

刘雪映,高山红.一次路径偏北南折的秋季江淮气旋成因分析[J].海洋气象学报,2018,38(1):17-26.
Liu Xueying, Gao Shanong. Analysis of an autumn Changjiang-Huaihe cyclone with a northeastward-to-southeastward track [J].
Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 17-26. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.003. (in Chinese)

一次路径偏北南折的秋季江淮气旋成因分析

刘雪映^{1,2},高山红^{1,2}

(中国海洋大学 1. 海洋与大气学院; 2. 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 2015年11月5—8日发生的一次江淮气旋具有与以往过程不同的特征, 发生时间晚、路径偏北东移、途经山东半岛后又南折, 导致山东半岛连续降水36 h, 降水时段内累积降水量最大接近50 mm。为揭示上述特点的成因, 利用FNL(Final Analysis Data of Global Forecast System)再分析数据进行了天气形势分析, 结果表明: 副热带高压位置偏北且强度较强是导致气旋过程发生时间偏晚、路径偏北东移的重要原因, 而副热带高压的异常变化与2015年强厄尔尼诺事件有很强的关联性。借助WRF(Weather Research and Forecasting)数值试验探究了气旋过程路径偏北又南折的原因, 发现: 1) 黄海的高海温有利于海面水汽通量向上输送, 积云对流加强, 潜热释放促进江淮气旋增强发展; 高空西南气流对增强气旋的控制较弱, 导致气旋没有一直向北移动, 中途发生南折。2) 黄海南部海温较北部偏高约4℃, 低空大气南、北部之间形成的能量锋区对江淮气旋的南折有指向作用; 同时对流层低层偏北风的存在以及副热带高压的短时南撤为气旋的南折提供了动力环境。

关键词: 江淮气旋; 秋季; 观测分析; WRF数值试验; 路径南折

中图分类号: P447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)01-0017-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.003

Analysis of an autumn Changjiang-Huaihe cyclone with a northeastward-to-southeastward track

LIU Xueying^{1,2}, GAO Shanong^{1,2}

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract A Changjiang-Huaihe cyclone, which occurred during 5–8 November 2015, is characterized by its later occurrence, northern location and northeastward-to-southeastward turning track. This cyclone led to heavy rains for 36 hours over Shandong Peninsula with maximum cumulative precipitation near 50 mm. Synoptic analysis of the cyclone is carried out in this study using the Final Analysis Data of Global Forecast System (FNL). It is revealed that the western Pacific subtropical high (WPSH), which is abnormally stronger and northern located, accounts for the cyclone's late occurrence and northern location, and that the anomalies of the WPSH are closely related to the strong El Niño event in 2015. To reveal the mechanism of the northeastward-to-southeastward track turning, a series of numerical experiments were conducted using the WRF (Weather Research and Forecasting) model. It is found that: 1) High sea surface temperature (SST) of the Yellow Sea (YS) is favorite for upward transportation of

收稿日期: 2017-11-08; 修订日期: 2017-12-24

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC1404200, 2017YFC1404100); 海洋公益性行业科研专项(201505007)

作者简介: 刘雪映, 女, 硕士, 主要从事江淮气旋、黄海海雾的演变机理及数值模拟研究, liuxueying1213@163.com。

通信作者: 高山红, 男, 教授, 主要从事海洋灾害天气的演变机理及数值模拟与预报技术的研究, gaosh@ouc.edu.cn。

water vapor flux, which enhances the cumulus convections, and intensifies cyclone by latent heat release. The southwesterly steering flow has little influence on the track of the intensified cyclone, which keep moving northward and turns southward midway. 2) Another important factor contributing to the track turning is the existence of the energy front over the YS, which is generated by the large SST gradient (SST in the southern YS is about 4 degrees higher than that in the northern YS). In addition, the north winds in the low and middle troposphere and the withdrawing of the WPSH also help the cyclone turn southward.

Key words Changjiang-huaihe cyclone; autumn; observational analysis; WRF numerical experiments; southward turning track

引言

江淮气旋是在淮河、长江中下游流域内发生,生命史在 12 h 以上,具有明显冷、暖锋结构的气旋系统^[1],经常伴随暴雨、大风等灾害性天气。

已有大量关于江淮气旋的统计研究结果。譬如,魏建苏等^[2]利用 49 a(1961—2009 年)的气象资料,统计分析了江淮气旋发生时间、强度变化与移动路径等方面的特点,给出了江淮气旋多年月平均发生频次(表 1)。由表 1 可见,江淮气旋在 4—6 月发生次数最多,秋季较少发生。刘佳颖^[3]研究指出,11 月江淮气旋常见移动路径偏东偏南(图 1),且生命期短暂,一般不超过 36 h。

表 1 1961—2009 年江淮气旋各月发生频次(信息引自魏建苏等^[2])

Table 1 Monthly occurrence numbers of Changjiang-Huaihe cyclone from 1961 to 2009 (from Wei J S et al.^[2])

月份	频次	百分比/%
1 月	35	4.9
2 月	58	8.1
3 月	71	9.9
4 月	108	15.0
5 月	106	14.7
6 月	107	14.9
7 月	74	10.3
8 月	53	7.4
9 月	39	5.4
10 月	20	2.8
11 月	29	4.0
12 月	19	2.6

2015 年 11 月 5—8 日,发生了一次江淮气旋过程,其生命期长达 63 h。由图 1 可见,与 11 月气旋常见移动路径(实线)相比,此次气旋的移动路径

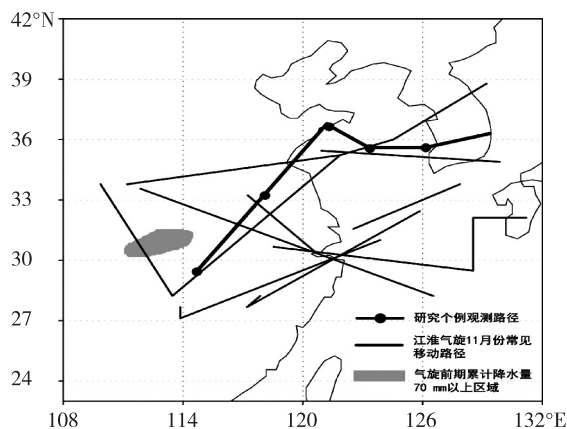


图 1 11 月江淮气旋常见移动路径(信息引自刘佳颖^[3])与研究个例观测路径

Fig.1 Usual tracks of Changjiang-Huaihe cyclone during November (from Liu J Y^[3]) and the study case track

