

论文

蓝色北极情景下西北太平洋台风会增多吗?

马洁华^{①②③*}, 王会军^{①②}, 张颖^{①②}

① 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029;

② 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029;

③ 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

* E-mail: majh@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2013-01-07; 接受日期: 2013-05-20; 网络版发表日期: 2013-10-30

国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB955401)、国家自然科学基金项目(批准号: 41130103)和挪威科研理事会项目资助

摘要 未来的全球变暖情景下, 西北太平洋台风活动会有怎样的变化? 利用 CMIP3 模式在 IPCC A1B 情景下对未来气候的预估结果, 得到全球变暖之北极夏季(September)无海冰时的一种情景, 即“蓝色北极”。利用相应的海温场和 CO₂ 含量驱动一个全球大气环流模式, 来对北极夏季无海冰时的西北太平洋台风生成环境做出数值模拟。试验结果表明, 蓝色北极情况下, 6~10月西北太平洋的大气环流和海洋环流都发生了明显变化, 影响台风活动的主要环境要素: 纬向风垂直切变和向外射出长波辐射空间分布的变化分别有利于台风源地向偏西、偏北转变; 与台风频数有密切联系的关键区中上述量的变化且皆利于台风频次的减少。热带气旋生成潜力指数的变化表现为西北太平洋东部减小, 而西部增大。因而呈现了非常复杂的变化格局。

关键词

蓝色北极
海冰
气候变化
西北太平洋
台风

热带气旋是危害全球的十大自然灾害之一, 它所带来的强风和暴雨往往造成严重的经济损失和人员伤亡, 而我国是世界上受台风影响严重的国家之一。因而, 研究台风的形成和活动规律对我国台风气候趋势预测以及台风灾害评估都具有非常重要的意义。

自 20 世纪后半期开始, 地球气候系统经历着明显的增暖过程(IPCC, 2007), 其中北极地区海冰的变化引起了广泛的关注。很多对极地冰雪圈的研究显示, 过去几十年北极海冰显著减少(Stroeve 等, 2008; Comiso 等, 2008)并可能继续减少。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告(AR4)用模式预估北极海冰将于 21 世纪后半叶出现夏末海冰完全融化的情况, 鉴于 IPCC 模式模拟的北极海冰的消融速度显著小于实际观测到的海冰消融速度(IPCC, 2007),

更有科学家指出, 北极海冰极有可能在 30 年内就会出现夏末完全融化的情况(Wang 和 Overland, 2009), 即“北极夏季无冰”状态。由于北极冰雪圈在气候系统中占有非常重要的地位, 最近有研究表明, 北极海冰厚度和面积的减小导致北极地区海气热量交换显著增加, 并在北极地区表面气温的升高中发挥了一定的作用(Kurtz 等, 2011)。还有研究表明北极海冰的减少伴随着北半球高纬地区大气环流的显著改变(Overland 和 Wang, 2010), 甚至中纬度地区气候的变化(Wang 和 Zhang, 2010)。那么在未来全球变暖情景下, 西北太平洋台风活动将会发生怎样的变化? 本文研究的目的是利用模式对北极海冰出现夏末完全消融情况下的西北太平洋台风活动作出预估。

全球变暖对于台风活动会产生怎样的影响一直

中文引用格式: 马洁华, 王会军, 张颖. 蓝色北极情景下西北太平洋台风会增多吗? 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1781-1787

英文引用格式: Ma J H, Wang H J, Zhang Y. Will typhoon over the western North Pacific be more frequent in the blue Arctic conditions? Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4747-6

