

# CMIP5 模式对登陆中国热带气旋活动的模拟和预估

栗晗, 凌铁军, 祖子清, 王剑

(国家海洋环境预报中心 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 基于中国气象局热带气旋最佳路径数据集, 结合7个全球耦合模式在4个气候情景(Historical、RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)下的模拟场, 对比分析了模式模拟1986—2005年登陆我国热带气旋(LTC)活动的气候特征, 并评估了未来(2026—2045年)不同气候情景下LTC活动的频数和强度变化特征。结果表明: 在Historical情景下虽然各模式模拟的1986—2005年LTC均少于观测值, 但仍然较好的再现LTC的季节分布、地理位置分布和强度分布特征。未来气候情景下不同强度LTC的频数预估则显示, 相对于Historical情景, RCP2.6和RCP8.5情景下较弱的LTC有减少的趋势, 而较强的LTC则表现为略微的增加。另外, 对比不同模式的结果可以发现, 模式中若中国大陆近海区域平均垂直风切变和海平面气压较大, 则其对应的LTC活动较少; 若模式中海表温度较高, 则LTC的平均登陆强度较大。

**关键词:** CMIP5 模式; 热带气旋; 登陆; 气候变化; 预估

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2016)06-0010-12

## 1 引言

西北太平洋热带气旋(Tropical Cyclone, TC)发生频繁, 并且受到西太平洋副热带高压的影响, 使部分TC移向中国海岸带附近登陆, 给我国造成巨大的经济损失和人员伤亡。虽然TC会给人类生活带来负面影响(如风灾、风暴潮灾害等), 但同时也在维持区域水资源方面起到了重要的作用, 因此开展登陆中国热带气旋(Landfalling Tropical Cyclone, LTC)的研究, 对于理解区域气候的变化和服务于我国的防灾减灾工作, 都有重要的意义。

TC的登陆受到多种背景场因素的影响。如丁一汇等<sup>[1]</sup>、王磊等<sup>[2]</sup>指出西北太平洋TC活动受到副热带高压所产生的引导气流的影响。同时, 由于全球变暖趋势的影响, 海温的增高明显, 作为TC活动的主要能量来源, 海表温度对TC活动的影响也受到了学者的关注。Wang等<sup>[3]</sup>对ENSO事件发生前后的西北太平洋TC活动特征进行了研究, 结果表

明: ENSO事件对TC的生成总个数并没有明显的影响, 但是在ENSO强暖年的夏秋季TC的移动路径有向北偏转的趋势。同时, 黄荣辉等<sup>[4]</sup>针对我国登陆台风的登陆地点及其与夏季东亚/太平洋型(即EAP型)遥相关的关系也展开了相关研究, 指出EAP指数为高(低)指数时, 7—9月份在我国厦门以北(南)登陆台风和TC数量偏多(少)。此外, 针对登陆我国历史TC活动本身的特征也展开了相关的研究, 对于我国历史观测LTC资料仅为地名的状况, 任福民等<sup>[5]</sup>制定了我国LTC资料的信息化方案, 并分析了我国1951—2004年历史LTC的基本气候特征, 指出对于中国大陆、海南和台湾三地, 虽然LTC总频数有下降的趋势, 但其中较强的LTC活动(登陆风暴及以上强度)频数均无明显增多或减少趋势。

随着数值模式的发展, 从全球气候模式(Global Climate Model, GCM)模拟场中直接诊断TC活动, 成为研究未来TC活动变化的一个重要手段。Camargo<sup>[6]</sup>从耦合模式比较计划第五阶段

收稿日期: 2015-11-19

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAC19B08); 国家自然科学基金(41376016); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201205182)。

作者简介: 栗晗(1992-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事气候变化研究。E-mail: hanli\_1005@163.com

(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)多模式模拟场中直接诊断TC活动,并分析了不同气候情景下(Historical、RCP4.5和RCP8.5)TC频次的差异性,指出GCM的较低分辨率造成了TC活动的发生频次低估。Tory等<sup>[7]</sup>基于CMIP5多模式集应用OWZP诊断方法对21世纪末高排放情景下(RCP8.5)全球TC发生频次进行评估,多模式集中模拟效果较好的8个模式一致表明全球TC发生频数有下降的趋势(7%—28%)。Sun等<sup>[8]</sup>基于GCM模拟大尺度环流场与LTC活动的经验关系建立了一个对登陆我国TC活动预测的统计-动力模式,对观测数据的回报检验结果表明,该模式能够较好的预测LTCs的年际变率。

以上研究多集中于从GCM中直接诊断海外TC的活动特征,或利用GCM输出的大尺度环流场与LTC的统计关系进行研究。本文则尝试从GCM中直接识别和诊断LTC,并与观测资料进行对比,同时预估不同排放情景下未来LTC的变化趋势。

## 2 资料和方法

### 2.1 数据资料

本文所用数据资料主要包括两部分:(1)中国气象局热带气旋最佳路径数据集,该数据集提供了1949年以来西北太平洋(含南海、赤道以北、东经180°以西)海域热带气旋每6 h的位置和强度,并提供有历史登陆我国TC活动的编号,本文依据该编号,从中国气象局热带气旋最佳路径数据集中提取了历史登陆我国的TC活动信息。(2)CMIP5全球气候模式模拟数据(包括200 hPa、850 hPa、10 m风场、

海平面气压场),时间分辨率为1d。该模式集包括现阶段气候情景模拟(1986—2005年)和未来典型浓度路径情景模拟(RCPs、2006—2045年)。其中,RCPs包含4种排放情景由高到低分别为RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5和RCP2.6<sup>[9]</sup>。RCP4.5作为未来最有可能发生的排放情景,RCP2.6和RCP8.5则分别代表了未来气候的相对极端变化,因此,本文选择这3个排放情景下的模式数据作为未来气候变化的研究对象。

CMIP5的各模式来自于全球不同国家的研究机构,同时,也给出了各模式的格点(纬度×经度)和分辨率信息(见表1)。模式的选取基于目前可获得的CMIP5模式数据资料的完整性(包括不同情景下各变量),后续研究将会针对更多的CMIP5模式数据进行。

### 2.2 TC诊断及登陆判断方法

许多学者已经开展了关于从全球气候模式输出场中诊断类TC活动的研究<sup>[10-12]</sup>。尽管不同研究所使用的TC诊断方法不完全相同,但都集中在TC活动生成所需要的较大尺度的热动力场环境,如风场、气压场、温度场等,因为对于全球气候模式而言,各种研究表明其仅对较大尺度的环流特征的模拟准确性较好。本文选取已经普遍使用的TC活动诊断方法及相关物理参数阈值对中国近海区域的可能登陆TC活动进行诊断:首先根据TC活动的结构特征(如:海平面低压中心、850 hPa低压旋转风场结构等)确定类TC活动的位置,其次根据一定的物理参数阈值(如:垂直风切变、近中心最大风速以及类TC结构持续存在时间等)对TC活动进行区分,具体方案参见文献[10,13-14]。

