0577-6619/2008/66(2)-0236-50 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

山东省远距离热带气旋暴雨研究*

杨晓霞[1] 陈联寿[2] 刘诗军[3] 薛德强[1] 陈文选[3]

YANG Xiaoxia[1] CHEN Lianshou[2] LIU Shijun[3] XUE Deqiang[1] CHEN Wenxuan[3]

1. 山东省气象台，济南，250031
2. 中国气象科学研究院，北京，100081
3. 山东省气象科学研究所，济南，250031
1. *Shandong Weather Station*, *Jinan* 250031, *China*
2. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
3. *Shandong Meteorology Sciences Institute*, *Jinan* 250031, *China*

2007-01-21 收稿，2007-06-15 改回.

Yang Xiaoxia, Chen Lianshou, Liu Shijun, et al. 2008. A study of the far distance tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong Province. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(2):236－250

Abstract Using data of precipitation in Shandong province, normal meteorological observation data, typhoon yearbooks and NCEP/NCAR data during 1971－2003, the statistical climate characteristics and the composing circumfluence of the torrential rainfalls in Shandong province caused by remote tropical cyclones landing or activating on the coast of South China were analyzed. The synoptic model of the far distance tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong province was established. The budgets of composed water vapor and enthalpy of having and not having far distance tropical torrential rainfalls in Shandong were analyzed. The result indicated: the annual average of far distance tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong caused by the interaction of the tropical cyclone landing or activating on the coast of South China, the west wind system in middle latitude and the subtropical high is 2.5/year. This torrential rainfall's range was very wide; its intensity was very strong. The torrential rainfalls occurring time were lagged the tropical cyclone landing time. When the tropical cyclone which caused the torrential rainfall in Shandong was landing on the coast of South China, there were south-easterly or southerly jets at the low level of troposphere in the eastern part of center of the tropical cyclones toward Mainland China; westerly circulations at mid-high-latitude were weaker and lay over higher latitudes. The northerly winds in westerly band met the southerly winds on the west edge of subtropical high over western Pacific in Shandong region at 500 hPa. Effected by low system at the lower layer of troposphere (850－700 hPa), Shandong was dominated by cyclonic circulation. After tropical cyclone landing, the southerly jet near the center of cyclone extended northwardly and arrived at Shandong through the ridge line of the subtropical high over western Pacific. The transportation channels of water vapor and enthalpy between the center of tropical cyclone and Shandong was established and the warmer and wetter atmosphere carried toward Shandong continuously. From 12 to 48 hours after tropical cyclone landing, there were a great deal of water vapor and enthalpy importing, the wet and warm airflow and the westerly wind band airflow converged, and then updraft was produced, so the torrential rainfall occurred.

Key words Tropical cyclone, Far distance torrential rainfall, Weather and climate characteristic, Composing analyses, Synoptic model, Water vapor, Enthalpy

摘 要 应用1971—2003年的山东降水资料、常规天气图资料、台风年签和NCEP资料，对在华南沿海登陆和活动的热带气旋在山东造成远距离暴雨的气候特征进行统计分析，对环流形势场进行合成分析。建立了山东省远距离热带气旋暴雨的天

* 资助课题：山东省气象局气象科学技术研究项目“引发山洪和地质灾害的气象预报预警方法研究”(2004SDQXZ05)；山东省教委自然科学基金项目(Y98E08079)；中国气象局新技术推广项目预报员专项(CMATG2008Y05)。

作者简介：杨晓霞，主要从事天气预报和天气动力学研究。E-mail:yxxjn@163.com

气学模型。分别计算分析了山东有和无远距离热带气旋暴雨合成的水汽和温湿能的收支。结果表明:在华南沿海登陆和活动的热带气旋与西风带环流系统和副热带高压相互作用在山东造成的远距离热带气旋暴雨年均2.5次。暴雨的范围广、强度大。出现暴雨的时间比热带气旋登陆时间滞后。在山东造成远距离暴雨的热带气旋在华南沿海登陆时,中心东部有一股东南风或偏南风低空急流指向内陆。中高纬度中低层西风带环流弱,位置偏北。500 hPa西风带中的偏北气流与副高边缘的偏南气流在山东境内汇合。低层850—700 hPa伴有低值系统影响,山东为气旋性环流控制。热带气旋登陆后其中心附近的中低层偏南风急流向北伸展,绕过副高脊线直达山东。在台风中心附近至山东之间建立起水汽和温湿能的输送通道,把高温高湿的暖湿空气源源不断地向山东输送。在台风登陆后12—48小时内,山东暴雨区上空有大量的水汽和温湿能的净流入。暖湿气流与西风带气流相汇合,产生辐合上升,造成暴雨。