是受到关注的热点问题, 有大量的工作或从观测资料中分析台风活动与全球变暖的联系, 或者利用模式分析全球变暖对台风的影响. Emanuel(1987)利用一个简单的热力学模型证明温室气体增加带来的全球增暖可以加强台风的强度. 后来许多基于近几十年观测资料的研究指出, 自 1995 年以来, 北大西洋台风频数增加(Goldenberg 等, 2001; Webster 等, 2005), 而西北太平洋则无显著变化(Chan 和 Liu, 2004), 全球范围内强台风所占比例都有所增加, 以西太平洋地区强台风所占比重增加最多(Webster 等, 2005). 有研究认为 20 世纪末的台风活动的变化属于年代际振荡(Goldenberg 等, 2001). 同时, 也有科学家持不同看法. Emanuel(2005)定义了一个描述台风破坏力的指数, 该指数综合了台风的生命长度和能量耗散, 发现从 20 世纪 70 年代中期开始, 台风的破坏力呈上升趋势, 并且与海表面温度(SST)有很高的相关. 所以他认为过去几十年台风破坏力的变化是年代际振荡与全球变暖共同作用的结果. 而这些结果强烈的依赖于观测资料的质量, Ren 等(2011)对常用的 3 套台风观测资料进行了对比分析, 发现不同资料间差异较大, 而综合 3 套资料来看, 他们认为从 20 世纪中期到 21 世纪初西北太平洋台风频次没有显著的趋势变化. 随着气候模式的发展, 利用大气模式或者耦合模式对全球增暖情景下台风活动进行模拟预估的研究逐渐开展起来. Sugi 等(2002)利用一个大气模式, 模拟 CO₂ 含量加倍的情景下全球台风的变化, 结果显示北大西洋台风频次显著减少, 北大西洋台风频次增加, 全球台风强度无明显变化. 并且他们认为台风频次的变化主要与热带海洋表面温度异常的分布有关. Oouchi 等(2006)利用更高分辨率的大气模式进行未来增暖情景的预估, 结果显示除北大西洋外全球其他海洋上台风频次都减少, 而北大西洋台风频次增加. 通过对台风中心最大风力的分析显示, 未来台风的强度将增强. Gualdi 等(2008)利用高分辨率的耦合模式模拟了未来 CO₂ 含量加倍或者四倍的情景下台风活动的变化, 结果显示由于大气稳定度增加, 西北太平洋台风活动减弱, 同时由于大气稳定度增加和纬向风垂直切变增大, 北大西洋台风活动也减弱. 从台风所造成的降水的强度来看, 全球台风强度都将增强. 他们同时指出, 尽管副热带和中纬度海洋增暖, 但是台风的主要活动区域仍然局限于热带地区. 张

颖等(2010)分析了 CMIP3 (Phase3 of the Coupled Model Intercomparison Project)18 个耦合模式 A2 情景下 21 世纪末的模拟结果, 结果显示 21 世纪末西北太平洋地区纬向风垂直切变与向外长波辐射(OLR)都将减小, 有利于该地区的台风活动. 由此可见, 对于未来台风活动的模拟, 模式间还是有较大差别, 所以未来台风活动将如何变化仍然是科学界讨论的热点问题, 在这方面还存在许多争议(Trenberth, 2005; Shepherd 和 Knutson, 2007).

环境场对台风活动有重要影响. 许多的研究工作表明西北太平洋地区大气和海洋的状况对该地区台风的频数、强度和路径都会产生影响; 此外中高纬度、赤道东太平洋以及南半球的系统也通过遥相关作用对台风活动产生一定影响(王慧等, 2006; 王会军等, 2006, 2007; 范可, 2007a; 周波涛等, 2008). 在此基础上有不少学者利用大尺度环境场对西北太平洋地区的台风活动进行预测和预估研究(Chan 和 Liu, 2004; 郎咸梅和王会军, 2008; 范可, 2007b). 考虑到本研究所用大气模式空间分辨率有限, 采用环境场的分析更为合理, 所以本文主要从西北太平洋台风生成的环境场进行分析.

1 模式和数值模拟试验设计

“蓝色北极”指的是在全球变暖背景下, 未来北极海冰出现季节性完全消融的情况, 即北冰洋不再被白色海冰覆盖, 而是蔚蓝的海水, 故称为“蓝色北极”. 本研究中“蓝色北极”的定量判定采用 Wang 等(2009)所用的标准, 即月平均海冰面积 $<1.0 \text{ Mkm}^2$.

本试验所采用的模式为 IAP9L-AGCM, IAP9L-AGCM 是 Zeng 等(1987)在发展 IAP2L-AGCM 的经验和基础上发展、建立起来的全球大气环流格点模式, 它的水平分辨率为 $4^\circ \times 5^\circ$, 垂直分 9 层, 模式层顶为 10 hPa. 该模式已被广泛应用于短期气候预测, 年际、年代际气候变化研究, 气候系统相互作用机制分析以及古气候模拟研究中. 而且郎咸梅等(2008)的研究证明该模式对西北太平洋台风活动中主要相关大尺度环境场具有较大的气候预测潜力, 并有能力在一定程度上实现西北太平洋台风活动异常的实时气候预测. 所以本文选择该模式开展数值试验.

