

苗春生, 徐方姝, 王坚红, 等. 2016. 两种温室气体排放情景下中国汛期江淮暴雨低涡特征研究 [J]. 大气科学, 40 (2): 257–270. Miao Chunsheng, Xu Fangshu, Wang Jianhong, et al. 2016. Characteristics of heavy rainfall vortexes during the flood season in Jiang-Huai valley under two greenhouse gas emissions scenarios [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 257–270, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15109.

两种温室气体排放情景下中国汛期江淮 暴雨低涡特征研究

苗春生¹ 徐方姝^{1,3} 王坚红¹ 余钟奇² 高义梅⁴ 张旭⁴

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 上海浦东新区气象局, 上海 200135

3 辽宁省气象服务中心, 沈阳 110166

4 华风气象传媒集团有限公司, 北京 100081

摘 要 本文基于一个水平分辨率为 50 km 的区域气候模式 RegCM4 (Regional Climate Model, version 4.0) 的模拟与预估结果, 对我国汛期江淮暴雨低涡在气候变化背景下的统计特征与合成结构进行分析, 进一步对两种温室排放情景下未来中国汛期的江淮暴雨低涡特征进行预估。结果表明: RegCM4 模式对环境要素及低涡都具有一定的模拟能力, 低涡的伸展高度、生命期及暴雨位置模拟结果与观测较为接近, 但模拟的低涡个数、最大暖区高度以及温、湿要素分布均比实际略偏低, 而风速和低涡的强度模拟则偏强; 在未来两种温室排放情景预估方面, RCP4.5 (Representative Concentration Pathways, 简称 RCP) 典型浓度排放情景下, 暴雨低涡数量比例减少, 强度减弱, 但低涡发展高度仍以 850 hPa 为主, 生命期多为 2 d 以内, 低涡雨区分布及最大暖区高度均与历史时段相近; RCP8.5 情景下, 暴雨低涡比例明显大于 RCP4.5 情景, 低涡发展高度以 700 hPa 为主, 生命期达 3 d 的增多, 强度增强, 最大暖区厚度范围显著伸展。两种情景下均有低涡中温度锋区减弱, 而湿度锋区增强, 但 RCP8.5 情景减弱与增强更显著, 显示更高的温室气体排放将导致未来出现更强的暴雨低涡, 造成伴随暴雨的低涡灾害性天气的增加, 因此应进一步深化对低涡暴雨灾害性天气发展趋势的研究。

关键词 RegCM4 (Regional Climate Model, version 4.0) 模式 典型浓度温室排放情景 江淮汛期 暴雨低涡

文章编号 1006-9895(2016)02-0257-14

中图分类号 P447 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15109

Characteristics of Heavy Rainfall Vortexes during the Flood Season in Jiang-Huai Valley under Two Greenhouse Gas Emission Scenarios

MIAO Chunsheng¹, XU Fangshu^{1,3}, WANG Jianhong¹, YU Zhongqi², GAO Yimei⁴, ZHANG Xu⁴

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Pudong New Area Meteorological Bureau of Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200135

收稿日期 2015-01-13; **网络预出版日期** 2015-05-15

作者简介 苗春生, 男, 1954年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事大气中小尺度动力学。E-mail: 1597706505@qq.com, csmiao@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41276033, 国家科技支撑项目2012BAH05B01, 公益性行业(气象)专项项目 GYHY201206068, 中国气象局气候变化专项江苏气候变化评估CCSF201318, 江苏科技支撑项目BE2012774、BE2014729, 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

Founded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41276033), National Science and Technology Support Program (Grant 2012BAH05B01), Project Supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY 201206068), Climate Change Special Fund of China Meteorology Administration (Grant CCSF201318), Jiangsu Science and Technology Support Programs (Grants BE2012774, BE2014729), Superiority Discipline Construction Project of Jiangsu Universities and Colleges (PAPD)

3 Liaoning Province Meteorological Service Center, Shenyang 110166

4 Huafeng Meteorological Media Group, Beijing 100081

Abstract The aim of this study was to analyze the statistical and structure evolutive characteristics of heavy rainfall vortexes during the flood season in Jiang-Huai valley, China, against the background of climate change, and to provide projections under two emission scenarios for the period 2020–2030, by using the regional climate model RegCM4 (Regional Climate Model, version 4.0) with a horizontal resolution of 50 km. The results showed that RegCM4 can capture the environmental aspects and characteristics of this vortex type reasonably well. The simulated outputs were similar to reality in several ways, including vertical development height, lifetime, and the relative rainstorm position of the vortex. However, the simulated results were lower with respects to the number and the warmest section height of the vortex, and the background temperature and humidity, while the intensity of the vortex and velocity were higher. In terms of projection for the period 2020–2030, under the RCP4.5 (Representative Concentration Pathways) scenario, the proportion of vortexes with rainstorms was shown to decrease; the vertical development height of the vortex was mainly at 850 hPa; and the life span was mostly within 2 days. The distribution of heavy rainfall and the warmest zone height were close to those in the historical period, but the intensity was weaker. Meanwhile, under the RCP8.5 scenario, the percentage of vortexes with rainstorms was projected to be greater than that under the RCP4.5 scenario; the vertical development height of the vortex was mainly at 700 hPa; the vortexes with the life span of 3 days increased; the vortex intensity enhanced; and the thickness of the warmest zone extended significantly. The moisture fronts in the vortex strengthened, but temperature fronts weakened. The study reveals that more severe vortex precipitation may occur in the future under higher greenhouse gas emissions. Further research is therefore needed on the development trends of low vortexes with severe rainfall.

Keywords Model RegCM4 (Regional Climate Model, version 4.0), Greenhouse gas, Emission scenarios, Flood season, Jiang-Huai valley, Heavy rainfall vortex

1 引言

气候变化是全球变化研究中的重要内容和核心问题,它给全球和中国的社会、经济以及环境带来重大影响,因此受到各国政府及民众越来越多的关注与重视,而气候模式对于气候的模拟和预估,是气候变化研究中的重要工具之一。由于气候具有明显的区域性特征,而全球环流模式在模拟区域气候方面虽具有一定的模拟能力,但因其分辨率较低尚存在较大的不确定性,因此 20 世纪 90 年代以来区域气候模式迅速发展起来且得到了较为广泛的应用,现在已经成为气候研究和业务预报的重要工具(Gao et al., 2001; 鞠丽霞和王会军, 2006; Yu et al., 2010)。相比全球气候模式,区域气候模式对区域气候模拟表现出了明显的优势(Liang et al., 2001; Patricola and Cook, 2007; 张冬峰和石英, 2012)。李巧萍和丁一汇(2004)的研究结果表明 RegCM (Regional Climate Model) 对我国北方长期的干旱气候态有一定的模拟能力;很多学者又利用了 RegCM2 (version 2.0)、RegCM3 和 RegCM4 等区域气候模式对我国气候进行了数值实验,研究结果表明模式对温度和降水均有一定的模拟能力,能较

好地模拟它们的空间分布特征及时间变化趋势(Gao et al., 2002; 高学杰等, 2003, 2006; 石英等, 2010; 廉丽姝和束炯, 2007; 翟颖佳和李耀辉, 2013); Gao et al. (2013) 利用 RegCM4 嵌套 BCC_CSM1.1 模式对 21 世纪中国地区气候变化进行了预估,结果表明 RCP8.5 (Representative Concentration Pathways, 简称 RCP) 情景下增温较 RCP4.5 更加明显,而在降水方面两个模式的结果则不同。

可见,已有研究工作大部分都是对区域气候模式产品的模拟效果进行评估以及对未来气候变化进行预估,主要集中在温度和降水两个要素,而在全球气候变暖的大背景下,中小尺度天气系统对气候变化也会有明显响应,例如在维持时间、伸展高度、空间范围、平均强度、发生频率、发生区域和雨带配置等方面都有所响应;而梅汛期暴雨是夏季影响中国长江中下游地区的主要气象灾害之一,由于中尺度涡旋与暴雨密切相关(Sun et al., 2010),因此中尺度低涡是梅雨暴雨的主要中尺度天气系统之一(苗春生等, 2014a, 2014b)。对长江流域梅汛期暴雨及暴雨低涡的研究一直是我国气象工作者关心和研究的重点(高坤和徐亚梅, 2001; 孙建华等, 2004; 郭蕊等, 2013)。如杨引明等(2010)

和沈杭锋等(2013)对长江下游的中尺度低涡活动进行了统计与普查,分析了低涡背景大尺度环境场及低涡与环境系统的关系;张敬萍等(2015)对夏季长江流域两类中尺度涡旋进行了统计与合成研究,结果表明,与长江上游西南低涡相比,江淮大别山低涡多发生在6月,垂直伸展高度更浅薄,引发降水更强;更多的研究是对江淮暴雨低涡的结构分析与动力机制的诊断(董佩明和赵思雄, 2004; 李博和赵思雄, 2009; 周玉淑和李博, 2010; 傅慎明等, 2012; 张元春等, 2013)。因此结合区域气候模式考虑不同温室排放情景的影响,分析未来中国汛期江淮暴雨低涡的特征变化是有待开展的研究内容。

