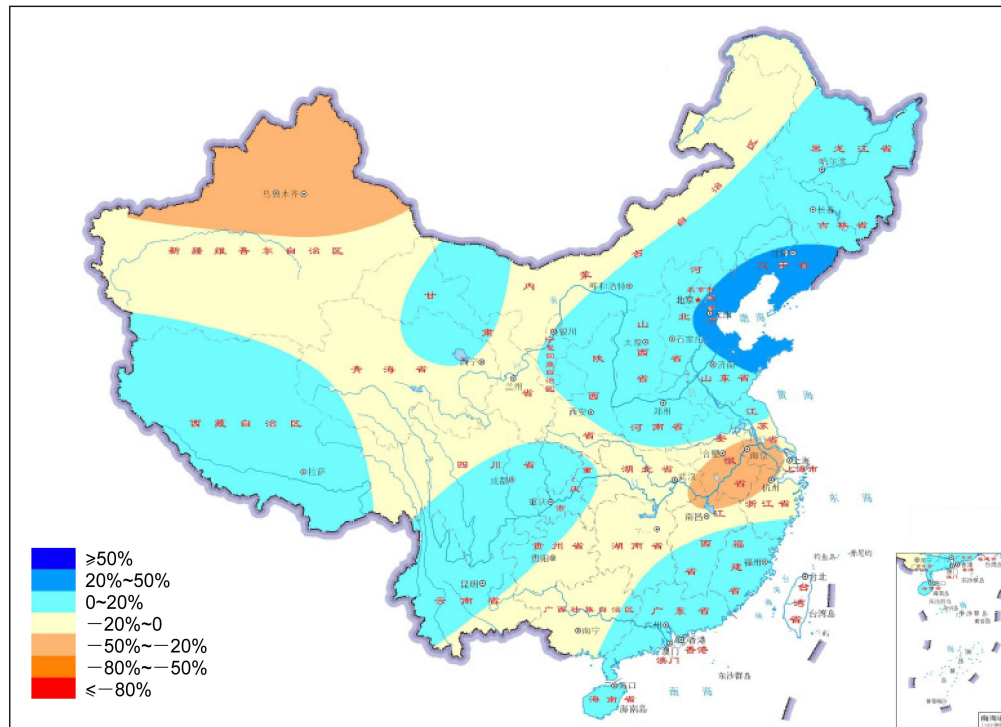


图7 中国科学院大气物理研究所对2022年夏季中国降水距平百分率预测的综合图

Fig. 7 A comprehensive map of the percentage of precipitation anomaly predicted for summer 2022 in China by the IAP, CAS

地区盛行偏南风距平，东亚夏季风偏强、中高纬度地区易出现东阻。这与2021年夏季的环流异常很相似（图略）。

此外，值得注意的是，大气所对 ENSO 未来发展的预测尚存在一定的分歧。大气所 ENSO 预测系统和 FGOALS-f2 预测 2022/2023 年冬季，可能发生一次 El Niño 事件。而 NZC-PSM 则预测直到 2022 年 8 月，Niño3.4 区海温依然为中性偏冷位相。不同的海温演变可能导致未来夏季环流和降水异常分布的不同。这使得对 2022 年夏季的预测具有不确定性。

台风往往带来充沛的降水，是影响中国夏季降水的重要因素。目前尚不能在季节尺度上预测台风路径，及其产生的降水分布。除此以外，台风活动也影响副高的位置，进而对其它地区的降水产生间接影响。通常来说，当热带辐合带活跃、位置偏北，台风多发，副高易处于偏北的位置。如“21·7”河南大暴雨期间，副高异常偏北，南海和西太平洋分别有台风“查帕卡”和“烟花”（冉令坤等，2021）。因此，台风预测是季度预测中的重点，也是难点。大气所基于 IAP AGCM-9L 模式结果的西北太平洋台风生成数预测模型，和基于前期信号和 CFSv2 预测结果的夏季登陆台风数的动力统计

相结合的预测模型预测 2022 年夏季西北太平洋生成台风数和登陆台风数偏少。这与基于前冬 Niño3.4 指数的台风生成数和登陆数的统计预测模型结果不一致。根据大气所大部分数值模式预测夏季副高偏西、偏强，通常对应台风偏多，我们预测 2022 年夏季生成和登陆我国的台风数正常略偏多。对台风活动预测的意见不一致，也为夏季降水趋势预测带来不确定性。

夏季是暴雨多发季节。往往几次暴雨过程就可决定雨带分布。影响降水落区的重要因子包括东亚夏季风、西太平洋副热带高压以及中高纬度冷空气活动的季节内变化，而目前对季节内尺度大气内部动力过程的异常变化特征还没有较好的预测方法。因此我们将根据 2022 年春末、夏初大气环流和海洋等因子的演变趋势，做进一步补充订正预测。