(粗实线)明显偏北,而且经过山东半岛后气旋没有继续北上进入渤海,而是南折进入黄海并一直停留。由于气旋路径先北上后南折,使它影响山东半岛时间长达 36 h,给山东半岛带来了降水,降水时段为 6 日 02 时—7 日 14 时(北京时,下同),影响时段内累积降水量最大达 48 mm,图 2 阴影为累积降水量在 40 mm 以上的区域。

本文将以此次江淮气旋作为研究个例,拟首先分析它发生偏晚、路径偏北的原因,然后基于 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式开展数值试验,试图对其北—南折的移动路径进行具体解释。

1 天气背景分析

1.1 观测事实

2015 年 11 月 5—8 日在江淮地区发生的一次倒槽锋生型江淮气旋过程,其移动路径见图 1。根据 GTS(Global Telecommunications System) 站点观测数据得知此次气旋影响了包括山东半岛在内的多

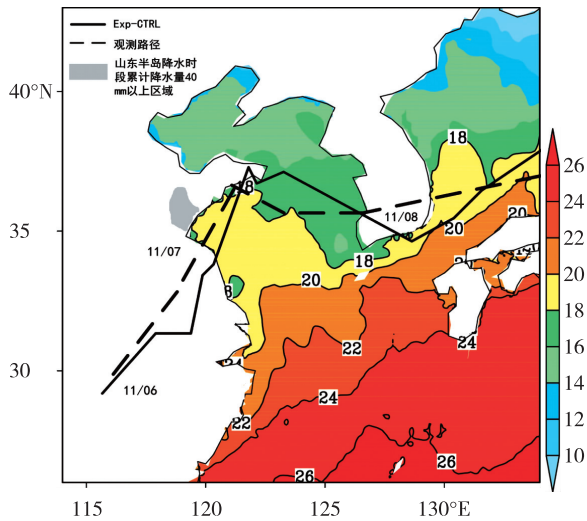


图 2 研究个例的观测路径与 Exp-CTRL 的模拟路径 (填充色为海温, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.2 Observed (dashed line) and simulated (Exp-CTRL, solid line) tracks of the studied cyclone, and sea surface temperatures (color shaded, units: $^{\circ}\text{C}$)

个省份并带来降水,影响范围广且降水强度偏高,前期(5日08时—6日08时)24 h降水量70 mm以上区域如图1阴影所示。

韩国气象局(Korea Meteorological Administration, KMA)提供的地面天气图(图略)显示,此次江淮气旋生成于11月的华中地区。其移动路径首先经过黄海偏北行进至山东半岛南部,后发生南折返回黄海(图2虚线),在黄海停留时间长达36 h。根据日本高知大学网站提供的卫星亮温数据^①以及NCEP(National Centers for Environmental Prediction)提供的全球FNL(Final Analysis Data of Global Forecast System)再分析数据得到江淮气旋在2015年11月7日00时将要发生南折时的卫星红外亮温图与1000 hPa(绿色实线)及500 hPa(蓝色实线)位势高度场(图3)。图3中,根据1000 hPa环流形势,气旋低压中心位于山东中东部,白色集中区域为气旋影响范围。由此看出,在气旋即将发生南折时,气旋经过山东半岛且影响范围较广,影响区域包括山东半岛东部大部分地区及黄海北部;同时500 hPa高度上5880 gpm等值线控制江淮地区,且向南偏折,为气旋下一步的南折提供引导作用。偏北南折的移动路径导致江淮气旋影响山东半岛时间较长,6日02时—7日14时持续降水,累积降水量最大达48 mm,降水量在40 mm以上的降水落区为图2阴影,与前期降水量相当。与魏建苏等^[2](表1)、刘佳颖^[3](图1)统计的江淮气旋气候特征

相比:此次江淮气旋的发生时间偏晚;同时移动路径较11月常见路径偏北约200 km,且中途发生南折现象。

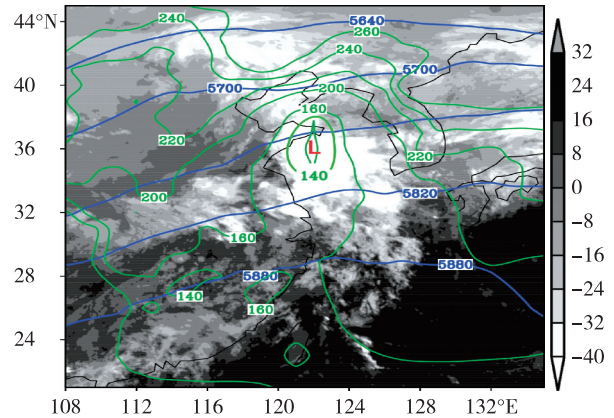


图 3 2015年11月7日00时卫星红外亮温(单位: $^{\circ}\text{C}$)与1000 hPa(绿色实线)及500 hPa(蓝色实线)的位势高度场(单位:gpm)

Fig.3 Satellite infrared brightness temperatures (units: $^{\circ}\text{C}$), potential heights (units: gpm) at 1000 hPa (green lines) and 500 hPa (blue lines) at 00:00 LST 7 November 2015

为了分析副热带高压(以下简称“副高”)的南北位置变化,选取500 hPa高度上5880 gpm等值线标记副高的北界。由NCEP提供的全球FNL再分析数据得到的此次过程中副高的北界在 25°N ~ 30°N 之间(图4),一直盘踞在我国江淮地区上空。研究^[4]表明,副高的北界位置随季节呈南北循环变化,秋季10月以后,副高北界位于 20°N 以南(图4),在冬季到达 15°N ,随着季节转暖,副高位置慢慢向北移动。2015年11月发生江淮气旋时,副高北界位于 25°N 以北,而副高北界11月的平均位置位于 20°N 以南,由此可见,此次过程中副高北界较历史同期偏北 5° ~ 10° ,一直控制着江淮地区。

根据袁媛等^[5]对2014—2016年副高强度指数的逐月演变研究来看,副高强度从2015年至2016年1月呈现显著上升趋势。尤其是2015年冬季,副高平均强度达到1980年以来最大值 $350 \times 10^6 \text{ dagpm} \cdot \text{km}^2$,明显偏强。

副高的位置、强度对江淮气旋的生成、移动有不可忽视的影响。副高的北侧是中纬度西风带,也是副热带锋区。此次气旋过程中,由于副高的增强(袁媛等^[5])使得副高西侧西南向水汽输送充沛,同时副高北界偏北(图4),控制江淮地区。这导致在