因此,本文是基于一个区域气候模式 RegCM4 的气候变化模拟和预估结果(Gao et al., 2013),进行了 RCP8.5 与 RCP4.5 两种温室排放情景对江淮暴雨低涡特征影响效果的分析研究。在检验模式对低涡模拟能力的基础上,探讨未来两种温室排放情景下 2020~2030 年汛期江淮暴雨低涡的特征变化。

2 资料与方法

温室气体排放情景,是对未来气候变化预估的基础。本文采用新一代情景“典型浓度路径”中 RCP8.5 与 RCP4.5 两种情景(van Vuuren et al., 2011a, 2011b; 王绍武等, 2012): RCP8.5 情景是 2100 年辐射强迫上升至 8.5 W m^{-2} , 这是最高的温室气体排放情景。这个情景假定人口多、技术革新率不高、能源改善缓慢,导致长时间高能源需求及高温室气体排放,而缺少应对气候变化的政策; RCP4.5 情景是 2100 年辐射强迫稳定在 4.5 W m^{-2} 。考虑了与全球经济框架相适应的,长期存在的全球温室气体和生存期短的物质排放,采用低端排放基准和中等减缓措施。

文中江淮汛期指的是江淮地区($28^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $111^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$)的 5~7 月,所用模式资料为区域气候模式 RegCM4 产品,水平分辨率为 $50 \text{ km}\times 50 \text{ km}$,垂直方向 11 层。该模式模拟范围覆盖整个中国及周边地区,模式边界条件采用单项嵌套 BCC_CSM1.1 全球气候系统模式获得。本研究中所使用的时段分别为 1995~2005 年(当代),其温室排放状况为同时期观测的温室气体状态;以及 2020~2030 年(未来),温室排放状况为 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景。用于检验模式对当代气候模

拟能力的资料为欧洲中心 ERA-interim 1995~2005 年的再分析资料(当代观测)。

低涡的识别是在研究区域内,对欧洲中心 ERA-interim 再分析资料以及 RegCM4 模拟产品进行地面至 500 hPa 各高度层流场分析,对绘制的各层流场图,依据是否有闭合的气旋式环流,判断和识别低涡,在识别出的低涡范围内若出现暴雨[$>50 \text{ mm (24 h)}^{-1}$],则视为暴雨低涡。低涡中心通过对 925~500 hPa 各层中闭合流线最大外圈所在层的中心来确定;低涡垂直尺度以闭合环流发生的最高高度层来确定,即若 500 hPa 层上可见闭合环流则判断低涡的垂直尺度为 500 hPa(深厚);起始识别出涡旋的时间即为低涡出现的时间。

3 汛期江淮地区背景要素特征及情景趋势

本研究主要分为两个时段,历史检验时段为 1995~2005 年,未来情景时段为 2020~2030 年。为了给出汛期江淮地区背景要素的定性变化趋势,本文将温度、湿度、风速和降水分别对两个研究时段进行时间平均并在研究区域内进行区域平均得到以下结果。

从图 1a 中的温度图中可以看出,在历史时段内,垂直方向上在 150 hPa 以下各层,模式模拟的温度都比观测温度偏小,且随着高度的增加,模拟的温度与观测温度的差距越来越大。而在未来时段内,两种情景预估的平均温度比模式模拟的历史时段的平均温度均有所增加,并且 RCP8.5 情景下的增温大于 RCP4.5 情景下的增温(图 1b)。在对流层低层水汽含量较大的区域,模式对历史时段湿度的模拟与观测资料的结果很相近,仅在 700 hPa 以上模拟结果较实况偏小(图 1c)。而从图 1d 的偏差图中可以看出,未来两种情景下湿度都相对历史时段有所增加,且 RCP8.5 情景相较 RCP4.5 情景增湿更明显,尤其是在对流层低层。

从表 1 中可以看出 RegCM4 模式对江淮地区汛期近地面平均风速及总降水量的总体模拟效果及预估未来的总体趋势。从平均风速来看,模式在历史时段对江淮地区近地面平均风速的模拟结果是偏大的,而在未来温室排放增加、温度升高的情况下,近地面风速也有着相应的增大,且 RCP8.5 情景下的增幅略大于 RCP4.5。从降水方面来看,模式在历史时段对江淮地区降水的模拟结果是偏小的,

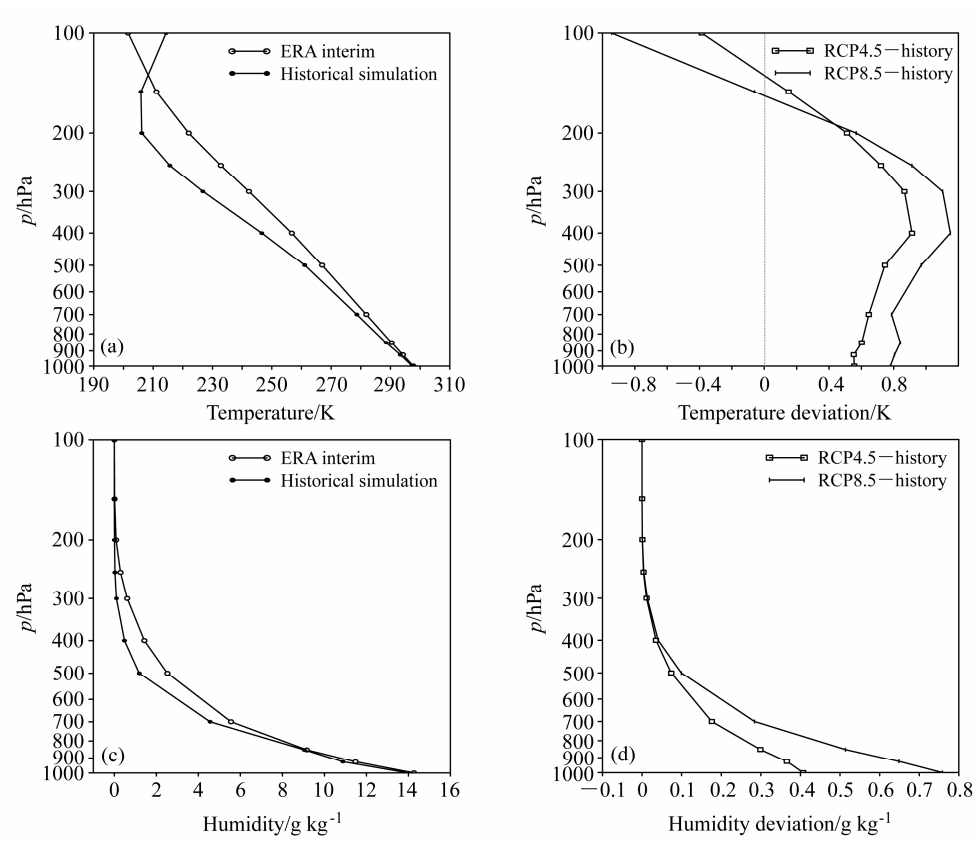


图 1 1995~2005 年当代观测与模式模拟 (a) 温度 (单位: K) 和 (c) 湿度 (单位: g kg^{-1}) 的垂直分布, 2020~2030 年末两种情景与历史时段模拟 (b) 温度差值 (单位: K) 和 (d) 湿度差值 (单位: g kg^{-1}) 的垂直分布

Fig. 1 Vertical section of observed (ERA-Interim) and simulated (Historical simulation) (a) temperature (units: K) and (c) humidity (units: g kg^{-1}) during 1990–2005; vertical sections of differences between forecasted (2020–2030, under two emissions scenarios) and historical (1995–2005) (b) temperature (units: K) and (d) humidity (units: g kg^{-1})

而在未来两种情景下, 降水量较历史时段的模拟结果都有所增加, 但 RCP4.5 情景下的模式预估结果降水量增大显著, 这与前面几个要素的变化并不完全一致, 说明并不是随着温度、湿度以及风速的增加程度越大, 降水量的变化量也越大, 从而也说明了降水量变化的复杂性。

表 1 不同时段汛期江淮地区平均降水量与风速

Table 1 Average precipitation and average wind velocity in Jiang-Huai valley in different periods

情景与时段	背景要素	
	汛期总降水量/mm	平均风速/ m s^{-1}
ERA (观测) 1995~2005 年	713.97	3.43
历史时段 (模拟) 1995~2005 年	705.48	3.86
RCP4.5 (预估) 2020~2030 年	792.53	4.20
RCP8.5 (预估) 2020~2030 年	729.19	4.23

由上可见, 历史时段模式模拟的结果与观测较为相近, 说明模式对温度、湿度、风速及降水量具

有一定的模拟能力。而对未来两种情景来说, 温度、湿度及近地面风速均有所增加, 且 RCP8.5 情景相对 RCP4.5 情景下的增幅更加明显。而降水在未来两种情景下均有增加, 但增加幅度不同。关于低涡暴雨增加幅度, 以及江淮低涡其它特征变化将在后文第 5 节中分析讨论。