本文设计了 2 个试验, 一个为参照试验, 采用

1971~2000年气候平均态的月平均海温和 CO_2 含量驱动 IAP9L-AGCM 进行模拟. 另一个为敏感试验, 用于代表北极夏季无海冰时的状况. 敏感试验所使用的资料包括 CMIP3 模式 A1B 情景下的月平均海冰覆盖度数据和海洋表面温度(sea surface temperature, SST)数据(共包括 22 个海气耦合模式的 55 个集合的结果). 首先根据海冰覆盖度数据计算海冰的面积, 由于北极海冰的面积于每年的 9 月份达到一年中的最低值, 所以如果某年 9 月份北极的海冰面积 $<1.0 \text{ Mkm}^2$, 则判定为出现“蓝色北极”. 最终有 5 个模式 7 个集合的结果达到此标准, 分别为 CNRM_CM3, GFDL_CM2.1, MIROC3.2_hires 和 MIROC3.2_medres(3 个集合)和 UKMO-HadCM3, 并将这一年记录为开始年. 然后从相对应的 SST 数据中取开始年至其后 9 年共 10 年的值进行多年平均和多模式集合平均, 得到敏感试验的逐月海温场. 最后根据开始年和 IPCC 第三次评估报告中的 A1B 状态下 Bern-CC 模式(参考态, 定义为 20 世纪 80 年代全球海洋平均每年吸收 CO_2 2.0 PgC 情况下大气中 CO_2 的含量)的 CO_2 含量设置得到敏感试验的 CO_2 含量(关于试验的边界场和 CO_2 含量设置等情况请参照文献马洁华等(2011, 2012)).

敏感试验的其他条件和参照试验相同. 2 个试验各积分 35 年, 取后 30 年的模式输出结果进行分析. 文中的变化值均为敏感试验与参照试验之差, 并采用 t 检验进行显著性分析.

2 模式模拟的西北太平洋台风生成环境的变化

台风的发生频数和强度与台风源地的环境条件

密切相关. 前人的研究指出, 大多数台风形成的源地在 $5^\circ\sim 25^\circ\text{N}$, 170°E 以西的广阔洋面上, 有 3 个台风的主要发生地区, 分别在南海、菲律宾群岛以东以及马里亚纳群岛附近(陈世荣, 1990; 陈敏等, 1999). 其中南海地区在 17°N 附近台风生成最多, 而其他两个地区在 10°N 附近台风发生最多, 台风发生最为频繁的 6~10 月份台风源地都维持在比较偏北的位置, 集中在 $15^\circ\sim 20^\circ\text{N}$ 附近(陈敏等, 1999). 所以在此我们选取 $10^\circ\sim 25^\circ\text{N}$, $110^\circ\sim 170^\circ\text{E}$ 作为 6~10 月份台风的主要形成区域.

影响热带气旋生成和发展的主要环境条件包括: 海洋表面和上层水温、大气对流条件、辐合辐散条件和纬向风的垂直切变等. 一般来说, 高海温、对流不稳定层结、对流层中层较高的相对湿度、低层正涡度、弱的纬向风垂直切变和对流层低层辐合高层辐散的配置有利于台风的形成(Gray, 1968, 1998).

图 1(a)和(b)分别给出了模式参照试验和敏感试验所用的 6~10 月(JJASO)平均的海温分布. 在蓝色北极情况下, 西北太平洋西南部的菲律宾附近的大片海域仍为海温最高的地区, 暖池区的海温高达 30°C , 相比参照试验的 6~10 月(JJASO)的平均海温来讲, 西北太平洋地区海表面气温等值线相比参照试验普遍向北扩张.

纬向风的垂直切变是影响台风发生、发展的重要环境条件, 弱的纬向风垂直切变有利于台风的发展. 其计算方法为 $|u_{200} - u_{850}|$, 其中 u_{200} 和 u_{850} 分别是 200 和 850 hPa 的纬向风. 图 2 是蓝色北极情况下 JJASO 850 hPa 与 200 hPa 之间纬向风垂直切变的变化, 从图中可以看出, 6~10 月份在台风的主要源地, 140°E 以东纬向风的垂直切变主要是增加的, 以西主要是减小的, 这种变化的空间分布有利于 140°E 以西