① <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/archive-e.html>。

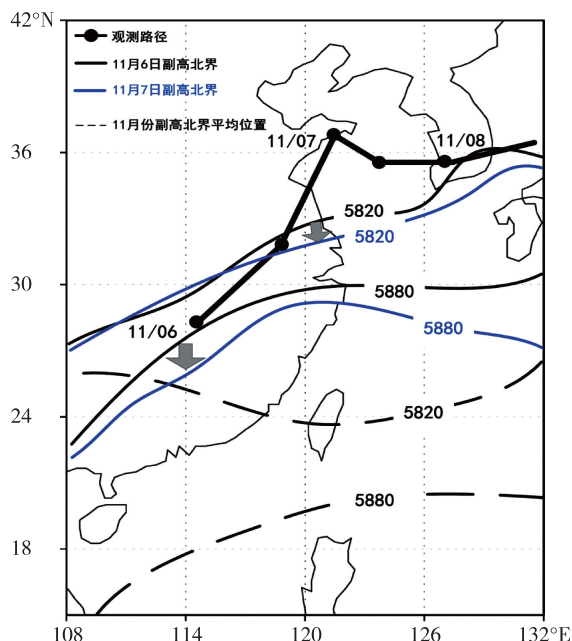


图4 研究个例观测路径(带实心点粗实线)和11月6—7日、7—8日副高北界位置以及11月副高北界平均位置(单位:gpm,箭头示意副高的南撤)

Fig.4 Observed track (thick line with solid circle) of the studied cyclone, north border of the western Pacific subtropical high (units:gpm) on 6—7 (black solid lines) and 7—8 (blue solid lines) November 2015, and the mean position of the north border of WPSH in November (dashed lines). The arrows indicate the WPSH's southward withdrawing

江淮地区附近产生异常辐合,在系统性上升运动和不稳定能量释放的共同作用下,气旋生成于11月,发生时间偏晚。根据统计^[6],副高支配的雨带位置在北界以北6~10个纬距,走向与北界平行。根据11月6、7日江淮气旋低压中心的移动方向可以看出,江淮气旋的移动路径总体上沿副高北界移动,其走向与北界平行(图4),副高北界的位置决定江淮气旋的移动方向。可见,此次气旋过程路径较同期相比偏北的主要原因是副高位置异常偏北。

1.2 副高偏北偏强的原因

造成副高位置和强度异常变化的因素有很多,譬如厄尔尼诺事件中大气环流异常、赤道地区的海温异常均会对其产生影响。任广成等^[7]发现,秋季9—10月NINO3区海温距平和与秋冬季副高强度指数演变趋势十分一致,两者的相关系数高达0.66。他们进一步解释:厄尔尼诺事件发生时,赤道东太平洋海温升高,有利于经向环流的加强;经向环流的北支下沉区在30°N附近,加强的下沉气流会使副高强度增强。

由于副高的南北活动与我国东部降水密切相关,许多学者对副高的南北进退及机制进行过深入研究^[8-10]。他们的研究指出,副高的南北位置不仅与大气内部动力过程有关,还和海洋下垫面热力状况密不可分^[11]。副高的季节性活动具有明显的规律性,从冬到夏,由南向北移动。6月中旬,副高北界出现第一次北跳过程,越过20°N,在20~25°N之间徘徊。7月中旬出现第二次北跳,北界迅速跳过25°N,以后摆动在25~30°N之间。叶天舒^[12]通过对副高北界2次北跳早晚年与前冬至夏季海温距平进行合成分析,发现当从前冬至夏季的厄尔尼诺由初期发展为强盛期时,第二次北跳时间偏晚。2015年夏季正是2014—2016年厄尔尼诺事件逐渐强盛的时期,副高北界第二次北跳时间偏晚,相应地在秋冬季南撤时间也偏晚。

2 数值试验与结果分析

2.1 WRF 试验

2.1.1 数据与方法

利用FNL大气再分析数据(水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直层数27,间隔6h)^①作为背景场,海温数据采用NEAR-GOOS(North-East Asian Regional Global Ocean Observing System)的日平均数据(分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)^②,用于同化的观测数据主要有常规探空数据(间隔12h)和地面、船舶与岛屿观测数据(间隔3h)^③。

数据同化方法为高山红等^[13]设计并发展的一个循环三维变分(3-Dimensional Variational, 3DVAR)数据同化工具。该工具能大幅度提高模拟初始场质量,从而改善模拟结果。为进一步改善三维变分同化效果,针对此个例,使用FNL数据驱动WRF模式,进行以模拟时间为中心约15d的2次/d的24h数值后报,采用NMC方法^[14]统计后报结果,生成独立的背景误差协方差(CV5)^[15]。

2.1.2 模式设置

WRF模式采用2重嵌套模拟区域,中心点为(123°E, 35°N),模拟区域如图5。WRF模式具体设置参见表2。

2.1.3 试验设计

除控制试验外,为观察黄海海温变化、黄渤海下垫面性质以及海面热通量对于江淮气旋发展过

① <http://rda.ucar.edu/dsszone/ds083.2>.

② <http://goos.kishou.go.jp/rtdb/usr/pub/JMA/mgdsst>.

③ <http://222.195.136.24/forecast.html>.

程的影响,还设计了 4 个敏感性试验,试验名称与目的见表 3。所有试验的模拟起点为 2015 年 11 月 6 日 08 时,模拟时长为 72 h;在模拟开始之前,进行了 12 h 的循环 3DVAR 数据同化,D1 与 D2 区域结果的输出时间间隔均为 3 h。

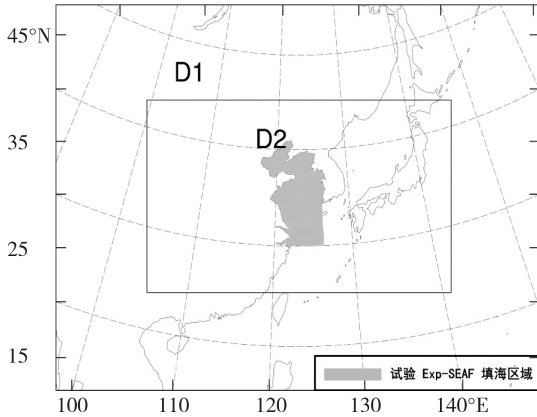


图 5 WRF 模拟区域

Fig.5 WRF modeling domains

表 2 WRF 模式设置

Table 2 WRF modeling design

区域与选项	具体设置	
	D1	D2
	双重嵌套; Lambert 投影(中心点: 123°E, 35°N)	
区域与分辨率	格点数: 198×147	格点数: 373×220
	水平分辨率: 30 km	水平分辨率: 10 km
	垂直分辨率: 44η 层	
边界层方案	YSU 方案(Hong et al. ^[16])	
积云对流方案	Betts-Miller-Janjic 方案 (Betts and Miller ^[17] , Janjic ^[18])	
微物理方案	Lin 方案(Lin et al. ^[19])	
辐射方案	RRTMG 长、短波方案(Iacono et al. ^[20])	
陆面过程	Noah 陆面模式(Chen and Dudhia ^[21])	