4 RegCM4 模式对历史汛期江淮暴雨低涡的模拟检验

本节将对 RegCM4 模拟结果和观测资料 (ERA-interim) 中 1995~2005 年汛期江淮地区低涡的一些基本统计特征以及结构特征分别进行对比分析, 从而检验 RegCM4 模式对汛期江淮暴雨低涡的模拟能力。

4.1 统计特征对比

统计结果表明, 观测资料在 11 年中出现了 51 个低涡, 而模式模拟结果则出现了 39 个, 可见模

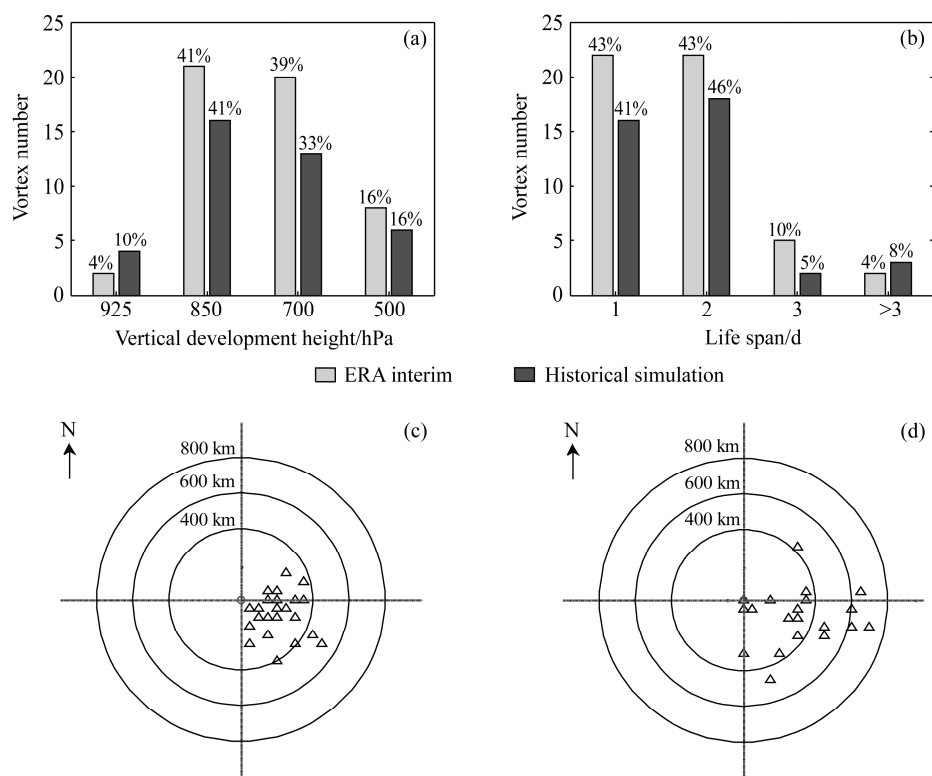


图2 1995~2005年汛期江淮地区低涡 (a) 发展高度 (单位: hPa)、(b) 生命期 (单位: d), (a、b) 中百分比为各项占低涡总数的比例; 低涡暴雨区中心相对低涡中心的位置和距离示意图: (c) 当代观测、(d) 模式模拟

Fig. 2 The (a) vertical development height (units: hPa) and (b) life span (units: d) of the low vortex in Jiang-Huai valley during the historical period (the percentage refers to the proportion relative to the total number of vortexes), and the rainstorm position relative to the center of the low vortex in the (c) observation and (d) simulated results

式模拟出的低涡较观测偏少。从低涡的发展高度来看 (图 2a), 观测资料和模式模拟结果中低涡发展到 700 hPa 及以下的低涡比例都为 84%, 而发展到 500 hPa 的只有 16%。说明虽然模式模拟的低涡个数比观测少, 但是在低涡发展高度方面, 各高度层低涡个数占低涡总数的百分比相差不大, 说明江淮地区汛期中尺度低涡大多数为浅薄低涡。同时从低涡的生命期来看 (图 2b), 观测资料和模式模拟的低涡生命期在 2 d 以内的分别占 86% 和 87%, 说明汛期江淮地区的低涡系统主要表现为生命期较短的低涡活动。

1995~2005 年汛期, 观测出现暴雨的比例达到 49%, 而模式模拟结果中此比例为 54%。虽然模式模拟的总低涡数和暴雨数都比观测资料的结果要小, 但是出现暴雨的比例却略高于观测资料, 而两种资料的结果得出的暴雨比例都在 50% 左右, 说明低涡的发生发展跟暴雨的关系是非常密切的。那么就低涡暴雨发生的位置 (图 2c、d) 而言, 虽然每

个低涡暴雨发生的位置、距离低涡中心的位置不尽相同, 但是暴雨区主要发生在低涡的东侧, 尤其是东南侧。统计结果显示观测资料统计出的暴雨区中心更加密集, 贴近于低涡中心, 大部分在距离低涡中心 400 km 的范围内, 而模拟结果显示的暴雨区中心则相对离散。

从上面的分析可以看出, 低涡的发生发展跟暴雨的关系非常密切, 正确分析和认识汛期暴雨低涡结构特征, 对于了解低涡暴雨变化趋势具有重要意义。

4.2 结构特征对比

为了进一步研究汛期江淮暴雨低涡的平均结构特征, 本文将出现暴雨的低涡进行了进一步挑选和动态合成, 以每个涡旋发展最强盛的日期选为该涡旋合成时刻, 并以涡旋中心为合成中心, 东西各 6 个经度, 南北各 6 个纬度作为合成范围, 以合成后的涡旋作为 11 年平均的结果来讨论其平均结构特征。下面对观测与模拟的两种资料的低涡合成结

果进行对比分析。

4.2.1 流场和涡度场

对比两种资料合成后各层的流场(图3)可以看出,700 hPa及以下各层上均有明显的气旋性环流中心,对应合成得到的中尺度暴雨低涡,且低涡自下而上逐渐向北倾斜,到500 hPa涡旋已消失,对应对流层中层为一致的平直西风,由此可见这种汛期暴雨低涡是对流层中低层的系统,较浅薄。虽

然两者在850 hPa和925 hPa的结果较为相似,但在700 hPa上实际合成的低涡纬向范围较大,而模式模拟的低涡纬向范围较观测的偏小。

涡度场与流场上气旋性环流相配合的有正涡度中心(图4a、b),两者在700 hPa及以下低涡中心附近均有正涡度中心,而观测资料的正涡度中心相对低涡中心更偏东,且模式模拟的低涡强度比观测的低涡偏强。从垂直分布图(图5a)中可以看出