表1 本文研究所用CMIP5各模式信息

模式名	所属单位及国家	模式分辨率
BCC-CSM1.1	国家气候中心(Beijing Climate Center),中国	64×128
BCC-CSM1.1-M	国家气候中心(Beijing Climate Center),中国	160×320
CCSM4	美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research),美国	192×288
CNRM-CM5	法国国家气象研究中心(Centre National de Recherches Météorologiques),法国	128×256
GFDL-ESM2M	美国国家海洋大气管理局/地球物理流体动力学实验室(National Oceanic and Atmospheric Administration/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory),美国	90×144
HadGEM2-ES	英国气象局(UK Meteorological Office),英国	145×192
MRI-CGCM3	日本气象厅气象研究所(Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute),日本	160×320

本文所使用的诊断方法中需要设置与网格大小有关的各项参数,如判断风场气旋结构的网格大小的选择、判断是否登陆陆地的距离阈值对应的格点数等。而如果模式使用不同分辨率,则各模式诊断结果中会存在与诊断阈值选择有关的差异,影响结果的准确性。同时,如果每个模式网格单独设置诊断参数,也不利于数据处理的自动化。因此,为了方便数据处理以及消除诊断方法中各参数阈值(TC风场结构大小、与陆地点距离等)对于模式时空分辨率的依赖性,本文将所有模式数据插值到 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 的网格。

随后基于上述诊断结果筛选出影响我国的TC活动信息。需要特别说明的是,由于本文所收集的全球气候模式数据均为日资料,以TC活动的平均移动速度 $25 \text{ km/h}$ 计算,一日之内TC移动距离可达 $600 \text{ km}$ ,对于接近陆地的TC活动信息来说并不能准确判断其在两个时次之间是否登陆(见图1,需要注意的是本文仅对一定区域内的TC活动进行诊断,TC路径端点并非实际TC活动生成和消亡位置)。同时,全球气候模式的较低分辨率对于海陆分界区域的识别能力较差,近海区域均为水陆混合下垫面(见图1浅灰色阴影区),利用模式地形来判断诊断TC结果是否登陆存在较大误差。因此本文对于TC活动的登陆判断方法如下:基于高分辨率( $0.2^{\circ}$ )的中国海岸带海陆分布地形数据文件,如诊断TC活动的某个时次路径点进入距离中国海岸线

两倍模式分辨率( $3^{\circ}$ 约 $300 \text{ km}$ )范围之内,即判断为LTC,其登陆位置记录为进入陆地之前距离我国海岸线最近的一个TC路径信息点。

同时,为了将模式的历史气候情景模拟与观测对比,本文按照上述同样的登陆判断方法对CMA登陆热带气旋日信息数据进行处理,得到观测LTC活动的登陆时刻信息。需要注意的是,本文对观测LTC登陆点的判断是基于中国气象局已经给定的历史登陆热带气旋编号,并从其路径信息中选取登陆中国大陆之前距离陆地最近的一点,而并非对所有热带气旋信息进行重新登陆判定。

### 2.3 LTC活动登陆强度分级

由于不同CMIP5模式对于近地面 $10 \text{ m}$ 风场的模拟效果不同,实验结果也表明,诊断TC活动的中心最大风速也远小于实际观测TC风速,并且各个模式模拟能力也不相同。Horn等<sup>[15]</sup>也指出,在模式输出结果中采用实际观测资料中所用的相应量值标准(如风速超过 $33 \text{ m/s}$ 为台风的判别标准)不利于改进模式之间存在的偏差。因此为了能够研究对比不同排放情景下模拟的LTC活动的强度变化,本文统一了各模式模拟LTC登陆时刻强度的分级规则,即将各模式模拟LTC的登陆时刻强度(最大近中心风速)进行标准化,方案如下:

对于每一个模式,将其模拟诊断出的历史和未来情景下LTC活动登陆时刻的风速(1986—2045年)作为该模式诊断LTC风速分级种子库,首先分别去除其极大极小风速,然后依据其剩余部分最强最弱LTC登陆时刻近中心最大风速,将其五等分得到6个风速值,作为该模式结果由弱到强5个LTC登陆时刻强度等级的划分。该方法的优势在于,弥补了模式模拟LTC近中心最大风速过小的缺陷。其次,保持了模式内部不同情景下比较LTC登陆时刻强度的一致性。同时也能够有效的区分LTC登陆时刻的强度差异。

需要指出的是,为了对比模式历史气候模拟TC特征与观测的差异需要对CMA观测热带气旋强度采用与模式同样的分级方法进行处理,而观测资料中由于风速数据记录精确性的问题,经常出现多个TC活动登陆时刻的最大风速相同(如多个TC登陆风速同为 $25 \text{ m/s}$ ),不便于直接进行分级。考虑本文

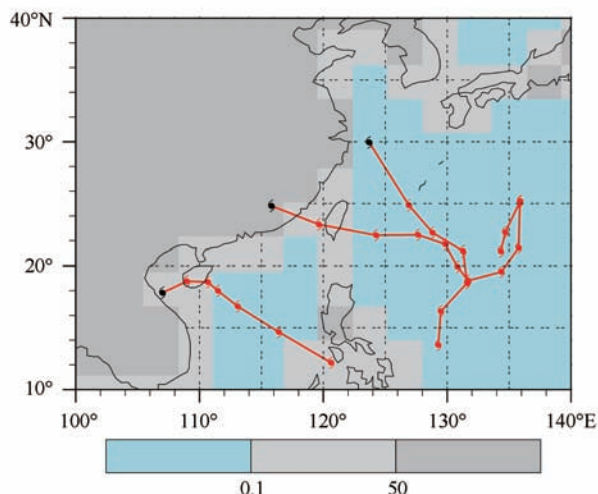


图1 BCC-CSM1.1模式模拟2002年诊断的3个TC路径(阴影为模式地形陆地面积指数分布)



所使用的模式数据为日数据,而观测资料为相对较高的6 h数据,因此本文在观测资料原始6 h数据的基础上对每一个12 h时次的TC活动强度进行近似,即利用12 h前后共3个时次的平均值更新12 h时刻的TC最大风速,然后再对1986—2005年所有观测LTC活动进行分级。

### 3 历史气候态LTC活动模拟

基于上述模式(观测)数据和TC诊断方法,本节针对LTC活动的季节、登陆区域和强度分布特征对比分析了1986—2005年模式历史气候态模拟结果与观测结果之间的差异。表2给出了历史气候态下各模式模拟的LTCs年平均个数。与同期历史观测LTC数量相比,各模式诊断出的LTC活动年平均数量均小于历史观测值(Observation, OBS)。这部分误差可能来源于全球气候模式本身和LTC诊断方法(各项参数阈值选取的不确定性)。此外,针对不同分辨率的模式之间对比,其中原始分辨率较低的3个模式:BCC-CSM1.1、GFDL和HADGEM2中除GFDL模拟LTC个数明显偏低以外,其余两个模