注: $\eta = 1.000\ 0, 0.997\ 5, 0.992\ 5, 0.985\ 0, 0.977\ 5, 0.970\ 0, 0.954\ 0, 0.934\ 0, 0.909\ 0, 0.880\ 0, 0.850\ 6, 0.821\ 2, 0.791\ 8, 0.762\ 5, 0.708\ 4, 0.657\ 3, 0.609\ 0, 0.563\ 4, 0.520\ 4, 0.479\ 8, 0.441\ 5, 0.405\ 5, 0.371\ 6, 0.339\ 7, 0.309\ 7, 0.281\ 5, 0.255\ 1, 0.230\ 3, 0.207\ 1, 0.185\ 4, 0.165\ 1, 0.146\ 1, 0.128\ 4, 0.111\ 8, 0.096\ 5, 0.082\ 2, 0.068\ 9, 0.056\ 6, 0.045\ 2, 0.034\ 6, 0.024\ 9, 0.015\ 9, 0.007\ 6, 0.000\ 0$ 。

2.2 结果与分析

2.2.1 模拟结果

图 6 是 2015 年 11 月 6 日 08 时—9 日 08 时江淮气旋控制试验 Exp-CTRL 与实际观测中心气压与

路径的比较。由图 6 显示,模拟结果中心气压范围为 1 005~1 017 hPa,而实际观测中心气压折线图显示此次江淮气旋实际中心气压变化范围为 1 006~1 018 hPa(图 6a),它们的变化趋势一致,模拟的气旋移动路径与实际观测也非常接近(图 6b)。因此,无论其强度变化趋势还是移动路径,Exp-CTRL 的模拟结果均与实际观测比较吻合,因此它可以作为参照来分析敏感性试验的结果。

表 3 数值试验设计

Table 3 List of the numerical experiments

序号	试验名称	试验内容
1	Exp-CTRL	控制试验
2	Exp-SST+	海温升高 2 °C
3	Exp-SST-	海温降低 2 °C
4	Exp-SEAF	将黄海与渤海填为陆地
5	Exp-FLUX	关闭海面热通量

敏感性试验给出的气旋中心气压与路径如图 7 所示。可以看出,4 个敏感性试验中心气压的变化趋势与 Exp-CTRL 接近(图 7a),但中心气压强度却有较大差别,由强至弱依次为 Exp-SST+、Exp-CTRL、Exp-SST-、Exp-SEAF 与 Exp-FLUX。其中,强度最强的 Exp-SST+ 与 Exp-CTRL 之间的中心气压差距仅为 2 hPa,而强度最弱的 Exp-FLUX 则相差 8 hPa。比较各个敏感试验的移动路径(图 7b),发现它们存在很大的差异: Exp-SST+ 的移动路径最接近 Exp-CTRL,最大差异约为 200 km,而 Exp-FLUX 移动路径与 Exp-CTRL 差距最大,最大差异将近 700 km。在 11 月 7 日 20 时气旋路径发生南折之前,各敏感性试验路径相差不大且与 Exp-CTRL 接近,但之后它们的路径发生了很大变化。尤其是 Exp-FLUX,由于强度最弱,受高空西南引导气流控制经过山东半岛后直接进入渤海,没有发生南折。Exp-SST-、Exp-SEAF 由于中心气压较 Exp-CTRL 偏高 1~5 hPa,强度减弱,路径向北发生偏移,北偏距离为 300~600 km,但总体移动路径与 Exp-CTRL 相符。由于 4 个敏感性试验均是修改下垫面性质,因此最终对于 500 hPa 高空环流形势及风场分布影响较小,5 个数值试验得到的 500 hPa 风场分布类似(图略)。根据“引导气流规则”,浅薄气旋的移动方向与它上空 700 hPa 或 500 hPa 等压面上的气流方向大体一致,5 个试验气旋的强度与路径结果显示:在高空引导气流方向一样的情况下,江淮气旋的移动路径与强

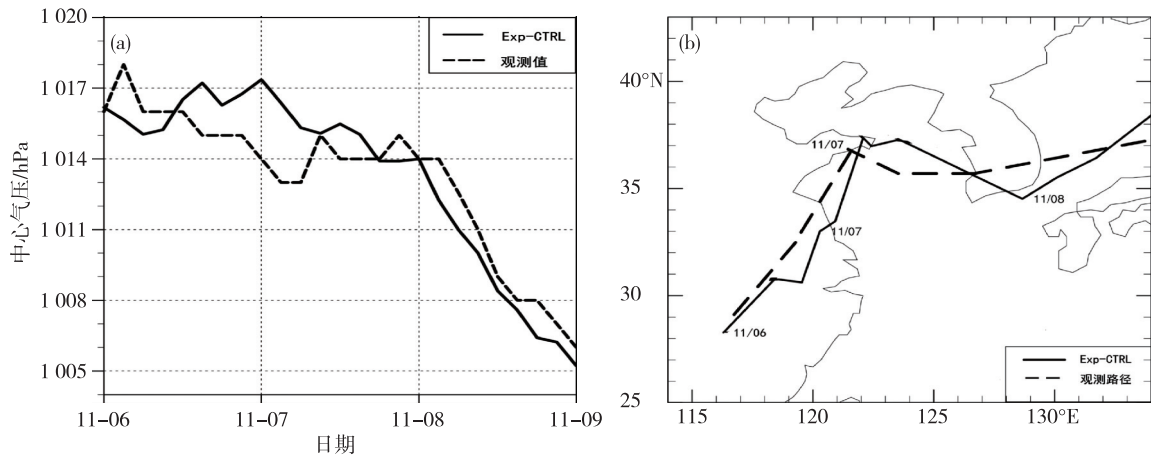


图6 Exp-CTRL模拟与观测的气旋中心气压(a)与移动路径(b)