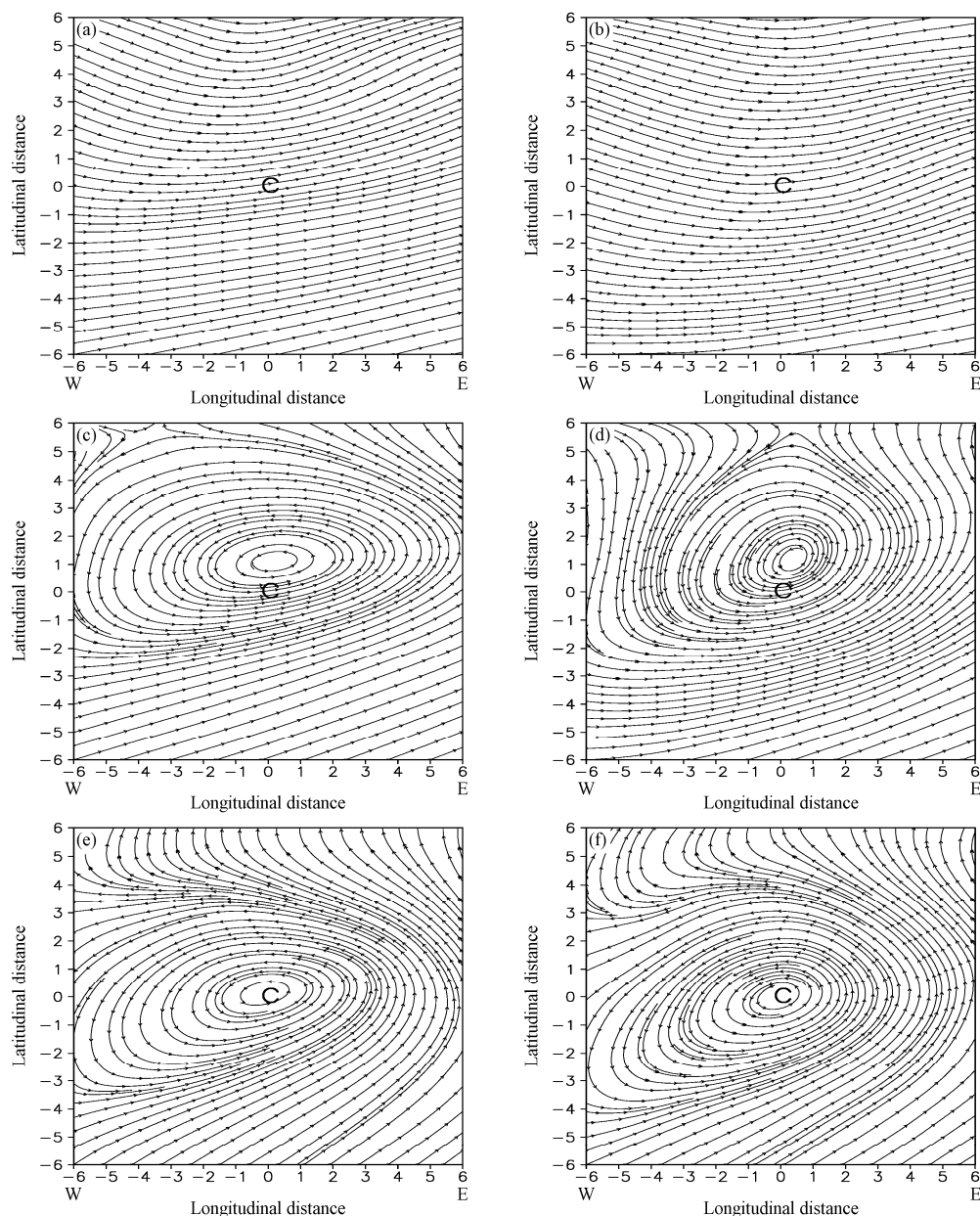


图3 观测(左列)和模式模拟(右列)的多年平均的(a、b)500 hPa、(c、d)700 hPa及(e、f)850 hPa合成流场,“C”为850hPa层合成低涡中心,下同。横坐标为距低涡中心的纬向的经度(单位:°),纵坐标为距低涡中心的经向的纬度(单位:°)

Fig. 3 Dynamic synthesis of the stream fields at (a, b) 500 hPa, (c, d) 700 hPa, and (e, f) 850 hPa from the (a, c, e) observation and (b, d, f) simulation results, on average [the ‘C’ indicates the center of the vortex at 850 hPa, the same below; x-axis: zonal longitudes (units: longitudes); y-axis: meridional latitudes (units: latitudes)]

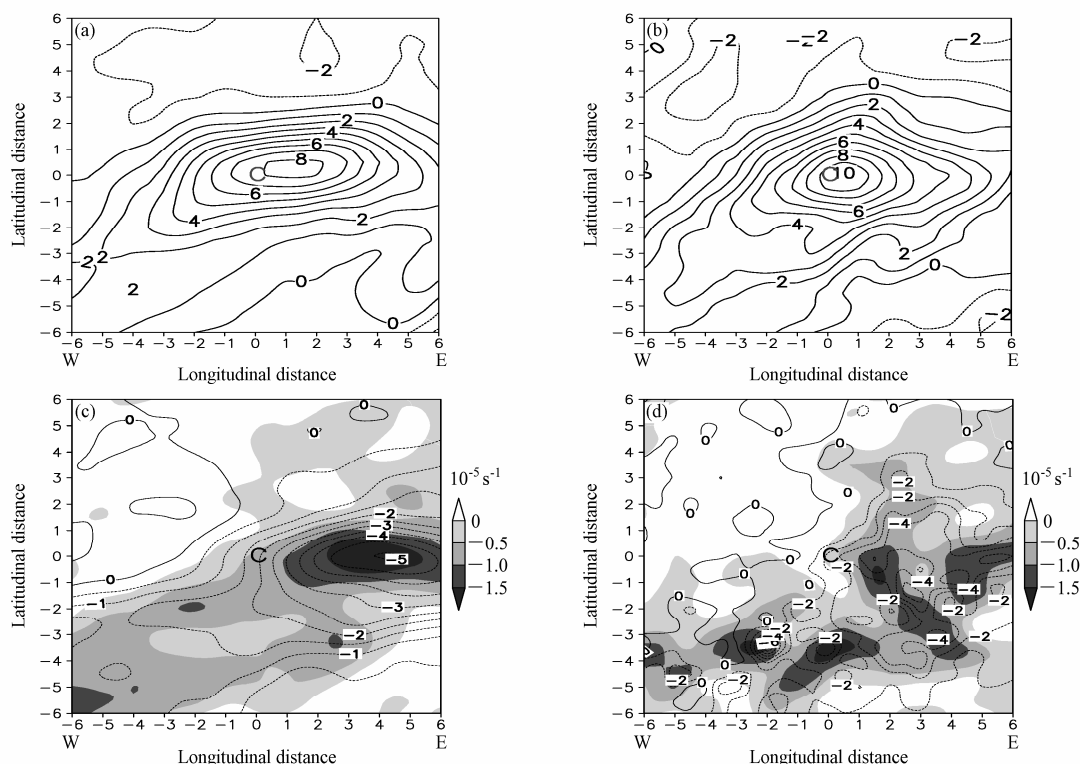


图4 (a、b)合成850 hPa涡度场(单位: 10^{-5} s^{-1}), (c、d)850 hPa辐合场(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})和500 hPa垂直速度场(等值线, 单位: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$): (a、c)当代观测; (b、d)模式模拟

Fig. 4 Dynamic synthesis of (a, b) vorticity fields at 850 hPa (units: 10^{-5} s^{-1}) and (c, d) convergence fields at 850 hPa (shading; units: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity at 500 hPa (contours; units: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$): (a, c) Observation; (b, d) simulation

合成低涡在对流层低层对应的是正涡度区和辐合区, 观测低涡的低层正涡度最大值出现在700 hPa, 而模式模拟的结果则出现在850 hPa, 比观测偏低。两者均在400 hPa以上转为负涡度, 而观测低涡的负涡度最大值强于模式模拟低涡的负涡度最大值。

4.2.2 散度和垂直速度场

对于合成散度和垂直速度场(图4c、d), 在对流层低层700 hPa及以下, 辐合区位于低涡中心东侧及东南侧, 500 hPa垂直上升运动区也与辐合中心相对应; 而500 hPa及以上, 低涡中心上空及东侧则表现为辐散, 200 hPa更强(图略), 这种低层辐合高层辐散的配置以及强上升运动有利于降水的产生, 与降水产生在低涡东侧相对应。而模式模拟的辐合中心与垂直上升运动大值中心相对观测结果都较为离散, 这也解释了模式模拟的暴雨中心相对低涡中心的位置较为离散, 距离更远。

从散度场的垂直分布(图5b)来看, 观测资料的无辐散层大约位于400 hPa左右, 高层则转为较强的辐散, 辐散最大值出现在200 hPa以上; 而模式模拟结果显示低涡的无辐散层大约位于500 hPa,

高层转为强辐散, 最大值位于300 hPa左右, 且图中显示观测资料的低层辐合略小于模式模拟结果, 而高层辐散情况则相反。

4.2.3 温度与湿度场

对温度场的结构采用对空间平均值求离差的方法来讨论(图6a、b), 具体做法是在合成范围内, 求出通过低涡中心附近的纬向剖面上相应经向上的平均值, 再求出纬向剖面上各点值对此值的偏差。

图6显示, 两种资料结果都表现为低涡附近700 hPa以下是冷空气堆, 之上到200 hPa都为暖性结构, 这说明合成的暴雨低涡具有上暖下冷的结构, 但模拟的低涡暖中心所在高度比观测偏低。从850 hPa温湿场的分布来看(图略), 暴雨低涡的东南侧是一东北—西南走向的暖湿气流带, 而北侧地区有一干冷空气自东北向西南; 温度场上, 梅雨锋锋区和低压区有一条等温线较密集的弱锋区, 湿度场上则为高湿区并且南北湿度的水平梯度较大, 两种资料的结果整体较为相似。

4.2.4 高低空急流

从高低空急流分布表(表2)中可以看到对流

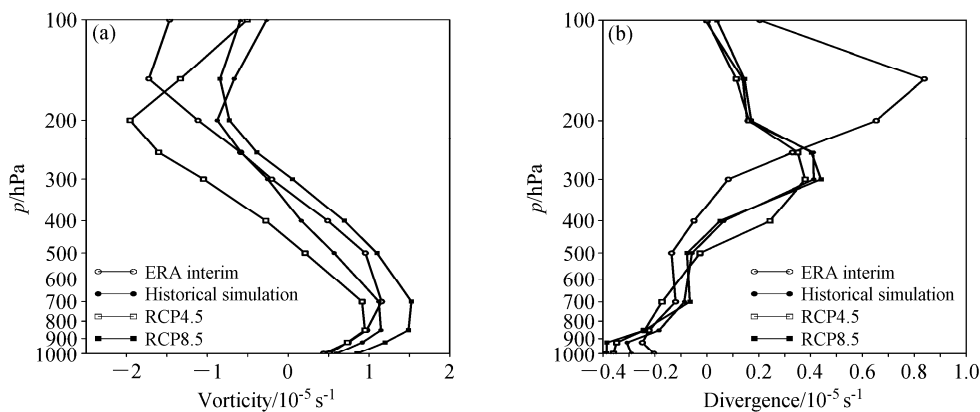


图 5 低涡附近 (a) 涡度和 (b) 散度区域平均的垂直分布 (单位: 10^{-5} s^{-1})
Fig. 5 Vertical profiles of the (a) vorticity and (b) divergence averaged in the domain near the vortex (units: 10^{-5} s^{-1})