### 参考文献 (References)

- 包庆, 吴小飞, 李矜霄, 等. 2019. 2018~2019 年秋冬季厄尔尼诺和印度洋偶极子的预测 [J]. *科学通报*, 64(1): 73-78. Bao Qing, Wu Xiaofei, Li Jinxiao, et al. 2019. Outlook for El Niño and the Indian Ocean Dipole in autumn-winter 2018-2019 [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 64(1): 73-78. doi:10.1360/N972018-00913
- 布和朝鲁, 诸葛安然, 谢作威, 等. 2022. 2021 年“7·20”河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺度系统 [J]. *大气科学*, 46(3): 725-

744. Bueh C, Zhuge Anran, Xie Zuowei, et al. 2022. Water vapor transportation features and key synoptic-scale systems of the “7·20” rainstorm in Henan Province in 2021 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(3): 725–744. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21226
- Clark R T, Wu P L, Zhang L X, et al. 2021. The anomalous Mei-Yu rainfall of summer 2020 from a circulation clustering perspective: Current and possible future prevalence [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(12): 2010–2022. doi:10.1007/s00376-021-1086-y
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测 [J]. *大气科学*, 37(2): 253–280. Ding Yihui, Sun Ying, Liu Yunyun, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(2): 253–280. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12302
- Fang X H, Zheng F. 2021. Effect of the air–sea coupled system change on the ENSO evolution from boreal spring [J]. *Climate Dyn.*, 57(1): 109–120. doi:10.1007/s00382-021-05697-w
- 孔锋. 2019. 应急管理部成立背景下中国综合气象防灾减灾现状、挑战与发展机遇 [J]. *中国减灾*, 34(3): 34–37. Kong Feng. 2019. The present situation, challenges and developing opportunities of comprehensive prevention and mitigation of meteorological disasters in China under the background of the establishment of the Ministry of Emergency Management [J]. *Disaster Reduction in China (in Chinese)*, 34(3): 34–37. doi:10.3969/j.issn.1002-4549.2019.03.015
- 郎咸梅, 王会军, 姜大膀. 2004. 应用九层全球大气格点模式进行跨季度短期气候预测系统性试验 [J]. *地球物理学报*, 47(1): 19–24. Lang Xianmei, Wang Huijun, Jiang Dabang. 2004. Extraseasonal short-term predictions of summer climate with IAP9L-AGCM [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 47(1): 19–24. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2004.01.004
- Lang X M, Zheng F. 2011. A statistical-dynamical scheme for the extraseasonal prediction of summer rainfall for 160 observation stations across China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(6): 1291–1300. doi:10.1007/s00376-011-0177-6
- Li C F, Lu R Y, Dunstone N, et al. 2021. The seasonal prediction of the exceptional Yangtze River rainfall in summer 2020 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(12): 2055–2066. doi:10.1007/s00376-021-1092-0
- Lin R P, Zhu J, Zheng F. 2019. The application of the SVD method to reduce coupled model biases in seasonal predictions of rainfall [J]. *J. Geophys. Res. : Atmos.*, 124(22): 11837–11849. doi:10.1029/2018JD029927
- 林朝晖, 李旭, 赵彦, 等. 1998. 中国科学院大气物理研究所短期气候预测系统的改进及其对 1998 年全国汛期旱涝形势的预测 [J]. *气候与环境研究*, 3(4): 339–348. Lin Zhaohui, Li Xu, Zhao Yan, et al. 1998. An improved short-term climate prediction system and its application to the extraseasonal prediction of rainfall anomaly in China for 1998 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3(4): 339–348. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.06
- 林朝晖, 孙建华, 卫捷, 等. 2003. 2002 年夏季气候及汛期实时预测与检验 [J]. *气候与环境研究*, 8(3): 241–257. Lin Zhaohui, Sun Jianhua, Wei Jie, et al. 2003. Real-time weather and seasonal climate predictions for 2002 summer and their verifications [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8(3): 241–257. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2003.03.001
- 穆松宁, 周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系 [J]. *大气科学*, 34(1): 213–226. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2010. Relationship between winter northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(1): 213–226. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.20
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析 [J]. *气候与环境研究*, 12(3): 464–474. Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Bueh C. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan–Chongqing region in 2006 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12(3): 464–474. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.03.026
- 彭京备, 刘炯, 孙淑清. 2016. 2013 年我国南方持续性高温天气及副热带高压异常维持的成因分析 [J]. *大气科学*, 40(5): 897–906. Peng Jingbei, Liu Ge, Sun Shuqing. 2016. An analysis on the formation of the heat wave in southern China and its relation to the anomalous western Pacific subtropical high in the summer of 2013 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(5): 897–906. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.14334
- 齐道日娜, 何立富, 王秀明, 等. 2022. “7·20” 河南极端暴雨精细观测及热动力成因 [J]. *应用气象学报*, 33(1): 1–15. Chi D, He Lifu, Wang Xiuming, et al. 2022. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021 [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 33(1): 1–15. doi:10.11898/1001-7313.20220101
- 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等. 2021. 2021 年河南 “7·20” 极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析 [J]. *大气科学*, 45(6): 1366–1383. Ran Lingkun, Li Shuwen, Zhou Yushu, et al. 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the “7·20” extreme rainstorm event in Henan Province, 2021 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(6): 1366–1383. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160
- Tao L J, Duan W S. 2019. Using a nonlinear forcing singular vector approach to reduce model error effects in ENSO forecasting [J]. *Wea. Forecasting*, 34(5): 1321–1342. doi:10.1175/WAF-D-19-0050.1
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyan. 1980. Rainstorm in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- 王会军, 任宏利, 陈活泼, 等. 2020. 中国气候预测研究与业务发展的回顾 [J]. *气象学报*, 78(3): 317–331. Wang Huijun, Ren Hongli, Chen Huopo, et al. 2020. Highlights of climate prediction study and operation in China over the past decades [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 78(3): 317–331. doi:10.11676/qxxb2020.022
- Wang L, Chen J L, Wu L. 2020. Impact of winter SST anomaly in tropical eastern Pacific on following summer tropical cyclone precipitation in China [J]. *Int. J. Climatol.*, 40(2): 739–749. doi:10.1002/joc.6234
- 卫捷, 杨辉, 孙淑清. 2004. 西太平洋副热带高压东西位置异常与华北夏季酷暑 [J]. *气象学报*, 62(3): 308–316. Wei Jie, Yang Hui,