Fig.6 Exp-CTRL simulated and observed cyclone central pressures (a) and tracks (b)

度之间有很强的关联性,强度越弱,气旋越容易受高空西南引导气流控制,移动路径就越偏北。

表4统计了所有数值试验中气旋在黄海停留时间、影响山东半岛的时间以及影响时段内累计最大降水量。通过比较发现,Exp-SST+、Exp-SST-在黄海停留时间与Exp-CTRL接近,在18~23h之间。Exp-SEAF、Exp-FLUX之间的差距较大,Exp-SEAF中气旋在黄海停留时间最短,仅为6h。在影响山东半岛方面,Exp-SST+影响时长比Exp-CTRL减少12h,但影响时段内累积最大降水量增加至90mm;Exp-SST-影响时段与Exp-CTRL相同,但累积最大降水量比Exp-CTRL少20mm;Exp-SEAF在黄海停

留时间短,影响山东半岛时间较Exp-CTRL缩短15h,降水强度比Exp-CTRL弱,累积最大降水量为25mm;而Exp-FLUX影响时段较Exp-CTRL缩短了9h,降水强度也大幅减弱,累积最大降水量减少50mm。这些结果表明,气旋在黄海停留时间的长短及海洋下垫面状况,皆会强烈影响降水表现。改变海温时,气旋在黄海的停留时间与Exp-CTRL接近。但升高海温时,气旋影响山东半岛时间缩短且降水强度增强;降低海温时,山东半岛降水强度减弱。将黄渤海下垫面类型由海洋改为陆地及关闭海面热通量对山东半岛的降水均有较大影响,山东半岛的降水时长及降水强度均大幅减少。

表4 各数值试验中气旋在黄海停留与影响山东半岛的时间及其造成的累积最大降水量

Table 4 Periods of cyclone residing in the Yellow Sea and influencing Shandong Peninsula and its resulting maximum cumulative precipitation for the numerical experiments

序号	试验名称	停留时间/h	影响时段(时间/h)	最大降水/mm
1	Exp-CTRL	23	6日08时—7日08时(24)	85
2	Exp-SST+	18	6日08时—6日20时(12)	90
3	Exp-SST-	21	6日08时—7日08时(24)	65
4	Exp-SEAF	6	6日08时—6日17时(9)	25
5	Exp-FLUX	12	6日08时—6日23时(15)	35

2.2.2 江淮气旋路径偏北的原因分析

敏感性试验结果显示,气旋的移动与气旋的强度密切相关。譬如,试验Exp-SST+、Exp-SST-分别升高与降低了模拟区域的海温,它们给出的气旋中心气压的变化趋势与Exp-CTRL是相同的,但中心气压强度有差别(图7a),Exp-SST-的中心气压值比Exp-CTRL增加3~5hPa,强度减弱;Exp-SST+的中心气压比Exp-CTRL降低1~2hPa,强度增强。3个

试验的路径移动趋势相同,但Exp-SST-的路径明显偏北,与实际观测结果最远相差约600km(图7b)。这是由于江淮气旋移动路径与高空500hPa西南引导气流方向有关,此时江淮气旋强度减弱,容易受引导气流的控制向东北方向移动。

李崇银^[22]认为积云对流释放巨大潜热,其产生的CISK(Conditional Instability of Second Kind)正反馈作用促进气旋的发展,通过建立数学模型从理论

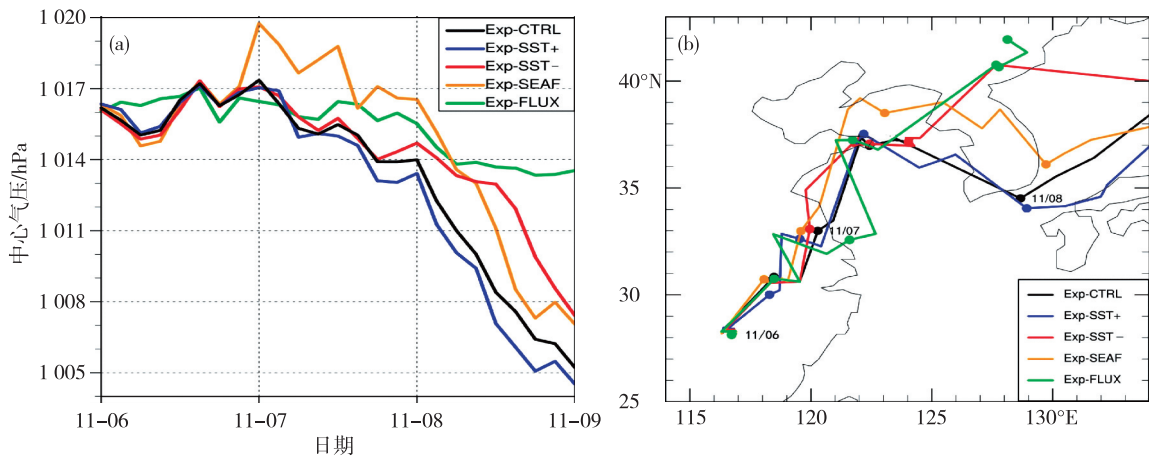


图 7 数值试验给出的气旋中心气压(a)与移动路径(b)

Fig.7 Simulated cyclone central pressures(a) and tracks(b) by the numerical experiments

上说明由积云对流过程引起的凝结潜热可以造成对流不稳定,是促进江淮气旋发展的主要原因。因此,下面聚焦于热力作用对此次气旋的影响。

对比分析试验 Exp-SST+、Exp-CTRL、Exp-SST-在 11 月 7 日 20 时(即模拟气旋路径南折的时刻) 850 hPa 的水汽通量场(图 8a-c)发现,Exp-SST+的水汽通量中心为 $24 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$,而试验 Exp-CTRL、Exp-SST-中心分别为 $18 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$ 、 $12 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$ 。分别穿过气旋中心(图 8a-c 中的 A-B、C-D、E-F 线),观察水汽通量及垂直速度的垂直剖面图。发现水汽通量中心与上升运动集中区基本重合,即水汽通量强的地方对应上升运动强。比较 3 个试验结果,Exp-SST+垂直剖面水汽通量最强,最强达到 $20 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$,上升运动也最强,最大垂直速度为 $80 \text{ cm}/\text{s}$ (图 8d),Exp-CTRL、Exp-SST-的垂直剖面水汽通量中心及上升运动则依次减弱,其垂直速度最大分别为 $35 \text{ cm}/\text{s}$ 与 $12 \text{ cm}/\text{s}$ (图 8e, f)。7 日 20 时,3 个试验气旋中心气压强度依次减弱,依次为 1013 hPa 、 1014 hPa 与 1014.5 hPa (图 7a)。由此,升高海温可以加快黄海区域水汽通量的增强,从而促进水汽对流上升运动,水汽在对流上升过程中,释放更多潜热,利于气旋强度增强,使它不容易受高空引导气流的控制一直向北行进。