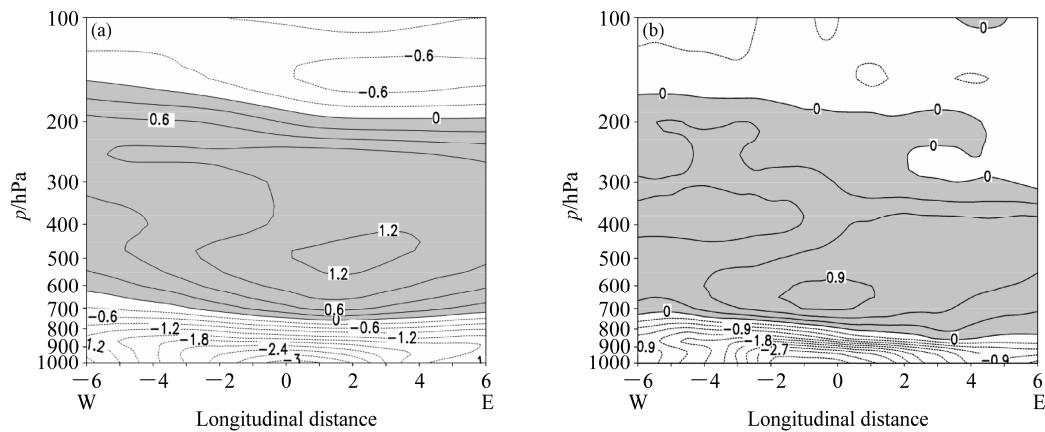


图 6 温度偏差纬向垂直剖面图 (单位: K) (阴影区为正值区): (a) 当代观测; (b) 模式模拟
Fig. 6 The zonal vertical cross section of the temperature deviation (units: K) (shaded area is positive): (a) observation; (b) simulation

层低层低涡的东南侧有一条东北—西南走向的西南风大风速带,合成风速在 8 m s^{-1} 以上,该低空西南急流左侧气旋式切变对低涡及暴雨的发生发展具有重要的增强作用。同时观测的最大风速达 10 m s^{-1} ,模拟的最大风速则达到了 14 m s^{-1} ,比观测结果略偏大;在对流层高层存在近乎东西向的极大风速带,实况低涡中心北侧则存在大于 32 m s^{-1} 的急流,且大风速范围比模式模拟结果向南扩展更大。高空急流右侧的反气旋辐散流场,有利于低涡中的上升运动以及低涡的维持。

通过上述分析来看,RegCM4 区域气候模式在低涡统计和结构特征方面都具有一定的模拟能力;虽然有一些偏差,但在合理范围内,因此考虑模式偏差随时间平移,模式对未来不同情景的预估数据也具有相同的可信度。所以,下文将对预估数据进行分析,了解两种情景下 2020~2030 年汛期江淮

暴雨低涡的特征。

表 2 低涡附近高低空急流分布情况

Table 2 The distribution of the upper-level and low-level jets over the vortexes

情景与时段	200 hPa 高空急流 (中心强度值)	850 hPa 低空急流 (中心强度值)
ERA (观测) 1995~2005 年	低涡北侧 $>32 \text{ m s}^{-1}$	低涡东南侧 10 m s^{-1}
历史时段 (模拟) 1995~2005 年	低涡北侧 $>20 \text{ m s}^{-1}$	低涡东南侧 14 m s^{-1}
RCP4.5 (预估) 2020~2030 年	低涡西北侧 $>32 \text{ m s}^{-1}$	低涡东南侧 12 m s^{-1}
RCP8.5 (预估) 2020~2030 年	研究范围内无 $>20 \text{ m s}^{-1}$ 的急流	低涡东南侧 14 m s^{-1}

5 未来两种温室排放情景下汛期江淮暴雨低涡特征预估

5.1 统计特征预估

利用 RegCM4 模式未来 2020~2030 年两种情

景 (RCP4.5 和 RCP8.5) 的预估资料对江淮地区汛期 (5~7 月) 出现的低涡进行统计, 结果表明: RCP4.5 情景下低涡出现 46 个, 而 RCP8.5 情景下低涡出现 51 个, 相对于模式对历史时段模拟的低涡个数都有所增加, 且 RCP8.5 情景则增加的更多, 根据上一章的讨论, 我们认为模式对未来 11 年内江淮汛期低涡个数的预估仍是偏少的。

从未来低涡的发展高度来看 (图 7a), 低涡在 700 hPa 及以下的个数仍然达到 90% 左右, 说明未来两种情景下的低涡仍然是以浅薄系统为主。同历史时段的模拟结果对比可知, RCP4.5 情景下, 925 hPa 及 850 hPa 的低涡所占比例有所增加, 尤其是在 850 hPa 层次上, 增长了 11%, 而在 700 hPa 和 500 hPa 层次上低涡所占比例有所下降; 但在 RCP8.5 情景下, 只有 700 hPa 层次低涡比例有所增加, 且增幅达到 14%, 而在 850 hPa 和 925 hPa 低涡比例明显减少, 500 hPa 层次低涡比例保持不变。说明在 RCP4.5 情景下, 低涡发展高度以 850 hPa 为主, 而在 RCP8.5 情景下低涡发展高度则相对较高, 以 700 hPa 为主。而从图 7b 来看, RCP4.5 情

景下低涡生命期在 3 d 及以上的比例同历史时段模式模拟的低涡生命期相同, 说明在这种排放情景下, 低涡仍以 2 d 内的短生命期为主; 而在 RCP8.5 排放情景下, 低涡生命期达到 3 d 的比例明显增加, 从历史时段的 5% 增加到了 27.5%, 从而说明 RCP8.5 排放情景下低涡的生命期有一定程度的延长。

从低涡暴雨方面来看, 虽然未来情景下低涡的总数有所增加, 但是出现暴雨的低涡比例却有所减少, 尤其是 RCP4.5 情景下, 低涡暴雨比例较历史模拟结果减少了一半以上, 说明随着温室气体排放量的增加, 低涡暴雨出现的比例并没有增加。再从暴雨位置的分布 (图 7c、d) 来看, RCP4.5 情景下, 暴雨低涡出现的个数虽然很少, 但暴雨落区仍然在低涡中心的东部尤其是东南部, 而其暴雨中心出现的位置非常离散, 且距低涡中心 400 km 以外的低涡达 50%, 最远可达 800 km; 在 RCP8.5 情景下, 除个别暴雨位于低涡西南部, 其它暴雨落区都在低涡中心的东部, 而暴雨中心的分布相对于历史时段模拟结果和 RCP4.5 结果都更加紧凑集中, 且大部分都位于距低涡中心 400 km 以内的位置, 暴雨低

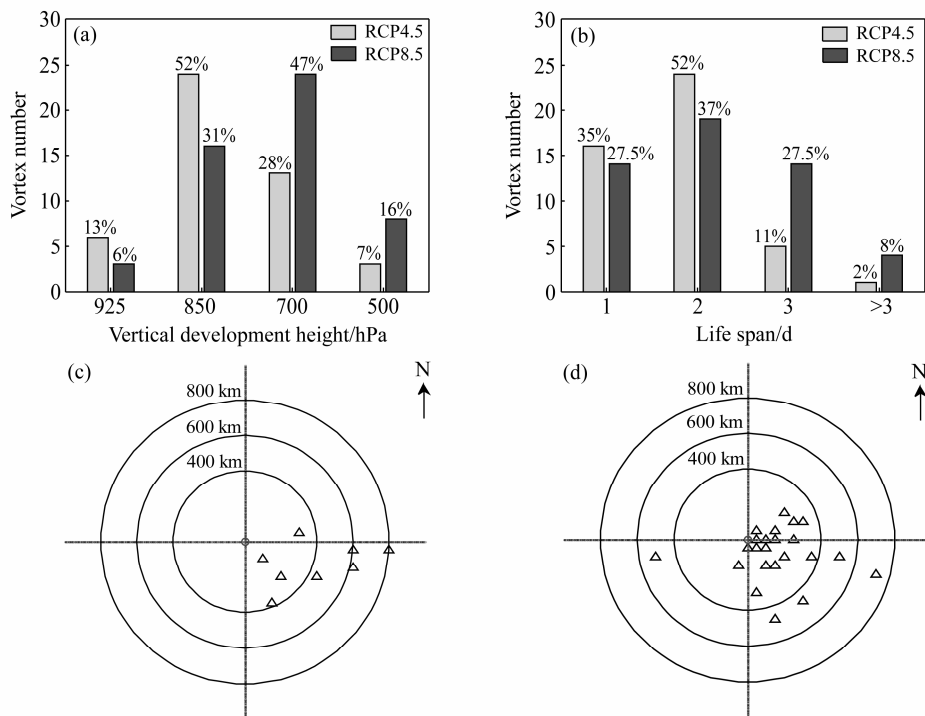


图 7 2020~2030 年汛期江淮地区低涡 (a) 发展高度 (单位: hPa)、(b) 生命期 (单位: d), (a、b) 中百分比为各项占低涡总数的比例。低涡暴雨雨区中心相对低涡中心的位置和距离示意图: (c) RCP4.5; (d) RCP8.5