式的模拟LTC数量均高于各模式的平均。而原始分辨率最高的两个模式BCC-CSM1.1-M和MRI-CGCM3,分别模拟了较高和较低数量的LTC活动。这些结果在一定程度上说明,对比模式模拟和诊断LTC过程中其他的影响因素(模式本身模拟能力、诊断参数阈值的选取等),诊断方法中存在的仅与分辨率相关的误差相对较小。

诸多研究表明,从全球气候模式中直接诊断所得到的LTC活动发生频数远小于实际观测LTC数量<sup>[6,16]</sup>。然而Camargo<sup>[6]</sup>、Horn等<sup>[15]</sup>也指出,在大多数全球气候模式中诊断得到的LTC活动信息依然能够较好的再现当前气候态下的TC活动特征。如图2a所示,对于模式结果的季节分布而言,与历史观测LTC活动季节分布相比,各个模式结果也出现了不同程度的偏移,如BCC-CSM1.1和CNRM-CM5的LTC活跃期时间跨度增大,而GFDL最多的月份为7月份。然而多数模式的LTC发生频率均较好的再现了历史观测LTC的季节分布特征,即LTC主要发生在7—9月份。

全球模式诊断TC活动的近中心最大风速远小于实际观测值(见表3),对各模式诊断LTC的近中

表2 Historical模拟(年平均)

模式	BCC	BCC-M	CCSM4	CNRM	GFDL	HADGEM	MRI	MME	OBS
TC个数	6.8	6.8	6.0	4.6	2.3	7.1	4.2	5.4	8.5

表3 Historical模拟热带气旋强度(单位:m/s)

模式	BCC	BCC-M	CCSM4	CNRM	GFDL	HADGEM	MRI	MME
最小值	5.7	5.8	7.7	6.2	6.0	6.8	6.3	6.4
平均值	12.5	12.8	15.7	11.9	9.7	12.2	13.0	12.6
最大值	20.4	21.4	38.3	18.0	14.0	19.2	26.0	22.5

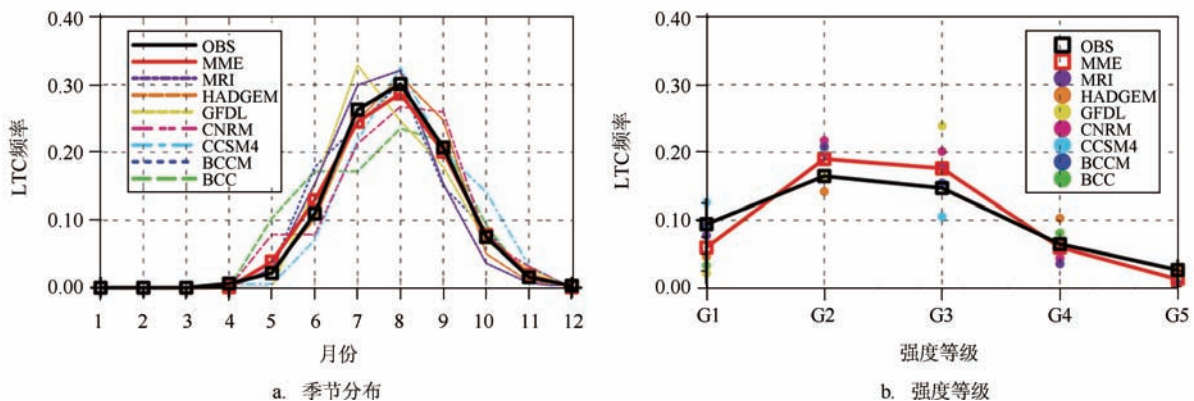


图2 1986—2005年模式模拟(Historical Run)与观测TC活动对比

心风速最大值、平均值和最小值来看,模式本身的模拟能力差异(包括模式性能、物理参数化方案等)对 LTC 近中心风速的影响可能大于模式分辨率所带来的影响。

按照本文所使用的 LTC 强度分级方法对模式历史模拟的 LTC 活动进行分级后,其强度分布特征如图 2b 所示,其中 OBS 为历史观测 LTC 强度分布,按照与模式 LTC 相同的分级方法进行。从中可以看出,各模式能够较好的模拟出不同强度 LTC 活动的频次分布。但是针对强度较弱(G1、G2、G3)的 LTC 活动频率分布来看,各模式与 OBS 的误差相对较大,且对于 G1、G3 等级来说,其模式间结果的差异性也较大。这可能是因为对于较弱的 LTC 活动,全球气候模式对其识别能力较差,而且较弱 LTC 活动一般伴随较弱的低压气旋风场,其对于诊断方法的精度要求也较高,诊断的结果误差也相对较大。同时,Tory 等<sup>[16]</sup>也在研究中指出,模式诊断 TC 活动的准确度随目标 TC 活动(即历史观测 TC)强度的增加而增加。因此,可以认为,对于较强的 LTC 活动来说,其诊断结果应该具有相对较高的可信度。

对于 LTC 活动的登陆地理位置而言,尽管在诊断过程中已经尽可能选择距离陆地最近的 TC 活动位置作为登陆位置,但如图 3 所示,仍有部分 LTC 登陆位置距离中国大陆有一定距离(包括观测)。从图 3 h 中可以看出,历史观测 LTC 活动登陆区域多集中在北至广东、福建,南至海南的带状区域内,并在台湾东部、福建至广州沿海和海南岛沿海区域存在极值,这与任福民等<sup>[5]</sup>所得到的关于中国大陆受 LTC 影响严重的区域的结论相一致。对模式结果分析表明,GFDL(见图 3 e)诊断 TC 活动数量较少,其分布区域范围也相对较小,但仍在海南岛沿海存在集中登陆区域。其他几个模式的 LTC 登陆位置分布则均较符合历史观测 LTC 位置的分布特征,多集中在海南岛至台湾岛之间的区域。

## 4 未来气候情景下 LTC 活动预估

将同样的 LTC 诊断和登陆判断方法应用到 2026—2045 年未来气候情景下(RCPs)各模式输出场中,所得到的各模式模拟的 LTCs 年平均频次如表 4 所示。从中可以看出,LTCs 年频次的分布大致与历史模拟一致,即在当前气候态下 LTCs 数量较少的模式在 RCPs 情景下也较少。比较 3 个 RCP 情景与 Historical 情景结果并没有出现明显的分布特征,如 BCC-CSM1.1-M 在 RCP8.5 情景下 LTC 个数最多,而 GFDL 和 MRI-CGCM3 则在 RCP4.5 情景下最多。但根据模式平均结果来看,增暖情景中的 RCP2.6 和 RCP8.5 的 LTCs 个数均低于 Historical 模拟结果,但变化幅度仅为 0.2 个/a、0.3 个/a,因此增暖情景下 LTCs 个数没有出现明显的变化。