试验 Exp-SEAF 是将整个渤海与黄海海域填为陆地,具体修改区域如图 5 中阴影区域所示。试图改变气旋所经路径的下垫面属性,以此来观察减弱海面潜热通量对气旋发展有何影响,试验所给出的气旋强度变化与路径结果见图 7。在中心气压方面,Exp-SEAF 气旋强度变化趋势与 Exp-CTRL 大致

相同,但中心气压比 Exp-CTRL 偏高约 3 hPa ,气旋强度减弱。移动路径方面,气旋在 11 月 6—7 日经过黄海区域之前以及 11 月 8 日经过黄海之后的路径与 Exp-CTRL 接近,但是在经过黄海区域时气旋明显北移,北移距离大约为 300 km 。其原因为减弱潜热通量后,不能通过 CISK 正反馈机制促进水汽对流运动,因此造成气旋强度明显减弱,气旋易受高空西南引导气流的控制向东北移动。

2.2.3 江淮气旋路径南折的原因分析

Fisher^[23]研究表明,台风常沿海表温度暖舌轴线移动。江淮气旋与台风同属气旋系统,海温分布对江淮气旋的移动方向也应有指向作用。图 2 显示此次过程中黄海南部海温较北部海区偏高约 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,南部海区较北部是上升运动区,低层高温高湿空气上升凝结释放的热通量形成高能量区;黄海北部相对南部是低能量区,低层大气南、北部之间形成一支能量锋区(图 9a)。

敏感性试验 Exp-FLUX 关闭了海面热通量,可以探究能量锋区对江淮气旋移动路径的影响。由图 7b 显示,Exp-FLUX 模拟的江淮气旋前期移动路径与 Exp-CTRL 接近,一直受高空西南引导气流的控制偏北前进至山东半岛,但在经过山东半岛后没有南折而是穿过山东半岛进入渤海。另外,气旋强度大幅度减弱,与控制试验最大相差 8 hPa (图 7a)。在 11 月 6—7 日,Exp-CTRL 模拟的气旋强度较观测强度偏弱 $1\sim 3 \text{ hPa}$ (图 6a),对应移动路径南折时间也较晚(图 6b),这是由于气旋强度减弱,易受高空西南引导气流控制而不容易向南偏折,Exp-FLUX 中气旋没有发生南折也是同样原因。

假相当位温 θ_{se} 作为综合表征温度和湿度的参

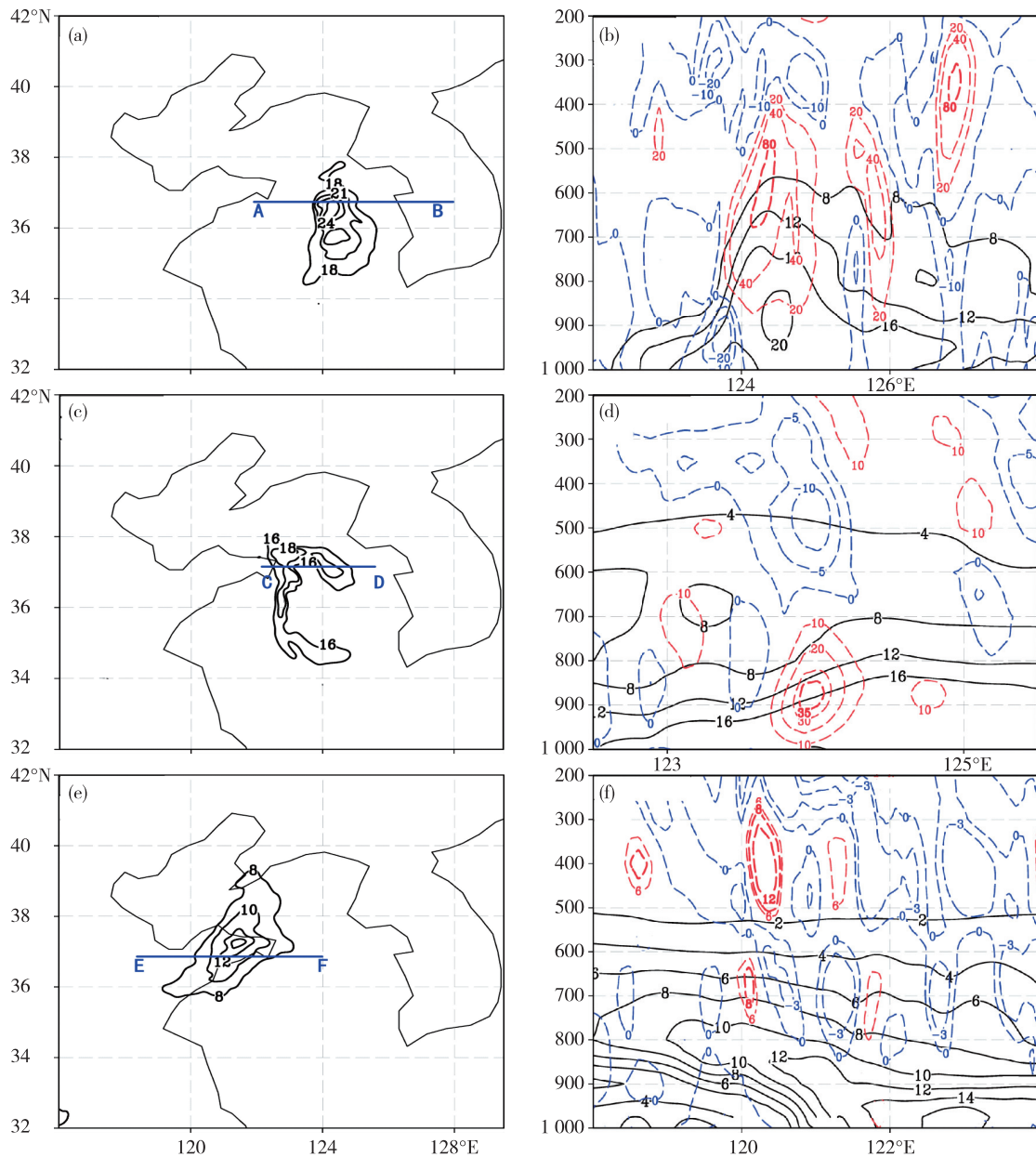


图8 2015年11月7日20时 Exp-SST+(a)、Exp-CTRL(b)与 Exp-SST-(c)的850 hPa水汽通量及沿A-B线(d)、C-D线(e)、E-F线(f)的水汽通量、垂直速度的垂直剖面(实线:水汽通量,单位: $g \cdot (s \cdot hPa \cdot cm)^{-1}$;虚线:垂直速度,单位: $cm \cdot s^{-1}$)