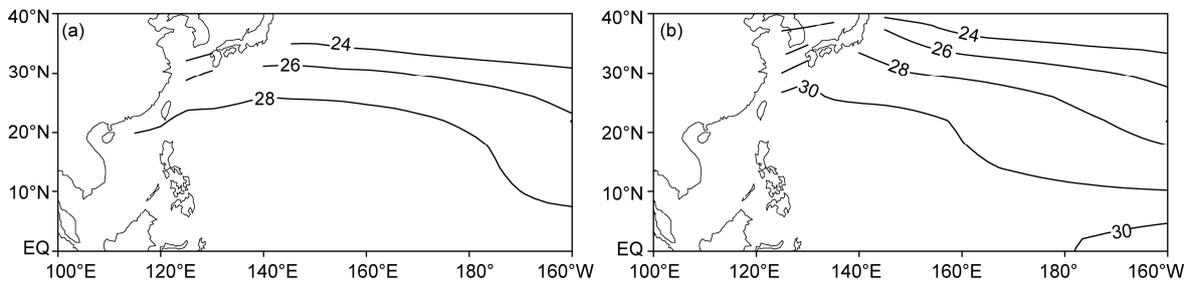


图 1 参照试验(a)和敏感试验(b)中 6~10 月(JJASO)平均海表面温度分布

单位: $^\circ\text{C}$

地区台风的形成.

郎咸梅等(2008)发现 6~10 月(JJASO)155°E~170°W, 8°~17°N 的纬向风垂直切变与西北太平洋台风频次存在显著的负相关关系, 尤其在非 ENSO 年这种反位相变化的关系更加稳定. 在蓝色北极情况下, 上述区域的垂直纬向风切变以加强为主, 则西北太平洋台风频次将减少.

台风从本质上来说是出现在热带海洋上一种天气尺度的有组织的对流系统, 所以可以表征大气对流活动发展的对外长波辐射(OLR)也可以反映台风的活动. 郎咸梅等(2008)的研究指出, 实测 6~10 月 OLR 与西北太平洋台风频次在台风源区存在一个明

显负相关区(145°E~180°, 0°~16°N). 而我们的试验结果表明, 蓝色北极情况下, 该区域的 OLR 主要表现为增强(图 3). 根据郎咸梅等的结果, 则西北太平洋台风频次在蓝色北极的情况下将减少.

为了可以更加直观地描述蓝色北极情况下西北太平洋地区环境场的变化对台风生成活动的影响, 我们计算了 6~10 月热带气旋生成潜力指数(GPI)的变化. 该指数综合考虑了影响热带气旋生成的主要热力和动力条件, 关于 GPI 的计算方法如下(Emanuel 和 Nolan, 2004; Camargo 等, 2007):

$$GPI = |10^5 \eta|^{3/2} \left(\frac{H}{50}\right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^3 (1 + 0.1V_{shear})^{-2}, \quad (1)$$