Fig. 7 (a) The vertical development height (units: hPa) and (b) the life span (units: d) of the low vortexes in the Jiang-Huai valley during the years 2020–2030 (the percentage is the proportion relative to the total number of low vortexes), and the rainstorm position relative to the center of the low vortexes under emissions scenarios (c) RCP4.5 and (d) RCP8.5

涡数量较 RCP4.5 增多。

5.2 暴雨低涡的结构特征预估

为了进一步预估未来情景下汛期江淮暴雨低涡的结构特征,将两种情景下的暴雨低涡同样进行动态合成。

5.2.1 流场和涡度场

两种情景下的流场特征如图 8 所示,两种情景的流场图差别较大,RCP4.5 情景下,只有在 850 hPa 才有明显的闭合涡旋,而 RCP8.5 情景下在 850 hPa 和 700 hPa 上都有明显的闭合涡旋,且低涡的范围较 RCP4.5 排放情景更大。到达 500 hPa 层次涡旋已

经消散,在 RCP4.5 情景下表现为近乎平直西风,而 RCP8.5 情景下则表现为弱槽结构,因此未来情景下的低涡仍为对流层中低层的结构。垂直方向上,低涡自下而上向北倾斜,且 RCP4.5 情景下的倾斜程度比 RCP8.5 情景下的倾斜程度更强。与历史时段的模拟结果相比,RCP4.5 情景下的低涡水平尺度略小,而 RCP8.5 情景下则略有增加。

从合成涡度场(图 9a、b)上来看,未来两种情景下与低涡中心相对应的正涡度中心位置相近,但强度差别较大,RCP4.5 情景下的涡度场强度相对历史模拟结果有所减弱,而高排放 RCP8.5 情景下

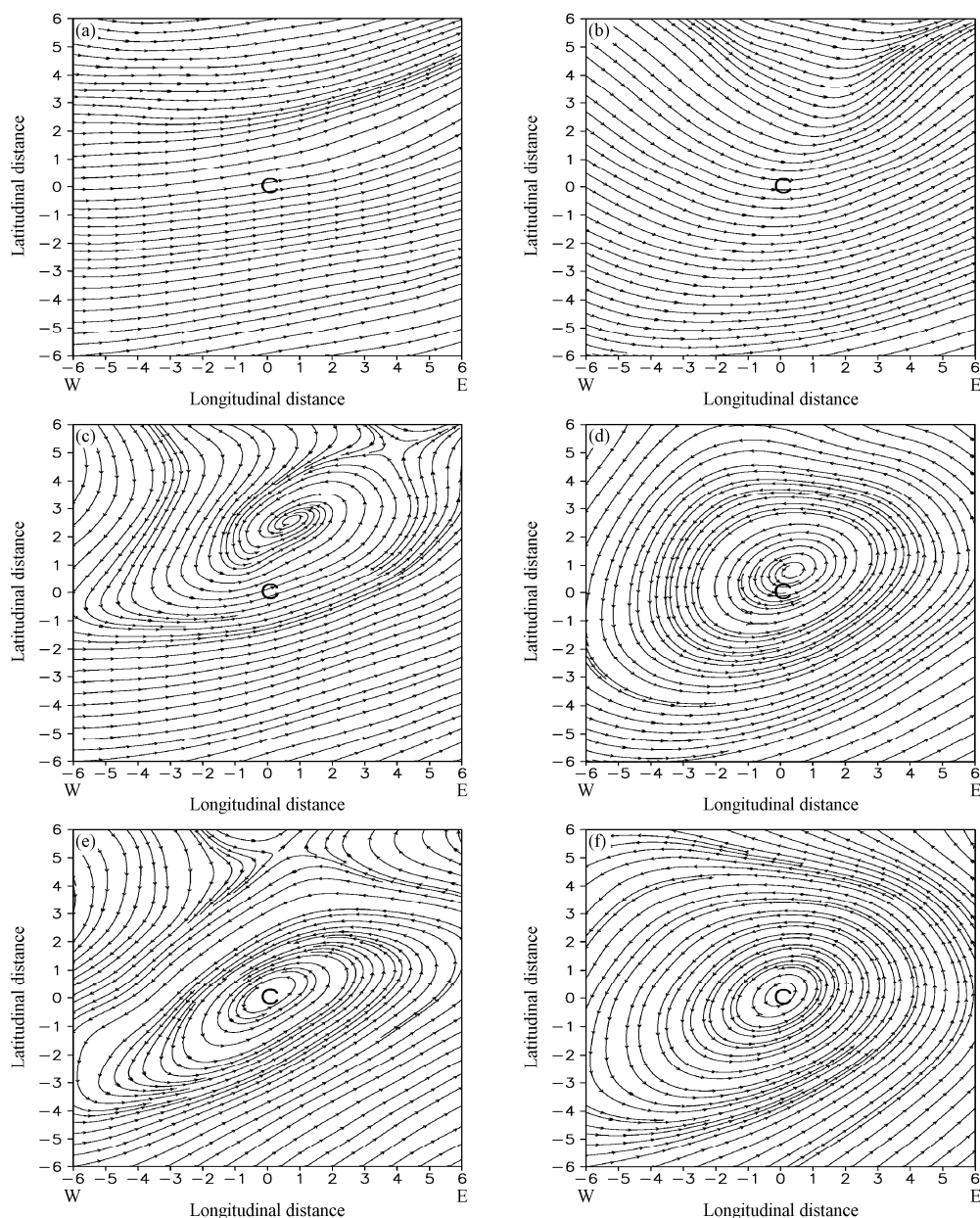


图 8 同图 3, 但为 RCP4.5 (左列) 和 RCP8.5 (右列)

Fig. 8 Same as Fig. 3, but for emissions scenarios RCP4.5 (left column) and RCP8.5 (right column)

则显著增强, 说明 RCP8.5 情景下的低涡强度比 RCP4.5 情景下的低涡强度更强。而在垂直方向上 (图 5a 中方形连线), RCP4.5 情景下 (空心方形线) 400 hPa 以下均为正涡度区, 而 RCP8.5 情景 (实心方形线) 正涡度区则达到了 300 hPa, 两种情景下的正涡度最大值都出现在 850~700 hPa, 这与历史时段的模拟结果相同, 但 RCP4.5 情景下各层涡度值均小于模式对历史时段的模拟结果, 而 RCP8.5 情景在 200 hPa 以下的层次涡度值均大于模式对历史时段的模拟结果, 说明在垂直方向上, RCP4.5 情景下低层正涡度区的强度有所减弱, 但是高层负涡度区的强度有所增强, 而 RCP8.5 情景的情况则刚好相反。

5.2.2 散度和垂直速度场

如图 9c、d 所示, 两种情景下对流层低层低涡中心及其东部和南部为强辐合区域, 强辐合中心位于低涡中心的东部, 而在高层 200 hPa 低涡中心附近则为强辐散区, 同时有垂直上升运动在此区与其配合, 这种配置同历史模拟的情况相似, 同样在低涡中心的东部有利于降水的产生。而 RCP4.5 情景下的低层辐合区域范围明显小于 RCP8.5 情景下低层辐合区, 且辐合强度也略小于 RCP8.5 情景 (图

略)。两者的垂直上升运动最大值较为接近, 达到 $-8 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$, 比模拟的历史结果有所增大。而且 RCP8.5 情景下散度大值中心的分布与历史模拟的结果相比相对集中, 因此降水中心分布也较历史时段稍集中些。在垂直方向上 (图 5b 中方形连线), RCP8.5 情景下 (实心方形线) 的低涡附近散度区域平均后的垂直分布与历史模拟的结果极为相近, 而 RCP4.5 情景下 (空心方形线) 则略有不同, 表现为 500 hPa 以下辐合偏弱, 400 hPa 辐散偏强, 之上近乎相同。

5.2.3 温、湿场

温度离差与历史模拟的结果相似 (图 10a、b), 两种情景下 700 hPa 以下是冷空气堆, 之上到 250 hPa 都为暖性结构, 这说明未来情景下合成的低涡仍然具有上暖下冷的结构。相比历史的模拟结果, RCP4.5 情景下最大暖区高度与历史相近, 但强度增强; 而 RCP8.5 情景下的最大暖区则在 700~400 hPa 之间, 最大暖区厚度范围显著伸展。从温湿场来看 (图略), 两种情景下低涡东南侧为暖湿气流带, 而北侧则为干冷空气。与历史模拟结果对比, 未来情景下的对流层低涡附近温度梯度减小, 湿度梯度增大, 且湿度比历史时段的湿度也有所增大,