图 4 给出了各模式模拟 1986—2005 年 LTCs 年个数分布情况。从中可以看出,除 CCSM4 和 CNRM-CM5 模式表现出了 Historical 模拟 LTC 频数大于 RCP 情景下模拟以外,其他各模式均未表现出明显的未来 LTC 频数上升或下降的趋势。但是对比两个 RCP 情景下年平均 LTC 个数的差异可以看出,BCC-CSM1.1、CNRM-CM5、GFDL、HADGEM2、MRI-CGCM3 均表现出 RCP8.5 高排放情景下 LTC 频数下降的趋势。而从各模式的平均 MME 也可以看出 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下 LTC 频数的有所降低,其中 RCP8.5 情景下降低幅度更明显,而 RCP4.5 情景下 LTC 频数则有所增加。

对于不同强度的全球 TC 活动的频数变化趋势,许多学者已经开展了研究,并得到较为统一的结论:从全球 TC 活动来看,未来气候情景下,较强 TC 活动的频数有增加的趋势<sup>[17-21]</sup>。以上结论为基于对 TC 活动整个生命周期的最大强度的分析,而 TC 登陆前在近海区域可能出现突然加强或者突然减弱消亡的情况<sup>[22]</sup>,本文的研究也只着眼于 LTC 活动

表 4 RCP 情景模拟(年平均)

模式	BCC	BCC-M	CCSM4	CNRM	GFDL	HADGEM	MRI	MME
Historical	6.8	6.8	6.0	4.6	2.3	7.1	4.2	5.4
RCP2.6	6.5	6.5	6.2	4.2	2.3	7.0	4.0	5.2
RCP4.5	6.9	6.4	5.3	4.3	3.4	6.9	6.0	5.6
RCP8.5	6.8	7.1	5.3	3.4	2.3	6.4	4.5	5.1