Fig.8 850 hPa water vapor flux at 20:00 LST 7 November, 2015 in experiments of Exp-SST+ (a), Exp-CTRL (b) and Exp-SST- (c); Vertical profiles of water vapor flux (solid lines, units: $g \cdot (s \cdot hPa \cdot cm)^{-1}$) and vertical velocity (dashed lines, units: $cm \cdot s^{-1}$) along A-B (d), C-D (e) and E-F (f) lines

数,其值在一定程度上代表了湿静力能量的高低能区,能量锋区为 θ_{se} 场中等值线密集区。为直观体现黄海南、北部不稳定能量的分布情况,选取试验 Exp-CTRL、Exp-FLUX 在7日20时江淮气旋发生南折的时刻,观察黄海区域上空850 hPa假相当位温分布以及分别沿气旋中心的假相当位温、垂直速度的垂直剖面(图9)。由图9a显示,在气旋向南移动的时刻,能量锋区位于黄海南、北部上空交界处(约

32°N),黄海南部上空为假相当位温高值区;而 Exp-FLUX 中黄海不存在明显假相当位温等值线密集区(图9b),气旋在经过山东半岛后也没有发生南折。从两个试验穿过气旋中心的假相当位温、垂直速度剖面图(图9c、d)发现,在 Exp-CTRL 中,在32°N以南,存在向北的假相当位温高能舌,且在其上空存在明显上升运动中心,其垂直速度达到30 cm/s,说明黄海南部上空上升运动明显,为高能区,而 Exp-

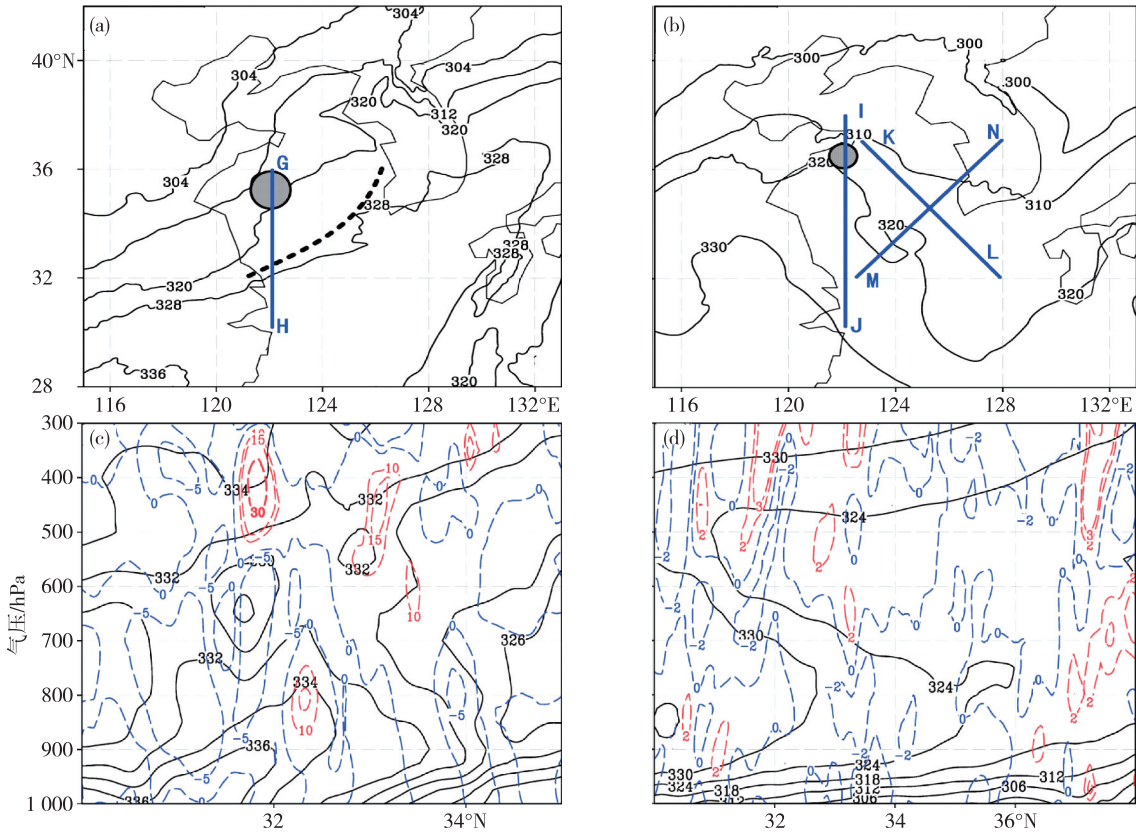


图 9 2015 年 11 月 7 日 20 时 Exp-CTRL (a)、Exp-FLUX (b) 850 hPa 假相当位温 (单位:K; 虚线: 能量锋, 阴影: 气旋中心) 及沿 G-H 线 (c)、I-J 线 (d) 的假相当位温、垂直速度的垂直剖面 (实线: 假相当位温, 单位: K; 虚线: 垂直速度, 单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.9 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature (units; K; dashed line; energy frontal zone, shaded area; cyclone center) at 20:00 LST 7 November, 2015 in experiments of Exp-CTRL (a) and Exp-FLUX (b); Vertical profiles of pseudo-equivalent potential temperature (solid lines, units; K) and vertical velocity (dashed lines, units: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) along G-H (c) and I-J (d) lines

FLUX 中黄海南、北部上空假相当位温分布较均匀且上空没有明显的上升运动区。因此, 黄海南、北部海温的不均匀分布造成的低层大气南、北区之间的能量锋区对气旋移动路径的南折有引导作用。