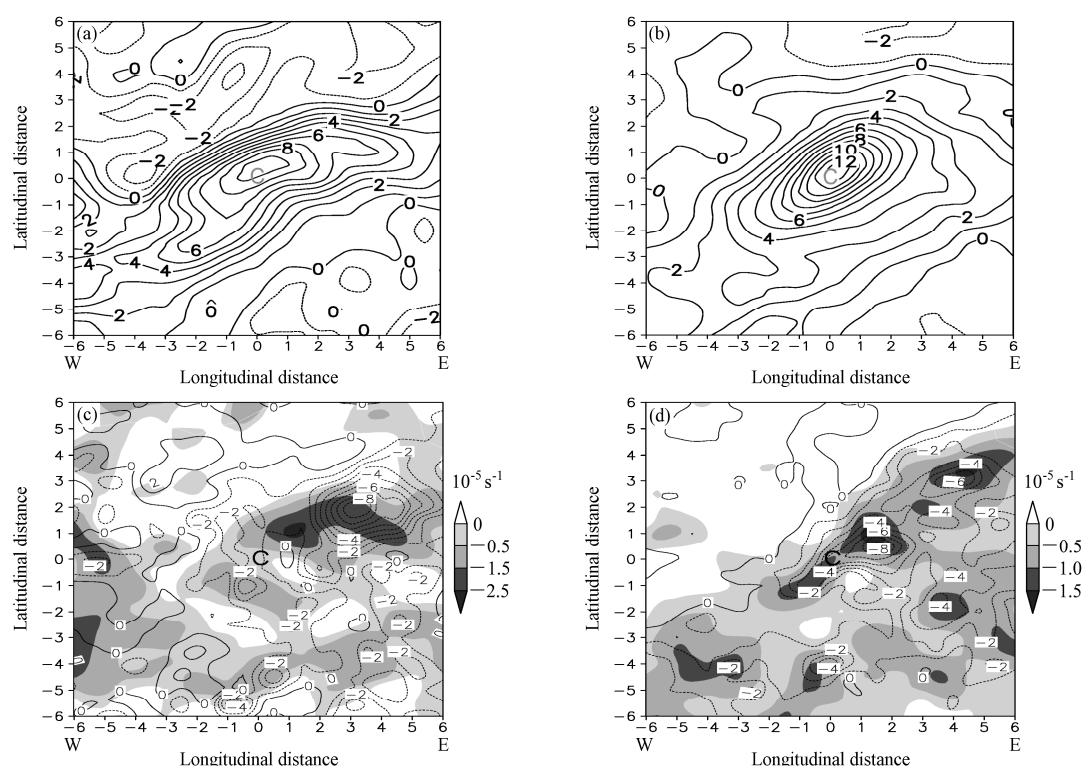


图 9 同图 4, 但为 (a、c) RCP4.5 和 (b、d) RCP8.5

Fig. 9 Same as Fig. 4, but for emissions scenarios (a, c) RCP4.5 and (b, d) RCP8.5

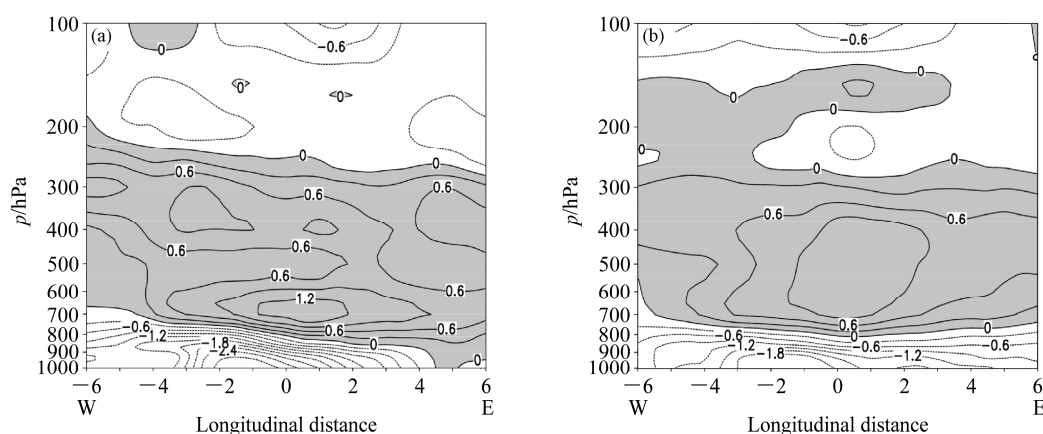


图 10 未来两种情景下温度偏差纬向垂直剖面图 (单位: K) (阴影区为正值区): (a) RCP4.5; (b) RCP8.5

Fig. 10 The zonal vertical cross sections of the temperature deviation (units: K) (shaded area is positive); under emissions scenarios (a) RCP4.5 and (b) RCP8.5

RCP8.5 情景比 RCP4.5 情景增大的更多。

5.2.4 高低空急流

从高低空急流分布表 (表 2 下面两行) 来看, 两种情景下低涡东南侧仍为低空西南风急流, 由于模式对低空急流模拟偏大, 未来低空急流的增幅应弱于预估值。而从 200 hPa 高空风速场上来看, 高空急流仍然在低涡北侧, 但是模式对高空急流模拟偏小, 因此未来高空急流的增幅应强于预估值。考虑高低空急流的总效果, RCP8.5 情景下低空西南风急流强于 RCP4.5 情景, 更有利于浅薄涡旋的增强。对于高空急流的预估, 无论 RCP4.5 情景还是 RCP8.5 情景, 高空西风急流增幅有限, 对低涡增强的作用基本维持类似历史状况。

显然, 高温温室气体排放下有低涡发生发展数量的增加, 但是在 RCP4.5 情景下伴随暴雨的低涡比例有明显的减少, 而 RCP8.5 情景下伴随暴雨的低涡比例减幅较小。值得注意的是, 更高的温室气体排放将促使伴随暴雨的低涡发展更剧烈, 因此对低涡暴雨灾害性天气发展趋势的研究有必要进一步深入, 对未来情景下灾害性低涡暴雨预报提供一定的参考。

6 结论与讨论

本文基于区域气候模式 RegCM4 的模拟与预估结果, 对 1995~2005 年汛期中国江淮地区的低涡进行气候变化的模拟检验与未来两种情景下 2020~2030 年的预估, 旨在给出两种温室气体排放情景下汛期江淮暴雨低涡的特征变化及其对比。结

果表明:

(1) RegCM4 模式对汛期江淮地区平均温度、湿度及风速等要素的模拟特点为: 模拟的温、湿要素均比观测略微偏低一些, 且随高度增加偏差有所增大, 而对风速的模拟则比观测偏大; 预估结果显示未来两个情景下各要素值均增大, 且温湿风的增大程度在 RCP8.5 情景下比 RCP4.5 情景更大, 汛期平均总降水量有增加, 但 RCP4.5 情景较 RCP8.5 更大些。

(2) 模式对汛期江淮低涡的模拟特点为: 无论从低涡统计方面还是低涡结构方面与观测均较为相似。虽然模拟的低涡总数偏少, 但是其统计特征的各项比例和暴雨低涡的结构及诊断量都相似与接近, 因此其模式模拟的暴雨低涡具有一定的可信度, 可作为未来情景分析基础。

(3) 未来两种情景下低涡统计特征为: 个数都有所增加, 但是产生暴雨的低涡比例却有所减少。RCP4.5 情景下, 暴雨落区仍然在低涡中心的东部尤其是东南部, 但暴雨中心出现的位置非常离散, 且距低涡中心 400 km 以外的低涡达 50%。RCP8.5 情景下, 除个别低涡位于低涡西南部, 其它低涡暴雨落区也都在低涡中心的东部, 而暴雨中心的分布相对于历史时段模拟结果和 RCP4.5 结果都更加紧凑集中, 且大部分都位于距低涡中心 400 km 以内的位置。

(4) 未来两种情景下低涡结构特征为: RCP4.5 情景下, 合成低涡发展高度以 850 hPa 为主, 生命期多为 2 d 以内短生命期, 强度减弱。而 RCP8.5

情景下, 暴雨低涡比例明显大于 RCP4.5 情景, 低涡发展高度以 700 hPa 为主, 较 RCP4.5 情景升高; 生命期达 3 d 的增多, 更长; 低涡涡度较 RCP4.5 强度明显增强, 其最大暖区厚度范围显著伸展。温度锋区减小而湿度锋区进一步增强, 近地面低涡低空西南风急流强于 RCP4.5 情景, 更有利于浅薄涡旋的增强。高空西风急流增幅有限, 对低涡增强的作用基本维持类似历史状况。因此 RCP8.5 较 RCP4.5 对暴雨低涡有更强的促发和增强效应。

综上所述, 在考虑模式不确定性基础上, RegCM4 模式的结果, 具有一定的合理性及预测性, 能够定性的给出未来情景下低涡的变化特征与变化趋势, 高排放将促使伴随暴雨的浅薄低涡发展更剧烈, 因此应进一步深化对低涡暴雨灾害性天气发展趋势的研究, 对未来情景下灾害性低涡暴雨预报提供一定的参考。此外, 模式的近期预估结果受自然变率影响较大, 自然变率信号可能会部分掩盖温室气体强迫, 因此后续的工作将针对更长气候时段进行温室气体排放对江淮暴雨低涡特征演变的影响研究。

致谢 感谢国家气候中心提供的利用 RegCM4 区域气候模式所进行的中国区域未来气候变化模拟结果。

参考文献 (References)