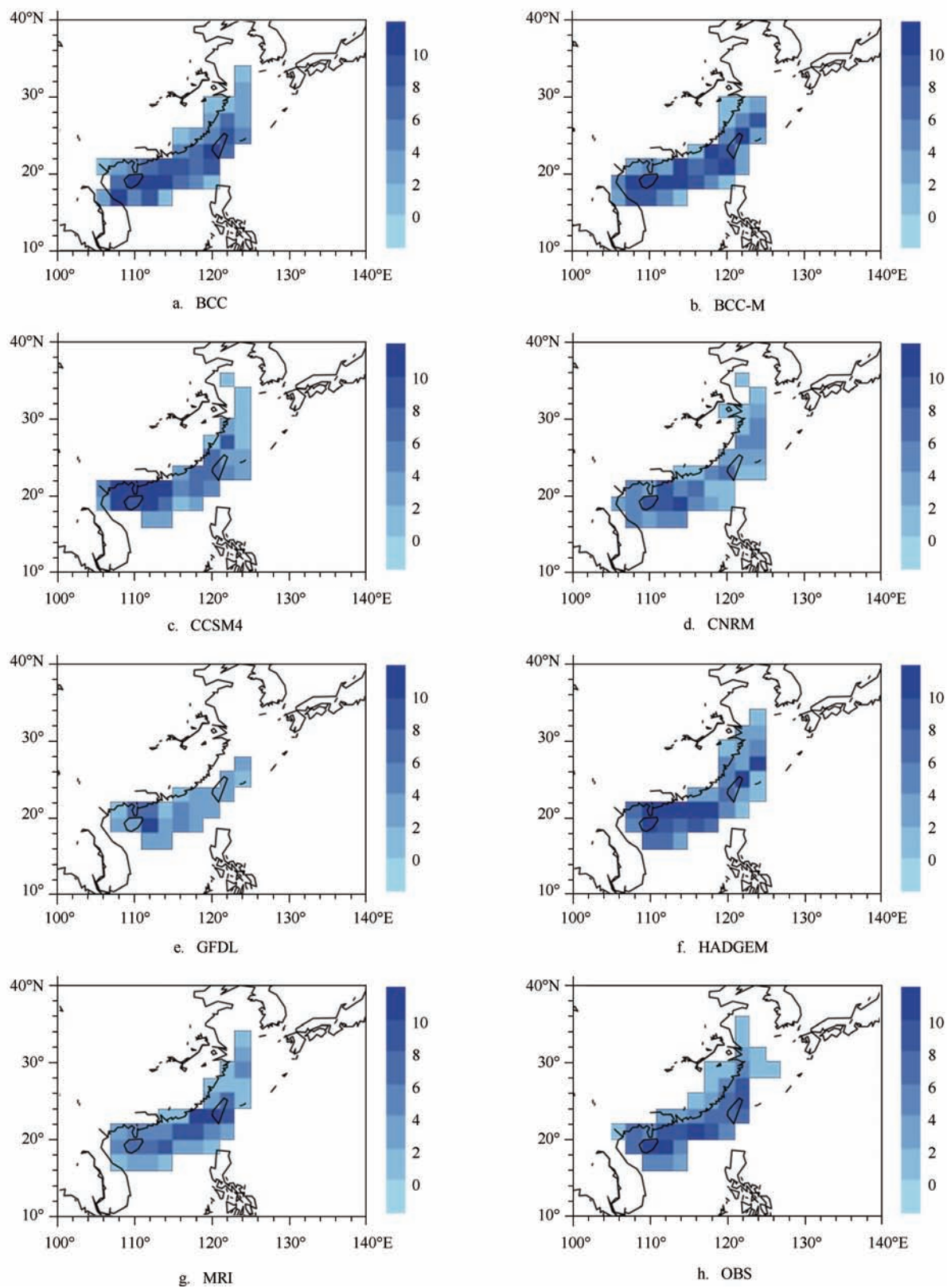


图3 1986—2005年当前气候情景下模式模拟与观测LTC登陆位置密度(个/20 a)分布对比



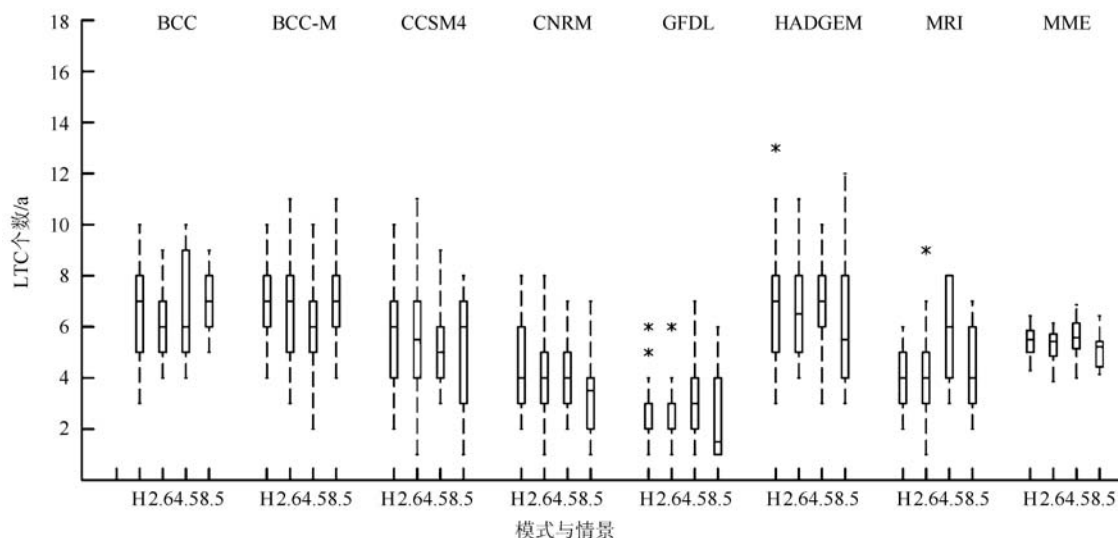


图4 各模式模拟不同情景下LTC年个数(\*为异常值,H—Historical模拟,2.6—RCP2.6模拟,4.5—RCP4.5模拟,8.5—RCP8.5模拟)

登陆时刻的强度特征。图5给出了各模式不同情景下RCPs情景相对于Historical模拟的诊断LTCs的不同强度等级LTC对应的个数分布。图5h为各模式的平均结果,从模式集合平均结果来看,RCP4.5情景模拟并没有体现出与Historical模拟较大的差异性,其在各个等级的LTC活动频数变化均较小。而对于RCP2.6和RCP8.5情景,较弱等级的LTC(G2、G3)发生频次有减少的趋势。而对于较强等级(G4、G5)的LTC活动,3个情景均仅在G4的频次上有增加的趋势,而G5频次几乎没有变化。虽然从模式平均的总体上来看,LTC活动也出现了较强级别增加而较弱级别减少的现象,但该变化较小,仅为3—4个/10 a。

从各模式间的结果一致性来看,RCP2.6情景下有BCC-CSM1.1、BCC-CSM1.1-M、CNRM-CM5、GFDL和MRI-CGMC3共5个模式表现出较明显的G2、G3等级LTC减少,G4、G5等级LTC增多或不变。RCP8.5情景下则为BCC-CSM1.1、CCSM4、CNRM-CM5、GFDL、HADGEM2与模式平均结果表现出较为一致的特征。而RCP4.5情景下除BCC-CSM1.1-M以外,其他各模式的LTC强度分布均无规则,特别是GFDL与MRI-CGCM3模式结果各等级LTC活动均表现增加,这也与该模式之前年平均LTC个数出现异常偏高一致。因此,相对来

说,RCP2.6和RCP8.5情景各模式结果LTC强度分布趋势较为一致,而RCP4.5情景则无明显规律。

## 5 影响模式模拟LTC活动特征差异的近海环境场分析

TC活动的生成及移动路径受到海洋的热力状态及其上空的大气环流的严重影响<sup>[23-24]</sup>。本节针对影响TC活动的重要环境场因子展开讨论,以期寻找各情景之间特别是各模式之间对于TC活动的数量和强度模拟的差异性的来源。为了对比各模式各情景下模拟环境场与其对应情景下模拟LTC频数的关系,图6给出了不同情景下LTC年频数与其对应主要发生区域(15°—35°N, 105°—125°E,仅海洋格点)7—9月各环境因子的平均异常场,并给出了各模式各情景下20 a数据对应异常场的线性趋势。

相对于海表面温度(Sea Surface Temperature, SST),各情景下模式模拟中国大陆近海垂直风切变(Wind Shear, WS)和海平面气压(Sea Level Pressure, SLP)与LTC发生频次的相关性更强(见图6)。图6a—d显示,各模式TC频数和WS大小的线性回归趋势均通过了99%信度水平的t检验, Historical、RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景分别表现为-0.47、-0.46、-0.4和-0.46个LTC m/(s·a),其中除