为探究风向对江淮气旋移动路径的动力引导作用, 沿江淮气旋南折的方向 (图 9b 中 K-L 线) 作斜剖面, 考察对流层低层的风向分布情况 (图 10a)。结果显示, 气旋路径发生南折时, 在对流层 1.4 km

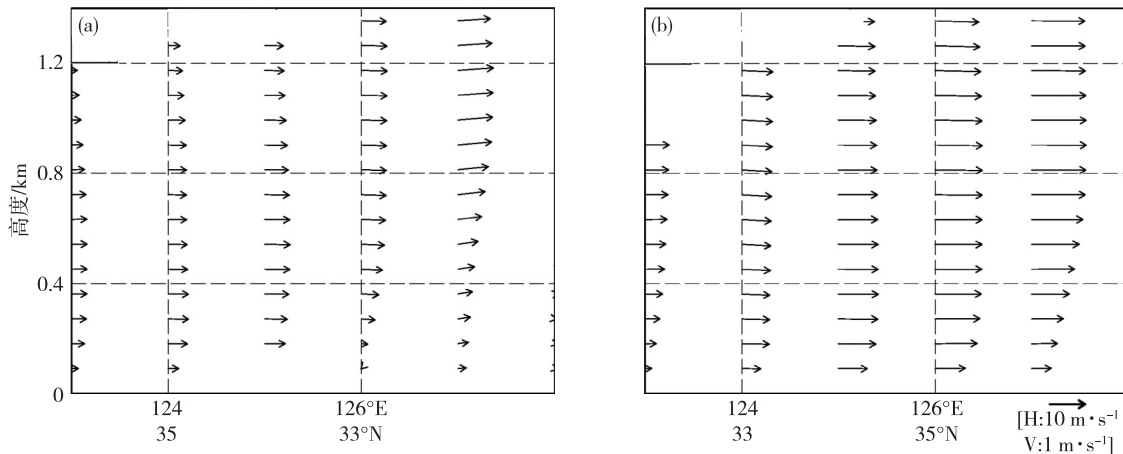


图 10 分别沿图 9b 中 K-L、M-N 线的 Exp-CTRL (a) 与 Exp-FLUX (b) 给出的风场垂直剖面

Fig.10 Vertical sections of winds for Exp-CTRL (a) and Exp-FLUX (b) along the K-L line and M-N line in Fig.9b

以下均为偏北风,而 Exp-FLUX 中,沿图 9b 中 *M-N* 线作剖面图,显示风向为偏南风(图 10b),因此在对流层低层,气旋南折方向偏北风的存在为气旋的向南移动提供了动力环境。此外,在 11 月 7 日气旋发生南折时,副高北界位置较 6 日稍有南撤(图 4),也有助于气旋的南折。

3 结论

利用 FNL 大气再分析数据、降水观测数据与 WRF 模式,对 2015 年 11 月 5—8 日发生的一次影响山东半岛的江淮气旋过程进行了观测分析与数值研究。

1) 观测分析揭示:副热带高压位置偏北且强度较强是导致气旋过程发生时间偏晚、路径偏北东移的重要原因,而副热带高压的异常变化与 2015 年强厄尔尼诺事件密切相关。

2) WRF 数值研究揭示:黄海高海温使得水汽通量向上输送较强、促使积云对流发展而导致潜热释放促进气旋发展,气旋增强而不易受高空西南引导气流控制;黄海海温南北分布不均匀导致的能量锋区可以引导气旋向南移动,且在对流层低层,沿气旋移动方向的偏北风以及副高北界的短暂南撤为江淮气旋的南折提供了动力环境;增强的气旋在有利的动力环境下,经过山东半岛后没有继续北行进入渤海,而是南折进入了黄海。

参考文献:

- [1] 江苏省气象局预报课题组. 江苏省重要天气分析和预报[M]. 北京: 气象出版社, 1988: 13.
- [2] 魏建苏, 刘佳颖, 孙燕, 等. 江淮气旋的气候特征分析[J]. 气象科学, 2013, 33(2): 196-201.
- [3] 刘佳颖. 江淮气旋气候学特征的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [4] 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 副热带高压研究进展及展望[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 503-517.
- [5] 袁媛, 高辉, 贾小龙, 等. 2014—2016 年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J]. 气象, 2016, 42(5): 532-539.
- [6] 俞亚勋. 东亚夏季风雨带进退与西太副高活动、降水年代际变化及江苏气候若干问题[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [7] 任广成, 吴小林, 沈爱华. 冬季西太平洋副高异常变化对我国气温的影响及其与前期北太平洋海温的关系[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(3): 10-13.
- [8] 龚道溢, 王绍武. 南北半球副热带高压对赤道东太平洋海温变化的响应[J]. 海洋学报, 1998, 20(5): 44-54.
- [9] 杨义文, 吴晓曦, 艾婉秀. El Niño 次年盛夏副高北进过程及中国雨型预测[J]. 应用气象学报, 1998, 9(增刊): 91-100.
- [10] 王启光, 封国林, 郑志海, 等. 长江中下游汛期降水优化多因子组合客观定量化预测研究[J]. 大气科学, 2011, 35(2): 287-297.
- [11] 何超, 周天军, 吴波. 影响夏季西北太平洋副热带高压年际变率的关键海区及影响机制[J]. 气象学报, 2015, 73(5): 940-951.
- [12] 叶天舒. 全球变暖背景下西太平洋副热带高压的北跳及与我国东部夏季降水的关系[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [13] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环 3DVAR 改进黄海海雾数值模拟初始场. I: WRF 数值试验[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(10): 1-9.
- [14] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system [J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(8): 1747-1763.
- [15] 刘佳艳, 高山红, 王永明, 等. 台风外围下沉区大气波导成因的数值模拟[J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 77-88.
- [16] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Mon Wea Rev, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [17] Betts A K, Miller M J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1986, 112: 693-709.
- [18] Janjic Z I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes [J]. Mon Wea Rev, 1994, 122(5): 927-945.
- [19] Lin Y-L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snowfield in a cloud model [J]. J Climate Appl Meteor, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [20] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. J Geophys Res: Atmos, 2008, 113(D13): 1395-1400.
- [21] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation [J]. Mon Wea Rev, 2001, 129(4): 569-585.
- [22] 李崇银. 论江淮气旋生成的一种机制[J]. 大气科学, 1982, 6(3): 258-263.
- [23] Fisher E L. Hurricane and the sea-surface temperature field [J]. J Meteor, 1958, 15(3): 328-333.