关键词 热带气旋,远距离暴雨,天气气候特征,合成分析,天气学模型,水汽,温湿能

中图法分类号 P426.6

1 引 言

随着热带气旋研究的进展,热带气旋与中纬度环流系统相互作用的研究也有了较大的发展(陈联寿等,2001;雷小途等,2001a,2001b;李江南等,2004;Chen Lianshou,2003;孙建华等,2006;端义宏等,2005;罗哲贤,2005;李英等,2005;余贞寿等,2005),热带气旋远距离暴雨也越来越受到关注。在沿海活动和登陆的热带气旋往往在低空形成一条宽广的偏东南风急流带,成为暴雨区的主要水汽通道和能量通道,这条急流带可在中纬度地区产生深厚的湿层和强水汽辐合,导致大气不稳定性增强及不稳定能量的积蓄和释放,产生暴雨。丁治英等(1995;2001)对200 hPa高空非纬向急流在远距离台风暴雨中的作用进行了研究,结果表明,暴雨发生时高空一般为西南风急流,暴雨增幅时,急流的非纬向性增强,高空非纬向风的辐散使低层减压,产生气旋式变风场,导致台风倒槽的形成和降水加大。暴雨位于200 hPa高空急流的右后方;当高空为平直西风急流时,即使台风较强,造成的降水大部分在25°N以南,且强度明显偏弱。陶祖钰等(1994)对9216号台风诊断分析表明,台风在登陆后始终位于200 hPa高空副热带急流入口区右侧的强辐散区的下方,台风环流内地面涡度、散度、风场、850 hPa流场和温度场均为不对称分布。特别是温度场表现出明显的西冷东暖的特征。正是这种非对称结构极大地加强了高层的热成风,加大了低层的辐合,促使上升运动增强,是产生暴雨的根本原因之一。暴雨位于低层台风倒槽的强辐合区和台风北侧的暖平流区。孙建华等(2000)对9406号登陆台风进行诊断分析发现,华北和东北的强降水是由台风倒槽与西风槽相互作用造成的,高空急流入口区的垂直环流对华北、东北的降水起了重要的作用。朱洪岩等(2000)数值研究表明,台风可通过水汽和能量的输送直接影响远距离降水区的分布,西风槽可为台风远距离降水提供低层辐合、高层辐散以及槽前正涡度平流的大尺度背景,有利于垂直运动的发展和降雨的维持。台风东侧的水汽向中纬度槽前输送,可直接影响槽前降水的强度。刘铭等(1996)对9012号台风进行的数值研究表明,在初始场上人为加深中纬度的西风槽,可使24 h降水量增幅达30%。有时台风与西风带系统结合并不明显,但若有小股冷空气配合同样可以产生暴雨(汪绣清等,1998;张经珍等,2000),冷空气对台风暴雨的作用主要是造成暴雨初始的上升运动和边界层内的水汽集中并向上输送,触发辐合线上的中尺度扰动产生强雨团。陈忠明等(2002)对台风与西南低涡相互作用产生的暴雨进行研究表明,中低纬系统相互作用在促进西南涡发展和暴雨发生中起了重要作用。曹钢锋等(1988)和张善君等(1995)对西风槽与在华东沿海登陆的热带气旋系统相互作用在华北地区产生暴雨增幅的机制进行研究表明,热带气旋东北部华东沿海的低空东南风急流为暴雨提供了水汽通道。大量的研究表明,热带气旋远距离暴雨与高空急流、西风槽、冷空气、西南涡、台风本身的不对称结构等都有密切关系。到目前为止,对热带气旋远距离暴雨的研究,基本上是对典型个例的数值分析和模拟,缺乏统计特征和天气学概念模型的研究及对有、无远距离暴雨的环流特征对比分析。山东位于中纬度沿海地区,每年都有远距离热带气旋暴雨发生,张善君等(1995)对在华东沿海登陆的热带气旋在山东产生的