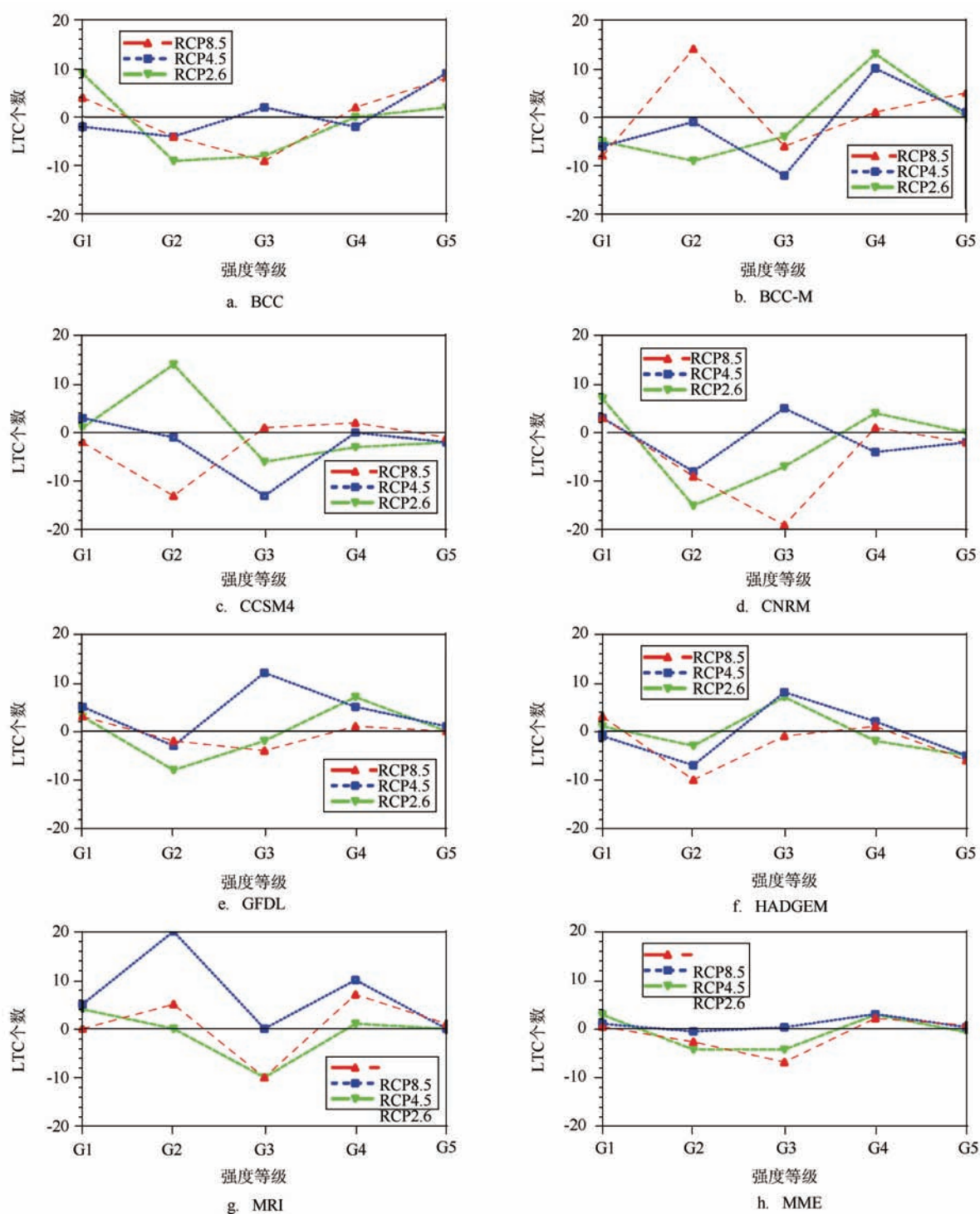


图5 各模式RCPs情景下不同强度LTC频数相对于1986—2005年Historical模拟的变化

RCP4.5情景趋势较小外,其他的3个情景趋势比较接近。比较各模式多年平均结果来看,模拟区域平均WS相对较大的模式相应的也模拟出了相对较少的LTC活动。理论上来说,WS的大小决定了TC初

始扰动的对流凝结所释放的潜热能是否能够集中在一个有限的空间范围内,WS越小则垂直方向通风条件较差,有利于TC活动上空的能量集中并促使初始扰动的气压下降从而加强TC活动的形成,



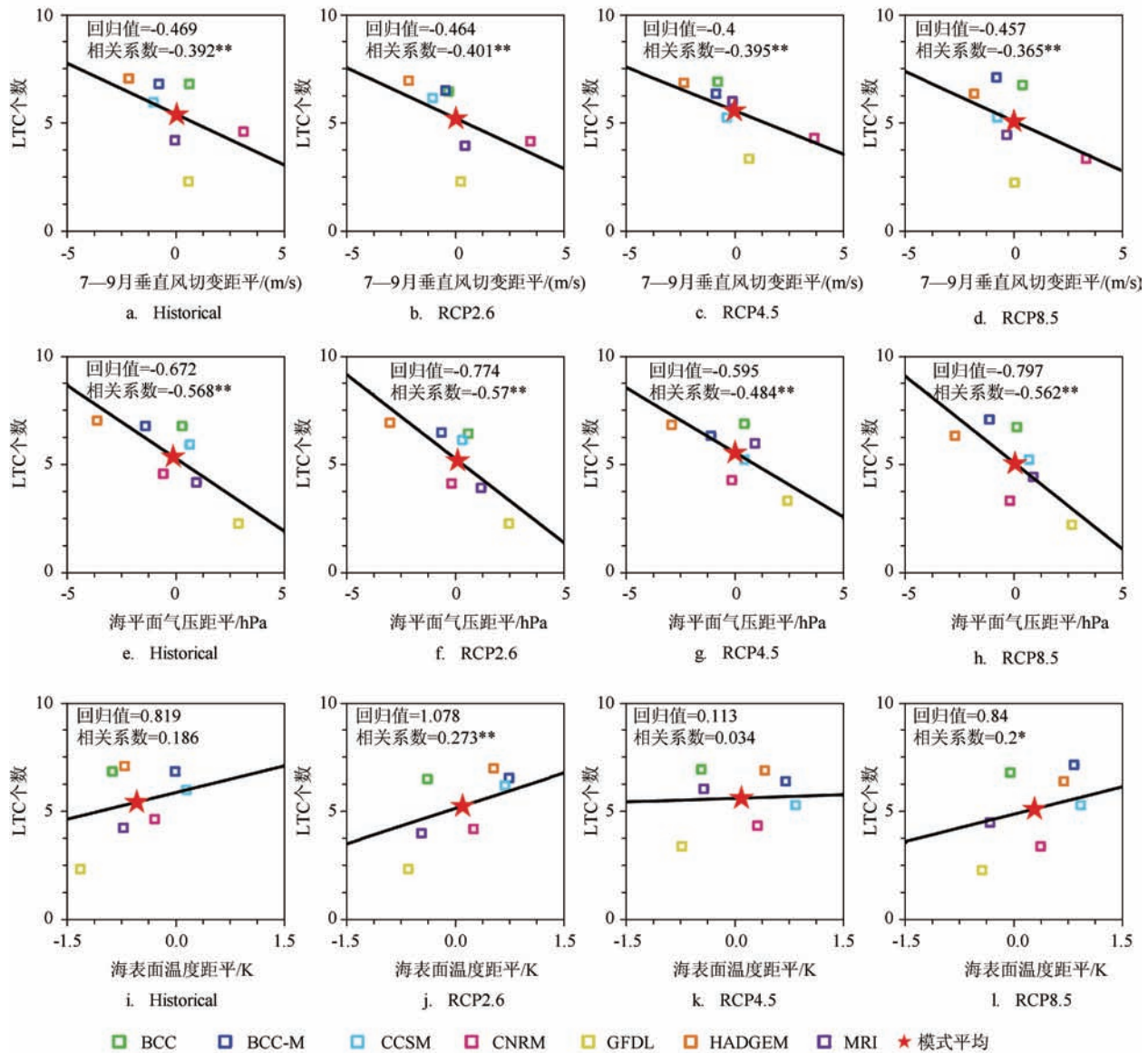


图6 Historical(1986—2005年)和RCP(2026—2045年)年均LTC个数和7—9月平均的垂直风切变、海平面气压、海表面温度相对4个情景平均结果的异常的散点图  
(斜线为各模式20a各年数据点的总体线性回归,\*(\*\*)代表相关系数通过95%(99%)显著性水平的t检验)

但Zhao等<sup>[10]</sup>也指出尽管WS是模式模拟TC频数的一个较好的预报因子,但其并不是TC频数变化的决定性因素。如GFDL模式结果所示,其模拟的WS接近各模式的平均结果而LTC数量则为各模式最少。

对于SLP,同WS类似,模式集合结果的线性趋势也均通过了99%信度水平的t检验,各情景分别表现为-0.67、-0.78、-0.6和-0.8个LTC/(hPa·a),同

样的RCP4.5情景趋势最小。根据各模式结果来看,相对WS来说各模式LTC随SLP变化有着较好的模式间一致性。这说明模式模拟的SLP相比WS对LTC个数的影响更加明显,即SLP模拟较高的模式其对应模拟的LTC个数也相对较少。