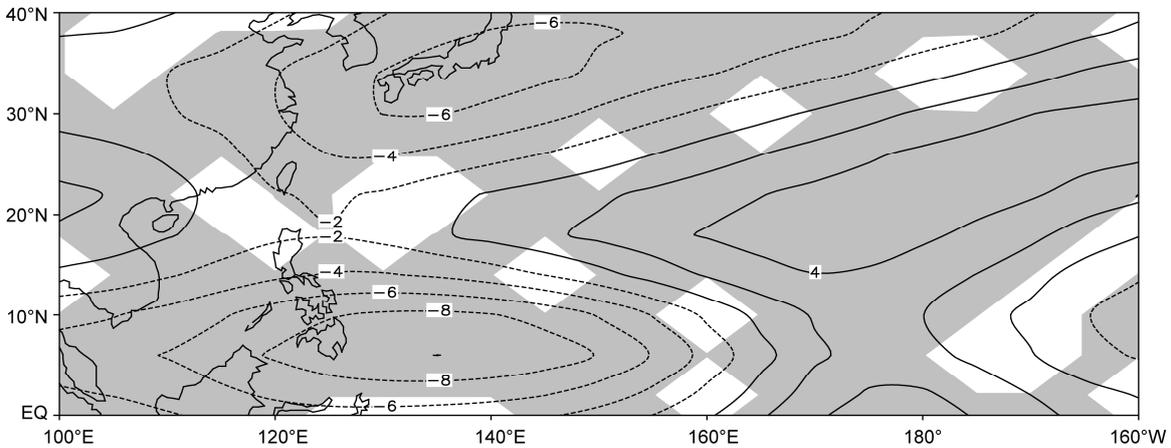


图 2 蓝色北极情况下 6~10 月(JJASO)纬向风垂直切变的变化

单位: $m s^{-1}$; 阴影区所示为通过 95% 显著性检验的区域

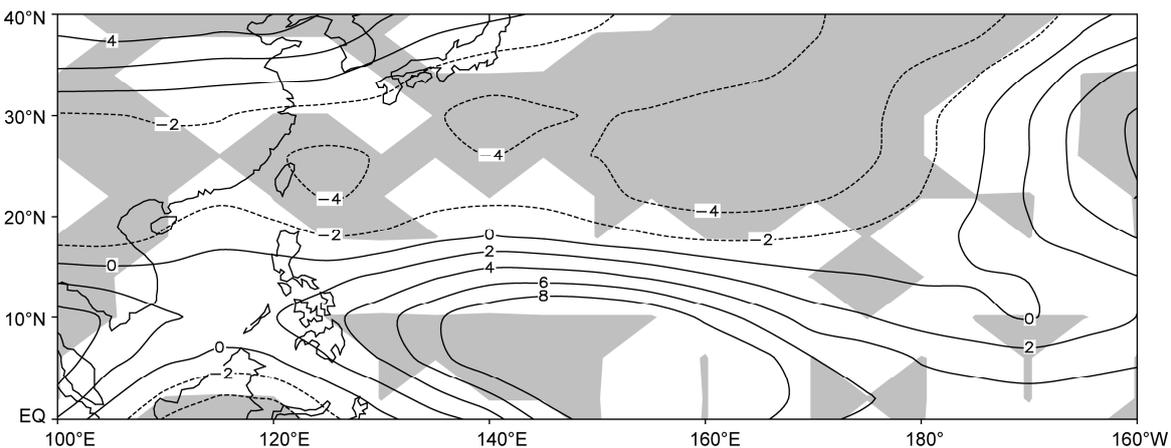


图 3 蓝色北极情况下 6~10 月(JJASO)射出长波辐射(OLR)的变化

单位: $W m^{-2}$, 阴影区所示为通过 95% 显著性检验的区域

式中, η 为 850 hPa 的绝对涡度(单位: s^{-1}), H 为 600 hPa 的相对湿度(单位: %), V_{pot} 为热带气旋潜在强度(单位: $m s^{-1}$), V_{shear} 为 850 与 200 hPa 之间的纬向风垂直切变(单位: $m s^{-1}$). 其中 V_{pot} 的计算较为复杂, 具体方法请参照文献(Bister 和 Emanuel, 2002).

从图 4 中可以看出, 蓝色北极情况下, 西北太平洋 150°E 以东热带气旋生成潜力指数主要呈减小的变化, 而 140°E 以西则为增加为主, 说明通过该指数所表征的热带气旋生成潜力在西北太平洋东部减小, 在西部增大.

台风活动受到众多动力和热力环境因素的综合影响, 并同时受到大气状态和海洋状态的影响. 在蓝色北极情况下, 由于陆地和海洋增暖的幅度不一致, 陆地区大气加热强于海洋区大气加热, 导致海陆之间空气质量的再分配(马洁华等, 2011). 结果是大陆区 SLP 降低, 海洋区 SLP 升高. 如图 5 所示在蓝色北极情况下, 北太平洋地区的海平面气压表现为升高, 升幅中心位于 35°N, 170°W 附近, 欧亚大陆和北美大陆表现为海平面气压的降低, 位于太平洋的高压系统增强. 我国学者之前就注意到了西太平洋副热带高压系统与台风活动密切相关, 指出副高偏强时的环流形势不利于西太平洋低纬地区台风的形成, 热带气旋和台风偏少; 而副高偏弱时期的环流形势则有利于台风生成, 热带气旋和台风偏多(叶英和董波, 1998; 龚道溢和何学兆, 2002). 如此, 蓝色北极情况下, 西北太平洋地区高压系统的增强不利于热带气旋和台风的形成, 与前面通过台风环境场分析得到的台风频次减少的结论是一致的.

同时, 北太平洋 SLP 的正异常中心对应于低层风场的反气旋式异常(图 5). 太平洋东部为偏北风异常, 西部为偏南风异常, 可加强太平洋西部向北边界流和太平洋东部的向南边界流. 同时异常中心南侧的偏东风异常加强了热带太平洋的信风, 进一步增强热带太平洋表层的北赤道流, 继而增强北赤道逆流、北太平洋西部的向北的边界流和东部向南的边界流, 北太平洋地区海洋环流得到增强. 海洋环流的增强将加强热带海洋向高纬地区的热量输送, 对海洋温度起到一定的调节作用, 有利于减小海洋温度的南北梯度, 不利于热带海洋高海温的长时间维持, 对热带气旋和台风的形成有不利影响.