- Sun Shuqing. 2004. Relationship between the anomaly longitudinal position of subtropical high in the western Pacific and severe hot weather in North China in summer [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 62(3): 308–316. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.03.005
- Xue F, Fan F X. 2016. Anomalous western Pacific subtropical high during late summer in weak La Niña years: Contrast between 1981 and 2013 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(12): 1351–1360. doi:10.1007/s00376-016-5281-1
- 曾庆存, 林朝晖, 周广庆. 2003. 跨季度动力气候预测系统 IAP DCP-II [J]. *大气科学*, 27(3): 289–303. Zeng Qingcun, Lin Zhaohui, Zhou Guangqing. 2003. Dynamical extraseasonal climate prediction system IAP DCP-II [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27(3): 289–303. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.01
- 张凤, 陈红, 林朝晖, 等. 2004. IAP AGCM-I 水平分辨率的提高及对全球和东亚区域气候的数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 9(2): 396–408. Zhang Feng, Chen Hong, Lin Zhaohui, et al. 2004. Improvement of horizontal resolutions of IAP AGCM-I and its influence on the simulations of global and East Asian climate [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9(2): 396–408. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2004.02.16
- 张贺, 林朝晖, 曾庆存. 2011. 大气环流模式中动力框架与物理过程的相互响应 [J]. *气候与环境研究*, 16(1): 15–30. Zhang He, Lin Zhaohui, Zeng Qingcun. 2011. The mutual response between dynamical core and physical parameterizations in atmospheric general circulation models [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16(1): 15–30. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.01.02
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 61(4): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 61(4): 559–568. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.05.005
- Zheng F, Zhu J. 2010. Coupled assimilation for an intermediated coupled ENSO prediction model [J]. *Ocean Dyn.*, 60(5): 1061–1073. doi:10.1007/s10236-010-0307-1
- Zheng F, Zhu J. 2016. Improved ensemble-mean forecasting of ENSO events by a zero-mean stochastic error model of an intermediate coupled model [J]. *Climate Dyn.*, 47(12): 3901–3915. doi:10.1007/s00382-016-3048-0
- Zheng F, Liu J P, Fang X H, et al. 2022. The predictability of ocean environments that contributed to the 2020/21 extreme cold events in China: 2020/21 La Niña and 2020 Arctic sea ice loss [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 39(4): 658–672. doi:10.1007/s00376-021-1130-y
- Zhou Z Q, Xie S P, Zhang R H. 2021. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 118(12): e2022255118. doi:10.1073/pnas.2022255118
- 宗海锋. 2017. 两个典型 ENSO 季节演变模态及其与我国东部降水的联系 [J]. *大气科学*, 41(6): 1264–1283. Zong Haifeng. 2017. Two typical ENSO seasonal evolution modes and their relations with rainfall over eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(6): 1264–1283. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16279