根据模式模拟SST的异常情况来看,其与影响中国大陆LTC活动年频次的相关性较弱,仅RCP2.6(RCP8.5)情景下的模式集合结果趋势通过了99%

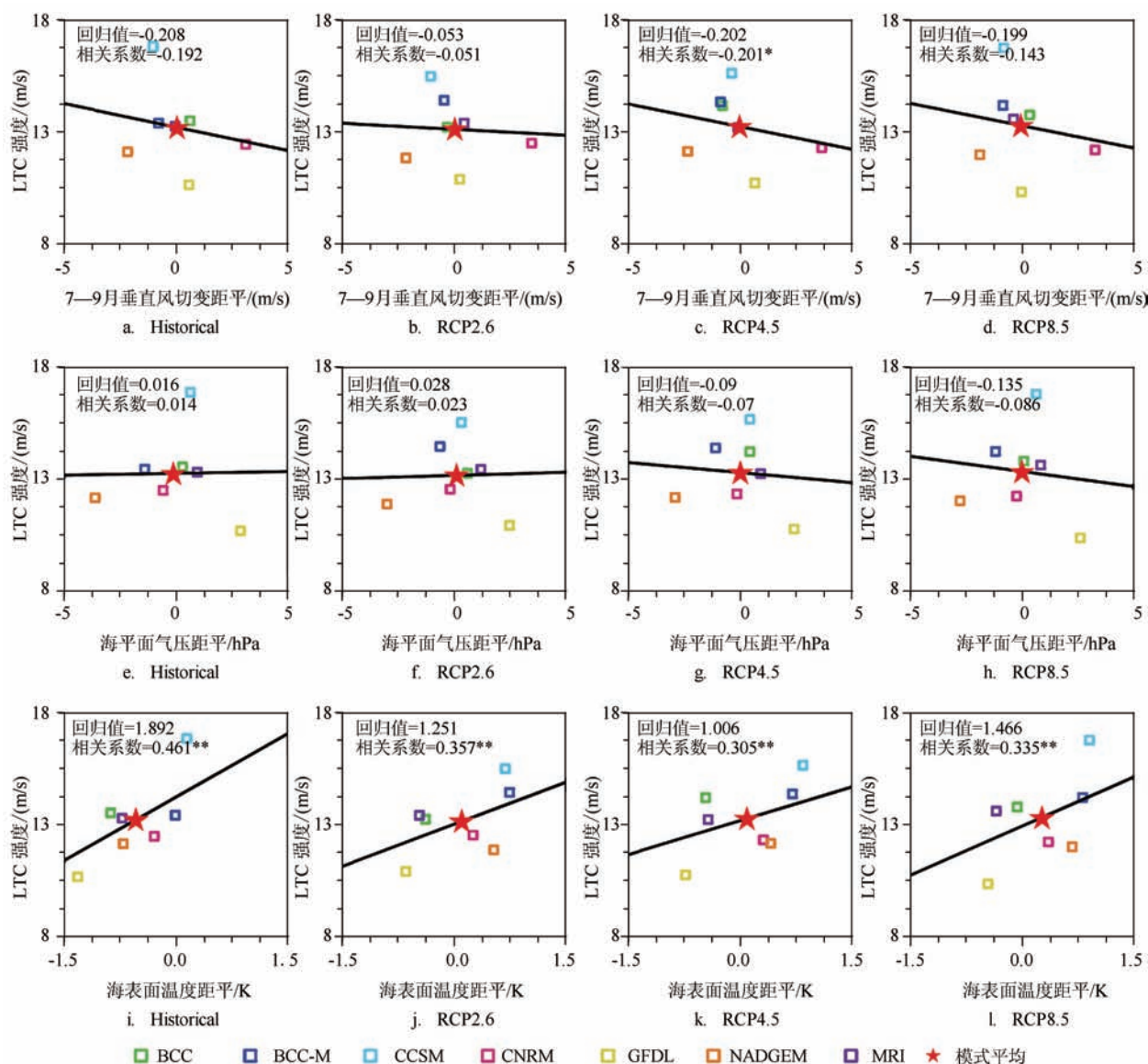


图7 Historical(1986—2005年)和RCP(2026—2045年)年均TC登陆强度和7—9月平均的垂直风切变、海平面气压、海表面温度相对于4个情景平均结果的异常的散点图

(斜线为各模式20a各年数据点的总体线性回归,\*(\*\*)代表相关系数通过95%(99%)显著性水平的t检验)

(95%)信度水平的显著性检验,并表现为随SST增加LTC发生频次增加的趋势,分别为1.1(0.8)个LTC/(K·a)。虽然海表温度较高有利于TC的发生发展<sup>[25]</sup>,但综合各模式结果来看并没有显著表现出LTC频数随模拟SST异常增大而增加的趋势,这说明SST升高在LTC频数变化中不占据主导地位。

综上各情景对比结果显示RCP4.5情景下LTC数量与WS、SLP的线性趋势均小于其他情景,与SST相关性则较差。而就多模式平均结果而言,WS

和SLP在各情景下对比仅有微小差异,SST随情景排放量的增加增大较为明显,但相对于HIS模拟平均年LTC发生频次最大差别也仅减少0.3个/a(RCP8.5,见表4)。

与LTC年发生频次不同,LTC平均登陆强度受各模式模拟SST异常的影响相对WS和SLP来说更加明显(见图7)。对于模式集合的线性回归趋势来看,尽管WS和LTC年均强度在4个情景下均表现出负相关,但相关性均较差,仅在RCP4.5情景下通

过了95%信度水平的 $t$ 检验。SLP则在Historical、RCP2.6情景下表现为正相关,RCP4.5、RCP8.5情景下为正相关,且均未通过95%信度水平的 $t$ 检验。

根据SST结果来看,各情景下相对于WS和SLP均有较好的与LTC平均登陆强度的相关性(均通过了99%信度水平的 $t$ 检验),Historical、RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5分别表现出1.89、1.25、1.01和1.47 m/(s·K)随SST增加的趋势。而多模式集合的平均LTC登陆强度相对于HIS模拟,RCP2.6减小-0.52%,RCP4.5和RCP8.5分别为增大0.32%和0.63%。由此看来,相对于WS和SLP而言,SST与LTC登陆强度的变化之间联系更加密切。这说明,SST作为一种外源强迫,为TC的形成和发展提供直接的能量来源,模式模拟SST的差异相对于WS和SLP来说对TC活动过程中的强度变化影响更大。

综上所述,对于影响我国大陆附近的热带气旋活动来说,全球气候模式模拟的垂直风切变场和海平面气压场对LTC年发生频次的影响较大,均表现为负相关的趋势。而LTC平均强度则与模式模拟海表面温度有较明显的正相关趋势。

## 6 结果与讨论

本文利用中国气象局热带气旋最佳路径数据集(1986—2005年)和CMIP5不同情景下的输出场,对比分析了我国LTC活动特征,并评估了其未来气候情景下的变化趋势。结果表明:(1)虽然历史情景下各模式中LTC的活动均少于历史观测值,但其较好的再现了LTC的季节分布特征和强度分布特征,以及登陆我国的大致区域;(2)对未来气候情景下不同强度LTC活动的频数预估表明,RCP8.5排放情景下LTC活动频数有减少的趋势;(3)相对于Historical情景,RCP2.6和RCP8.5下弱LTC活动有减少的趋势,而较强的LTC活动频数则略微增加,RCP4.5情景下变化不明显;(4)对于与TC活动相关的环境场分析表明,模式中LTC的频次与垂直风切变和海平面气压场存在显著的正相关,而LTC的强度与SST存在显著的正相关,即单个模式中若垂直风切变和海平面气压越大,其模拟的LTC活动数量则越少;若模式中SST越高,则其平均LTC强度也越大。