蓝色北极情况下, 由于海冰融化, 北极夏季海冰面积的显著减少, 极区对于太阳辐射的反射极大地减少, 同时开阔的水面增加了大气和海洋的热量交换, 极区能量收入增加, 位势高度场增加. 方之芳等(1991)利用统计方法分析了海冰与 500 hPa 高度场的关系, 发现夏季北极海冰冷源的存在, 可以激发北半球大气产生遥相关型, 这种遥相关型自高纬向低纬分布. 所以北极海冰变化的同时, 除引起极区局地的响应以外, 还存在中低纬度的响应, 正是由于极区以外的响应, 北半球中低纬度的大气环流和海洋环流都发生了一定的变化, 这些变化改变了西北太平洋台风生成的环境场, 继而对台风的的活动产生影响.

3 讨论与结论

为了考查西北太平洋台风活动对蓝色北极的响

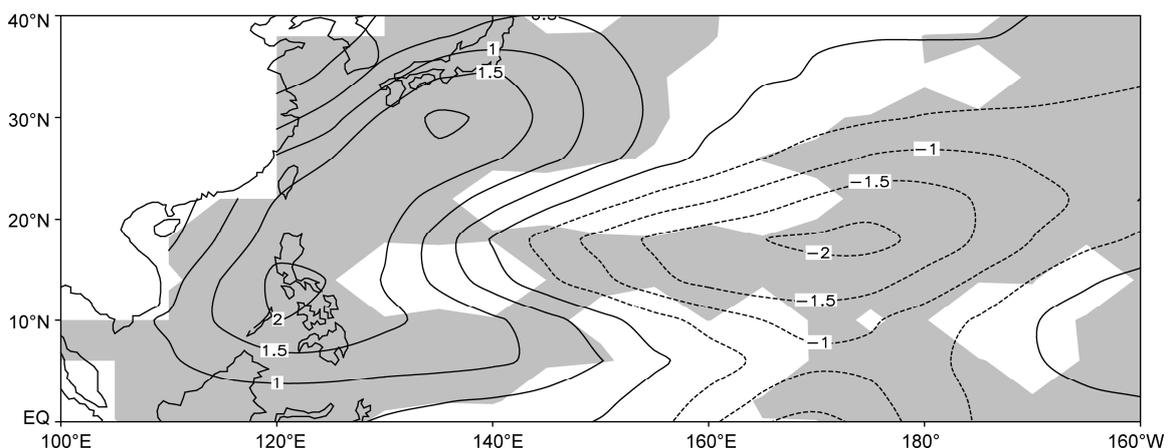


图 4 蓝色北极情况下 6-10 月(JJASO)西北太平洋热带气旋生成潜力指数(GPI)的变化

阴影区所示为通过 95%显著性检验的区域

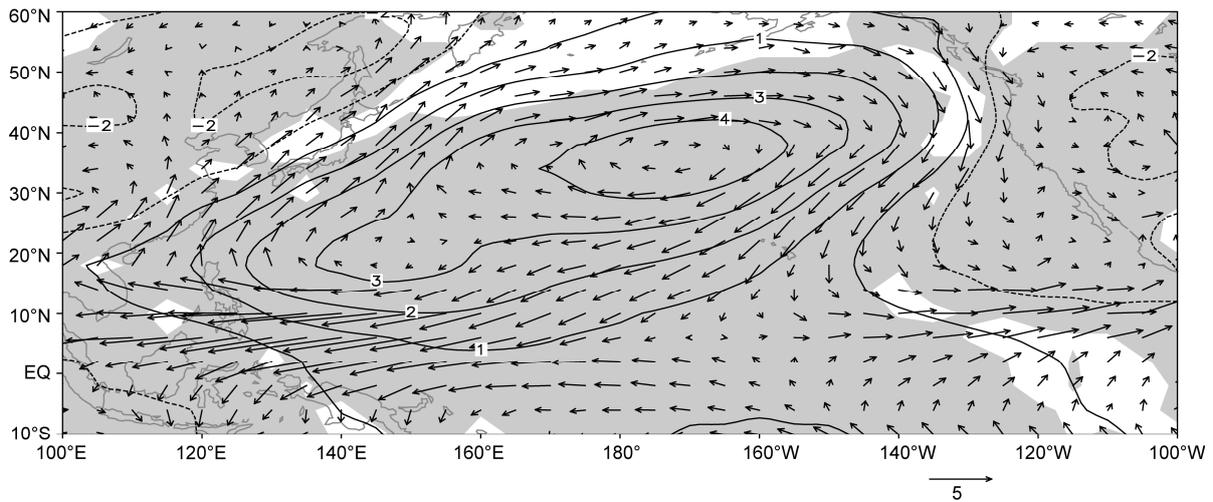


图5 蓝色北极情况下6-10月(JJASO)西北太平洋海平面气压(SLP)和低层风场的变化

等值线为 SLP 的变化值, 单位: hPa; 矢量为低层风场的变化值, 单位: m s^{-1} , 阴影区所示为通过 95% 显著性检验的区域

应, 本文利用 CMIP3 耦合模式预估的 A1B 情景下的海冰和海温以及相应的 CO_2 含量驱动全球大气环流模式 IAP9L-AGCM, 对蓝色北极情况下西北太平洋台风形成的主要环境场要素进行模拟分析. 结果表明: 蓝色北极情况下, 西北太平洋台风主要源地的纬向风垂直切变和 OLR 的变化都呈现出非均一的特点, 其中纬向风垂直切变主要为东、西反向变化, 而 OLR 则为南、北反向变化. 综合这两个环境要素的变化来看, 同时考虑到台风源地的季节性变化, 蓝色北极情况下, 台风形成源地位置可能较目前偏西、偏北. 