暴雨增幅进行了研究。在近几年的个例中发现,在华南沿海登陆和活动的热带气旋与西风槽相互作用,也经常造成山东大范围暴雨或大暴雨,出现暴雨的时间比热带气旋登陆时间滞后1—3 d。为了对山东远距离热带气旋暴雨有较全面和深入的认识,本研究旨在对华南沿海登陆和活动的热带气旋与西风带系统和西太平洋副热带高压相互作用在山东造成的远距离热带气旋暴雨进行研究,给出山东有、无远距离热带气旋暴雨的天气学模型。研究热带气旋中心附近的水汽和温湿能量向山东暴雨区的输送。分析研究山东有、无远距离热带气旋暴雨时水汽和能量的收支。以证实远在华南沿海登陆和活动的热带气旋对山东暴雨的作用。

2 资料和研究方法

本研究对远距离热带气旋暴雨的界定为:暴雨区在热带气旋范围之外,但暴雨与热带气旋的存在有密切联系。例如热带气旋外围的水汽输送,或热带气旋作为扰动源所引起的波动传播等在远距离处产生的暴雨。选取热带气旋登陆和活动的区域为18°—25°N、106°—123°E,应用1971—2003年《热带气旋年签》,统计6—9月进入此区域内在华南沿海登陆和活动的热带气旋。应用山东省1971—2003年6—9月气象站降水资料,按照日雨量≥50.0 mm的标准,统计热带气旋在18°—25°N、106°—123°E区域活动和登陆期间,山东省1—3 d的暴雨日。若3 d内山东有1 d出现3站以上的暴雨,记为1次远距离热带气旋暴雨,否则为无远距离热带气旋暴雨。

应用常规天气图资料统计分析6—9月山东产生远距离热带气旋暴雨的环流形势和天气系统特征。分别选取3个在山东有和无远距离暴雨的热带气旋。为了便于比较,选取两组山东有、无远距离暴雨的热带气旋,其登陆地点、登陆时间和强度都相近。应用NCEP(2.5°×2.5°)每天4次的再分析资料,在15°—60°N、80°—140°E范围内,分别对两类热带气旋登陆活动期间1000—300 hPa的高度、风、水汽通量和水汽通量散度进行合成。对比分析山东有和无远距离热带气旋暴雨的环流特征和水汽输送,建立山东远距离热带气旋暴雨的天气学模型。为了证明山东境内的暴雨是由在华南沿海登陆的热带气旋外围的水汽和能量的输送而致,选取30°—40°N、115°—122.5°E,300 hPa以下的一个“箱体",计算热带气旋在华南沿海登陆和活动期间,“箱体"各边界的水汽和温湿能通量及“箱体"内水汽和温湿能的收支。

3 统计分析

对1971—2003年在18°—25°N、106°—123°E区域内活动的热带气旋造成的山东远距离暴雨特征、热带气旋强度、登陆地点和西风带环流及副热带高压特征进行统计分析,建立山东省有、无热带气旋暴雨的气候概念模型。

3.1 山东远距离热带气旋暴雨特征

统计表明,山东远距离热带气旋暴雨范围广、强度强、雨量大。暴雨的落区和强度与热带气旋的登陆地点、西风带中气旋性环流系统、副热带高压和山东地形都有很大的关系。在鲁中山区的西南部、西北部和半岛南部是西南气流、东南气流和偏南气流的迎风坡或喇叭口的开口区,这些地区往往是暴雨的中心。在远距离热带气旋暴雨中,日雨量极值在100 mm以上的占70%,最大日雨量达302 mm。在1 d内20站以上的大范围暴雨占28.3%,范围最大为56站,占全省观测站数的一半。暴雨从山东南部或西部开始,向北或向东移动,降水在山东境内持续24—36 h。

3.2 山东有、无远距离暴雨的热带气旋特征

3.2.1 产生远距离暴雨的热带气旋频次

1971—2003年6—9月在18°—25°N、106°—123°E区域内活动的热带气旋共有199个(表1)。热带气旋与中纬度环流系统相互作用,其外围的偏南暖湿气流影响山东,造成山东3站以上暴雨的有84个,约占研究区域内热带气旋总数的42.2%。山东远距离热带气旋暴雨平均每年2.5次。7月在山东造成远距离暴雨的热带气旋最多,占7月登陆热带气旋的63.0%,8月次之,占47.5%。对于7—8月来说,在华南沿海和海南岛登陆和活动的热带气旋,在山东产生远距离暴雨的概率为54.9%。

3.2.2 有、无远距离暴雨的热带气旋登陆地点

上述研究区域内活动的199个热带气旋中188个在华南沿海和海南岛登陆,登陆东沙群岛后消失的2个,在海域内活动未登陆的有9个。分析热带气旋的登陆地点(不包括第2次登陆)发现,造成山东远距离暴雨的热带气旋在广东沿海登陆的最多(表2),占有远距离暴雨的热带气旋的51.2%。在广