- 董佩明, 赵思雄. 2004. 引发梅雨锋暴雨的频发型中尺度低压 (扰动) 的诊断研究 [J]. 大气科学, 28 (6): 876–891. Dong Peiming, Zhao Sixiong. 2004. A diagnostic study of mesoscale lows (disturbances) on Meiyu front and associated heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 876–891, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.07.
- 傅慎明, 于翥, 王东海, 等. 2012. 2010 年梅雨期两类东移中尺度涡旋的对比研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (8): 1282–1300. Fu Shenming, Yu Fei, Wang Donghai, et al. 2013. A comparison of two kinds of eastward-moving mesoscale vortices during the Mei-yu period of 2010 [J]. Science China Earth Sciences, 56 (2): 282–300, doi:10.1007/s11430-012-4420-5.
- 高坤, 徐亚梅. 2001. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究 [J]. 大气科学, 25 (6): 740–756. Gao Kun, Xu Yamei. 2001. A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22–30 June 1999 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (6): 740–756, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.06.02.
- 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 2003. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II: 中国区域气候的可能变化 [J]. 气象学报, 61 (1): 29–38. Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. 2003. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. Part II: Climate change [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (1): 29–38, doi:10.11676/qxxb2003.004.
- 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验 [J]. 大气科学, 30 (2): 185–192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 185–192, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.02.01.
- Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. 2001. Climate Change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (6): 1224–1230, doi:10.1007/s00376-001-0036-y.
- Gao X J, Zhao Z C, Giorgi F. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (5): 927–942, doi:10.1007/s00376-002-0056-2.
- Gao X J, Wang M L, GIORGI F. 2013. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0 [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 6 (5): 381–386, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0029.
- 郭蕊, 苗春生, 张楠. 2013. 一次淮河流域梅雨锋暴雨的大别山地形敏感性试验 [J]. 大气科学学报, 36 (5): 626–634. Guo Rui, Miao Chunsheng, Zhang Nan. 2013. Sensitivity experiments of effects of Dabie mountains terrain on Meiyu front rainstorm over Huaihe River basin [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (5): 626–634, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.05.014.
- 鞠丽霞, 王会军. 2006. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候 [J]. 地球物理学报, 49: 52–60. Ju Lixia, Wang Huijun. 2006. Modern climate over East Asia simulated by a regional climate model nested in a global gridpoint general circulation model [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49 (1): 52–60, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.008.
- 李博, 赵思雄. 2009. 2007 年入梅期由横槽与低涡切变引发淮河流域强降水的诊断研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1148–1164. Li Bo, Zhao Sixiong. 2009. A study of heavy rainfall resulting from transversal trough and shear line-low vortex in the Huaihe River during the Meiyu onset of 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1148–1164, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.03.
- 李巧萍, 丁一汇. 2004. 区域气候模式对东亚季风和中国降水的多年模拟与性能检验 [J]. 气象学报, 62 (2): 140–153. Li Qiaoping, Ding Yihui. 2004. Multi-year simulation of the East Asian monsoon and precipitation in China using a regional climate model and evaluation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (2): 140–153, doi:10.11676/qxxb2004.016.
- 廉丽姝, 束炯. 2007. 区域气候模式对我国中、东部夏季气候的数值模拟 [J]. 热带气象报, 23 (2): 162–170. Lian Lishu, Shu Jiong. 2007. Numerical simulation of summer climate over center and East China using a regional climate model [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 23 (2): 162–170.
- Liang X Z, Kunkel K E, Samel A N. 2001. Development of a regional climate model for U.S. Midwest applications. Part I: Sensitivity to buffer zone treatment [J]. J. Climate, 14 (23): 4363–4378, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<4363:DOARCM>2.0.CO;2.
- 苗春生, 刘维鑫, 王坚红, 等. 2014a. 梅雨期经大别山两侧暴雨中尺度低涡对比分析 [J]. 高原气象, 33 (2): 394–406. Miao Chunsheng, Liu Weixin, Wang Jianhong. 2014b. Comparison between two rainstorm meso-scale vortices circumambulated respectively from two sides of

- mountain Dabieshan during Meiyu season [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 33 (2): 394–406, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00195.
- 苗春生, 吴旻, 王坚红, 等. 2014b. 一次浅薄低涡暴雨过程数值模拟及发展机制分析 [J]. 气象, 40 (1): 28–37. Miao Chunsheng, Wu Min, Wang Jianhong, et al. 2014a. Modeling of a shallow vortex heavy rainfall and analysis on its developing mechanism [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 40 (1): 28–37, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.004.
- Patricola C M, Cook K H. 2007. Dynamics of the West African monsoon under mid-Holocene precessional forcing: Regional climate model simulations [J]. J. Climate, 20(4): 694–716, doi:10.1175/JCLI4013.1.
- 沈杭锋, 翟国庆, 尹金方, 等. 2013. 长江下游梅汛期尺度度涡旋特征分析 [J]. 大气科学, 37 (4): 923–932. Shen Hangfeng, Zhai Guoqing, Yin Jinfang, et al. 2013. Feature analysis of mesoscale vortex over lower reaches of Yangtze River during Meiyu period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 923–932, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12075.
- 石英, 高学杰, 吴佳, 等. 2010. 华北地区未来气候变化的高分辨率数值模拟 [J]. 应用气象学报, 21 (5): 580–589. Shi Ying, Gao Xuejie, Wu Jia, et al. 2010. Simulating future climate changes over North China with a high resolution regional climate model [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (5): 580–589, doi:10.11898/1001-7313.20100507.
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2004. 2002 年 6 月 20~24 日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析 [J]. 气象学报, 62 (4): 423–438. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. An analysis on MCSs in Meiyu front during 20–24 June 2002 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 62 (4): 423–438, doi:10.11676/qxxb2004.043.
- Sun J H, Zhao S X, Xu G K, et al. 2010. Study on a mesoscale convective vortex causing heavy rainy rainfall during the Mei-yu season in 2003 [J]. Adv. Atmos. Sci., 27 (5): 1195–1209, doi:10.1007/s00376-009-9156-6.
- van Vuuren D P, Edmonds J A, Kainuma M, et al. 2011a. A special issue on the RCPs [J]. Climatic Change, 109: 1–4, doi:10.1007/s10584-011-0157-y.
- van Vuuren D P, Edmonds J A, Kainuma M, et al. 2011b. The representative concentration pathways: An overview [J]. Climatic Change, 109: 5–31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 2012. 新一代温室气体排放情景 [J]. 气候变化研究进展, 8 (4): 305–307. Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. 2012. New generation of scenarios of greenhouse gas emission [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 8 (4): 305–307, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.04.011.
- 杨引明, 谷文龙, 赵锐磊, 等. 2010. 长江下游梅雨期低涡统计分析 [J]. 应用气象学报, 21 (1): 11–18. Yang Yinming, Gu Wenlong, Zhao Ruilei, et al. 2010. The statistical analysis of low vortex during Meiyu season in the lower reaches of the Yangtze [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 21 (1): 11–18, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.002.
- Yu E T, Wang H J, Sun J Q. 2010. A quick report on a dynamical downscaling simulation over china using the nested model [J]. Atmos. Ocean Sci. Lett., 3: 325–329, doi:10.1080/16742834.2010.11446886.
- 翟颖佳, 李耀辉. 2013. 区域气候模式 RegCM4 对我国西北东部到华北地区 21 世纪中期气候变化的情景预估 [C]. 南京: 创新驱动发展提高气象灾害防御能力——S18 第四届研究生年会. Zhai Yingjia, Li Yaohui. 2013. Scenario prediction on the climate changes from the eastern part of Northwest China to North China during the mid 21st century by regional climate model RegCM4 [C]. Nanjing: The 4th Annual Meeting of Postgraduates, S8: Innovate, Drive, Develop and Improve the Ability of Defending Meteorological Disasters.
- 张冬峰, 石英. 2012. 区域气候模式 RegCM3 对华北地区未来气候变化的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 55 (9): 2854–2866. Zhang Dongfeng, Shi Ying. 2012. Numerical simulation of climate changes over North China by the RegCM3 model [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 55 (9): 2854–2866, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.005.
- 张敬萍, 傅慎明, 孙建华, 等. 2015. 夏季长江流域两类中尺度涡旋的统计与合成研究 [J]. 气候与环境研究, 23 (3): 319–336. Zhang Jingping, Fu Shenming, Sun Jianhua, et al. 2015. A statistical and compositional study on the two types of mesoscale vortices over the Yangtze River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (3): 319–336, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14164.
- 张元春, 孙建华, 徐广阔, 等. 2013. 江淮流域两次中尺度对流涡旋的结构特征研究 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 271–287. Zhang Yuanchun, Sun Jianhua, Xu Guangkuo, et al. 2013. Analysis on the structure of two mesoscale convective vortices over Yangtze–Huaihe River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 271–287, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11162.
- 周玉淑, 李柏. 2010. 2003 年 7 月 8~9 日江淮流域暴雨过程中涡旋的结构特征分析 [J]. 大气科学, 34 (3): 629–639. Zhou Yushu, Li Bai. 2010. Structural analyses of vortex causing torrential rain over the Changjiang–Huaihe River basin during 8 and 9 July 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 629–639, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.14.