同时利用热带气旋生成潜力指数(GPI)综合分析了跟热带气旋生成有关的热力和动力变量对西北太平洋地区热带气旋生成潜力的影响, 结果表明西北太平洋 140°E 以西地区热带气旋生成潜力增大, 而 150°E 以东地区热带气旋生成潜力减小, 即蓝色北极情况下, 距离我国大陆较近的南海和菲律宾群岛附近台风可能更多地发生. 再根据郎咸梅等(2008)对于台风频次与环境场关系的研究结果, 对比蓝色北极情况下环境场要素的变化, 在关键区纬向风垂直切变和 OLR 的变化一致表明蓝色北极情况下, 西北太平洋台风频次可能减少.

在此之前有不少研究也指出全球变暖将使得西北太平洋台风频次减少. Sugi 等(2002)认为这是由于

海洋增暖存在区域差异, 使得台风源区海表面温度(SST)异常与周围区域梯度减小, 从而对流活动减弱, 最终造成台风频次减少. 本文从影响西太平洋台风活动的其他环境要素入手, 得到同样的结论.

蓝色北极是全球持续变暖未来可能出现的一种情况, 那么本文所得到的上述结论与过去几十年全球变暖过程中西北太平洋台风源地与频次的变化是否一致呢? 王咏梅等(2007)利用中国气象局的台风观测资料对 1951~2004 年我国影响台风的频次和源地进行了统计分析, 发现 1951~2004 年影响台风频次呈减少趋势, 同时影响台风源地由 20 世纪 60~70 年代的偏东、偏南转为 20 世纪 80 年代以后偏北、偏西. 当然, 目前还无法断定西太平洋台风频次和源地的变化便是由于全球变暖引起的, 观测到的台风频次和源地的变化也可能只是一种年代际变化. 本文的结果为大气模式模拟的结果, 由于模式分辨率还不够, 而且本文有部分结论是基于前人对于观测资料的统计结果, 统计关系本身也存在一定的不稳定性, 所以本文的结论存在一定的不确定性. 此外北极地区的变化影响中低纬度气候的机制, 未来还需要更加深入的研究. 另外, 随着计算机能力的提升和高分辨率模式的发展, 利用高分辨率的全球气候模式对未来台风变化进行模拟和预估研究将逐步成为可能.