东沿海登陆的热带气旋在山东产生远距离热带气旋暴雨的概率为47.8%的。在台湾南部登陆的热带气旋在山东产生远距离暴雨的概率为40.5%。在海南岛登陆的热带气旋在山东产生远距离暴雨的概率为37.0%。

表1 1971—2003年6—9月在山东有、无远距离暴雨的热带气旋次数和百分率

Table 1 The numbers and percents of the tropical cyclones with or without torrential rainfalls in Shandong province from June to September from 1971 to 2003

时间	有远距离暴雨的热带气旋		无远距离暴雨的热带气旋		有远距离暴雨的热带气旋占月登陆热带气旋的百分比(%)	有远距离暴雨的热带气旋占总登陆热带气旋的百分比(%)
	个数	%	个数	%		
6月	10	11.9	20	17.4	50.0	5.0
7月	34	40.5	20	17.4	63.0	17.1
8月	28	33.3	31	27.0	47.5	14.1
9月	12	14.3	44	38.3	21.4	6.0
合计	84	100.0	115	100.0	42.2	42.2

表2 1971—2003年6—9月在山东有、无远距离暴雨的热带气旋在各区域的登陆次数和百分率

Table 2 The numbers and percents of the landing of the tropical cyclone with or without torrential rainfalls in Shandong province from June to September from 1971 to 2003

登陆地点	有远距离暴雨的热带气旋		无远距离暴雨的热带气旋		在山东产生远距离暴雨的概率(%)
	登陆次数	%	登陆次数	%	
福建沿海	4	4.8	11	9.6	26.7
台湾南部	15	17.9	22	19.1	40.5
广东沿海	43	51.2	47	40.9	47.8
海南	17	20.2	29	25.2	37.0
南海	4	4.8	5	4.3	44.4
东沙群岛	1	1.2	1	0.9	50.0
合计	84	100.0	115	100.0	42.2

3.2.3 产生远距离暴雨的热带气旋强度特征

热带气旋登陆时(或在沿海活动时),中心附近的最大风速与产生远距离暴雨的次数成正比。风速越大,产生远距离暴雨的次数越多。产生远距离暴雨的热带气旋登陆时中心附近最大风速在8级以上的占81.0%,在10级以上的占59.5%的(表3)。热带气旋登陆时最大风速在8级以上时,在山东产生远距离暴雨的概率为40%—51.4%。

表3 1971—2003年6—9月在山东有、无远距离暴雨的热带气旋登陆时最大风速的次数和百分率

Table 3 The numbers and percents of the maximum wind speeds of the tropical cyclonewith or without torrential rainfalls in Shandong province from June to September from 1971 to 2003

最大风速	有远距离暴雨的热带气旋		无远距离暴雨的热带气旋		在山东产生远距离暴雨的概率(%)
	登陆次数	%	登陆次数	%	
5级	5	6.0	4	3.5	55.6
6—7级	11	13.1	20	17.4	35.5
8—9级	18	21.4	17	14.8	51.4
10—11级	24	28.6	36	31.3	40.0
≥12级	26	31.0	38	33.0	40.6
合计	84	100.0	115	100.0	42.2

3.3 西风带环流系统特征

普查历史天气图发现,热带气旋在华南沿海登陆和活动期间,山东有、无暴雨的西风带系统明显不同。山东有暴雨时,在32°—40°N、105°—125°E区域内,850—500 hPa都有西风带低值系统活动并影响山东,山东上空3层都为偏南风或气旋性环流。500 hPa山东位于西风槽前或副高边缘的偏南气流中;700—850 hPa上有低槽、低涡、切变线或低压倒

槽影响;地面上山东受副热带气旋、倒槽、静止锋、切变线、冷锋等系统影响,或位于海上高压的边缘东高西低的气压场中,盛行偏南风。在热带气旋中心的东部或东北部 850 hPa 上都有一股南风或东南风急流指向内陆。热带气旋在台湾和福建沿海登陆时,多为东南风急流,直指山东。热带气旋在广东和海南沿海登陆或活动时,多为偏南风急流,指向山东;若为东南风急流时,急流在副高边缘绕过副高脊线汇入直接影响山东的西南风急流中。