本文利用全球气候模式的结果分析了登陆我

国的TC活动特征,选择了较为普遍使用的模式TC活动诊断方法(主要基于动力场,包括高低空风场和海平面气压场),并建立了TC登陆的判断依据。而Knutson等<sup>[19]</sup>也指出不同的诊断方法和判别准则也会影响对LTC特征的描述,因此本文的结论可能依赖于所用的诊断方法和判别准则,这需要进行进一步的研究加以确认。另外,本文受限于模式数据资料的获取途径和各模式情景数据的完整性,仅选取了CMIP5的部分模式结果,并不能很好的解释未来排放情景下气候变化中所存在的模式依赖性问题。因此,完善和改进TC活动诊断和登陆判断方法,增加参与气候评估的模式数量都值得进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 丁一汇, Reiter E R. 影响西太平洋台风形成的大尺度环流条件[J]. 海洋学报, 1983, 5(5): 561-574.
- [2] 王磊, 陈光华, 黄荣辉. 影响登陆我国不同区域热带气旋活动的大尺度环流定量分析[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 916-922.
- [3] Wang B, Chan J C L. How Strong ENSO Events Affect Tropical Storm Activity Over the Western North Pacific[J]. Journal of Climate, 2002, 15(13): 1643-1658.
- [4] 黄荣辉, 王磊. 台风在我国登陆地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, 2010, 34(5): 853-864.
- [5] 任福民, 王小玲, 陈联寿, 等. 登陆中国大陆、海南和台湾的热带气旋及其相互关系[J]. 气象学报, 2008, 66(2): 224-235.
- [6] Camargo S J. Global and Regional Aspects of Tropical Cyclone Activity in the CMIP5 Models[J]. Journal of Climate, 2013, 26(24): 9880-9902.
- [7] Tory K J, Chand S S, McBride J L, et al. Projected Changes in Late-Twenty-First-Century Tropical Cyclone Frequency in 13 Coupled Climate Models from Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project[J]. Journal of Climate, 2013, 26(24): 9946-9959.
- [8] Sun J Q, Ahn J B. A GCM-Based Forecasting Model for the Landfall of Tropical Cyclones in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(5): 1049-1055.
- [9] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 新一代温室气体排放情景[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 305-307.
- [10] Zhao M, Held I M, Lin S J, et al. Simulations of Global Hurricane Climatology, Interannual Variability, and Response to Global Warming Using a 50-km Resolution GCM[J]. Journal of Climate, 2009, 22(24): 6653-6678.
- [11] Camargo S J, Zebiak S E. Improving the Detection and Tracking of Tropical Cyclones in Atmospheric General Circulation Models[J]. Weather and Forecasting, 2002, 17(6): 1152-1162.
- [12] Walsh K, Lavender S, Scoccimarro E, et al. Resolution dependence of Tropical Cyclone Formation in CMIP3 and Finer Resolution Models[J]. Climate Dynamics, 2013, 40(3-4): 585-599.



- [13] Walsh K J E, Fiorino M, Landsea C W, et al. Objectively Determined Resolution-Dependent Threshold Criteria for the Detection of Tropical Cyclones in Climate Models and Reanalyses[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(10): 2307-2314.
- [14] Tory K J, Chand S S, Dare R A, et al. The Development and Assessment of a Model-, Grid-, and Basin-Independent Tropical Cyclone Detection Scheme[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(15): 5493-5507.
- [15] Horn M, Walsh K, Zhao M, et al. Tracking Scheme Dependence of Simulated Tropical Cyclone Response to Idealized Climate Simulations[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(24): 9197-9213.
- [16] Tory K J, Chand S S, Dare R A, et al. An Assessment of a Model-, Grid-, and Basin-Independent Tropical Cyclone Detection Scheme in Selected CMIP3 Global Climate Models[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(15): 5508-5522.
- [17] Emanuel K, Sundararajan R, Williams J. Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 347-367.
- [18] Bender M A, Knutson T R, Tuleya R E, et al. Modeled Impact of Anthropogenic Warming on the Frequency of Intense Atlantic Hurricanes[J]. *Science*, 2010, 327(5964): 454-458.
- [19] Knutson T R, McBride J L, Chan J, et al. Tropical Cyclones and Climate Change[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 157-163.
- [20] Murakami H, Wang Y Q, Yoshimura H, et al. Future Changes in Tropical Cyclone Activity Projected by the New High-Resolution MRI-AGCM[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(9): 3237-3260.
- [21] Manganello J V, Hodges K I, Dirmeyer B, et al. Future Changes in the Western North Pacific Tropical Cyclone Activity Projected by a Multidecadal Simulation with a 16-km Global Atmospheric GCM[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(20): 7622-7646.
- [22] 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 969-986.
- [23] Chen G H, Huang R H. Influence of Monsoon Over the Warm Pool on Interannual Variation on Tropical Cyclone Activity Over the Western North Pacific[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25(2): 319-328.
- [24] 黄荣辉, 陈光华. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 683-694.
- [25] Chu P S. Large-Scale Circulation Features Associated with Decadal Variations of Tropical Cyclone Activity over the Central North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(18): 2678-2689.

## Climate change projection of the landfalling tropical cyclone in China: results of CMIP5 models

LI Han, LING Tie-jun, ZU Zi-qing, WANG Jian

(National Marine Environmental Forecasting Center, Key Laboratory of Research on Marine Hazards forecasting, State Oceanic Administration People's Republic of China, Beijing 100081 China)

**Abstract:** Based on Landfalling Tropical Cyclone (LTC) Best-Track (BST) Data from China Meteorological Administration (CMA) and 7 Global Climate Models (GCMs) outputs under historical scenario during 1986—2005 and the Representative Concentration Pathways, this paper firstly investigated the simulated LTC from the GCMs in contrast with the BST. Then the change of frequency and intensity of future LTCs from the GCMs under the RCPs (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) over 2026—2045 are also detected and projected. The result show that, the LTCs from GCMs well reproduce the observed LTC seasonal, geographical position and intensity probability distribution although the frequency of LTCs detected from the GCMs are all less than observed. With respect to the reference period 1986—2005 of historical simulation, the annual mean occurrence frequency of weak LTCs decrease while strong ones increase under RCP2.6 and RCP8.5 scenario. It turns out that the annual mean occurrence frequency of LTCs has a significant negative relationship with the regional average vertical wind shear and sea level pressure between GCMs, while the average landing intensity show a significant positive correlation with sea surface temperature. However, when turn to the ensemble mean of GCMs, the change of LTCs frequency and intensity among each scenarios do not show any consistency with the corresponding environment factors.

**Key words:** CMIP5 global climate models; tropical cyclone; landfall; climate change; projection