参考文献

- 陈敏, 郑永光, 陶祖钰. 1999. 近 50 年(1949~1996)西北太平洋热带气旋气候特征的再分析. *热带气象学报*, 15: 10–16
- 陈世荣. 1990. 西北太平洋的热带风暴源地. *气象*, 16: 23–26
- 范可. 2007a. 北太平洋海冰, 一个西北太平洋台风生成频次的预测因子? *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37: 851–856
- 范可. 2007b. 西北太平洋台风生成频次的新预测因子和新预测模型. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37: 1260–1266
- 方之芳, 谭友邦. 1991. 夏季北极海冰激发的 500 hPa 遥相关型. *大气科学*, 15: 53–60
- 龚道溢, 何学兆. 2002. 西太平洋副热带高压的年代际变化及其气候影响. *地理学报*, 57: 185–193
- 郎咸梅, 王会军. 2008. 利用气候模式能够预测西北太平洋台风活动的气候背景吗? *科学通报*, 53: 1702–1708
- 马洁华, 王会军, 张颖. 2011. 北极夏季无海冰状态时的东亚气候变化数值模拟研究. *气候变化研究进展*, 7: 178–183
- 马洁华, 王会军, 张颖. 2012. 我国未来冬季降水会增加吗? 北极夏季无海冰情景时的模拟试验. *科学通报*, 57: 759–764
- 王慧, 丁一汇, 何金海. 2006. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响. *气象学报*, 64: 345–356
- 王会军, 孙建奇, 范可. 2007. 北太平洋涛动与台风和飓风频次的关系研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37: 966–973
- 王会军, 范可. 2006. 西北太平洋台风生成频次与南极涛动的关系. *科学通报*, 51: 2910–2914
- 王咏梅, 李维京, 任福民, 等. 2007. 影响中国台风的气候特征及其与环境场关系的研究. *热带气象学报*, 23: 538–544.
- 叶英, 董波. 1998. 西北太平洋强热带气旋活动的年代际变化. *气象*, 24: 29–34
- 张颖, 王会军. 2010. 全球变暖背景下西北太平洋地区台风活动背景场气候变化的预估. *气象学报*, 68: 539–549
- 周波涛, 崔绚, 赵平. 2008. 亚洲-太平洋涛动与西北太平洋热带气旋频数的关系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38: 118–123
- Bister M, Emanuel K. 2002. Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity. 1. Interannual to interdecadal variability. *J Geophys Res*, 107: ACL26.1–ACL26.15
- Camargo S J, Sobel A H, Barnston A G, et al. 2007. Tropical cyclone genesis potential index in climate models. *Tellus*, 59: 428–443
- Chan J C L, Liu K S. 2004. Global warming and western North Pacific typhoon activity from an observational perspective. *J Clim*, 17: 4590–4602
- Comiso J, Parkinson C, Gersten R, et al. 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophys Res Lett*, 35: L01703
- Emanuel K A. 1987. The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, 326: 483–485
- Emanuel K A. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436: 686–688
- Emanuel K A, Nolan D S. 2004. Tropical cyclone activity and global climate. In: *Preprints, 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. Miami: American Meteorological Society. 240–241
- Goldenberg S B, Landsea C W, Mestas-Nuñez A M, et al. 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 293: 474–479
- Gray W M. 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon Weather Rev*, 96: 669–700
- Gray W M. 1998. The formation of tropical cyclones. *Meteorol Atmos Phys*, 67: 37–69
- Gualdi S, Scoccimarro E, Navarra A. 2008. Changes in tropical cyclone activity due to global warming: Results from a high-resolution coupled general circulation model. *J Clim*, 21: 5204–5228
- IPCC. The physical science basis. 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Kurtz N, Markus T, Farrell S, et al. 2011. Observations of recent Arctic sea ice volume loss and its impact on ocean-atmosphere energy exchange and ice production. *J Geophys Res*, 116: C04015
- Oouchi K, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. 2006. Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses. *J Meteor Soc Jpn*, 84: 259–276
- Overland J, Wang M. 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus*, 62: 1–9
- Ren F M, Liang J, Wu G X, et al. 2011. Reliability analysis of climate change of tropical cyclone activity over the western North Pacific. *J Clim*, 24: 5887–5898
- Shepherd J M, Knutson T. 2007. The current debate on the linkage between global warming and hurricanes. *Geography Compass*, 1: 1–24
- Stroeve J, Serreze M, Drobot S, et al. 2008. Arctic sea ice extent plummets in 2007. *EOS*, 89: 13–14
- Sugi M, Noda A, Sato N. 2002. Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model. *J Meteor Soc Jpn*, 80: 249–272
- Trenberth K. 2005. Uncertainty in hurricanes and global warming. *Science*, 308: 1753–1754
- Wang H J, Zhang Y. 2010. Model projections of East Asian summer climate under the ‘free Arctic’ scenario. *Atmos Ocean Sci Lett*, 3: 176–180
- Wang M, Overland J. 2009. A sea ice free summer Arctic within 30 years. *Geophys Res Lett*, 36: L07502
- Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309: 1844–1846
- Zeng Q C, Yuan C G, Zhang X H. 1987. A global grid-point general circulation model. In: *The WMO/IUGG NWP Symposium*. Tokyo: J Meteor Soc Jpn. 421–430