热带气旋在华南沿海登陆或活动期间,山东没有远距离热带气旋暴雨时,在上述中高纬度地区,850—500 hPa 三层或任一层为槽后脊前西北气流、东北气流、高压脊、反气旋性环流或副高控制。热带气旋中心的东北部华东或华南沿海为偏东风或东北风急流(占 43.2%)。

3.4 副热带高压特征

热带气旋在华南沿海登陆和活动期间,山东是否有远距离暴雨,与低层副热带高压(副高)的位置有密切关系。山东有暴雨时,低层 850 hPa 副高脊线(在 120°E)主要集中在 26°—30°N,占有远距离热带气旋暴雨的 54.8%(表 4)。当低层 850 hPa 副高脊线在 26°—30°N 时,在华南沿海登陆的热带气旋在山东产生远距离暴雨的概率为 63.9%。有远距离热带气旋暴雨时,副高西伸脊点(148 dagpm 线)主要集中在 106°—120°E(85.7%),在 111°—115°E 的占 39.3%。热带气旋在华南沿海登陆或活动期间,850 hPa 副高西伸脊点在 111°—115°E 时,山东出现远距离热带气旋暴雨的概率为 54.1%(表 5)。

表 4 1971—2003 年 6—9 月山东有、无远距离热带气旋暴雨时 850 hPa 上 120°E 副高脊线所在纬度的次数和百分率

Table 4 The numbers and percents of the latitudes of the ridge line of subtropical high over west Pacific at 120°E longitude at 850 hPa in the cases with or without remote tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong province from June to September during 1971−2003

	有远距离热带气旋暴雨时副高脊线		无远距离热带气旋暴雨时副高脊线		有远距离热带气旋暴雨的概率%
	次数	%	次数	%	
≤25°N	15	17.9	27	23.5	35.7
26°—30°N	46	54.8	26	22.6	63.9
31°—35°N	13	15.5	27	23.5	32.5
36°—40°N	10	11.9	34	29.6	22.7
>40°N	0	0.0	1	0.9	0.0
合计	84	100.0	115	100.0	42.2

热带气旋在华南沿海登陆山东无远距离热带气旋暴雨时,850 hPa 副高脊线在 36°—40°N 的最多(29.6%)(表 4),与山东所处的纬度基本相同,说明山东受副高控制,不利于暴雨形成。由此可见,低层副热带高压的位置与山东远距离热带气旋暴雨有密切关系,副高控制山东时,一般没有暴雨。

表 5 1971—2003 年 6—9 月山东有、无远距离热带气旋暴雨时 850 hPa 副高西伸脊点所在经度的次数和百分率

Table 5 The numbers and percents of the longitudes of the west ridge dots of the subtropical high over west Pacific at 850 hPa in the cases with or without remote tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong province from June to September during 1971−2003

	有远距离热带气旋暴雨时副高西伸脊点		无远距离热带气旋暴雨时副高西伸脊点		有远距离热带气旋暴雨的概率%
	次数	%	次数	%	
≤100°E	0	0.0	6	5.2	0.0
101°—105°E	6	7.1	16	13.9	27.3
106°—110°E	22	26.2	23	20.0	48.9
111°—115°E	33	39.3	28	24.3	54.1
116°—120°E	17	20.2	24	20.9	41.5
121°—125°E	4	4.8	8	7.0	33.3
126°—130°E	2	2.4	5	4.3	28.6
131°—135°E	0	0.0	2	1.7	0.0
>135°E	0	0.0	3	2.6	0.0
合计	84	100.0	115	100.0	42.2

4 合成分析

在分析研究了山东远距离热带气旋暴雨气候背景特征的基础上,分别选取3个在山东有和无远距离热带气旋暴雨的个例,对1000—500 hPa的高度、风、水汽通量和水汽通量散度分别进行合成,并进行对比分析,研究有和无远距离热带气旋暴雨的天气学特征,建立这类暴雨的天气学模型。取包含山东的一个"箱体",应用合成的两组资料分别研究山东有和无远距离暴雨时"箱体"内水汽和能量的收支。

4.1 选取的两类热带气旋特征

选取两组(每组3个)在山东有和无远距离暴雨的热带气旋进行合成。两组热带气旋有以下相似的特征(表6):①登陆时间相近,在8月22—28日,时间差<10 d。②登陆地点集中在海南的陵水到广东的徐闻,距离在250 km的范围内。③登陆时的强度相当,最大风速在28—35 m/s,风速差在8 m/s之内。④登陆后都是向西偏北方向移动,在内陆消失。山东的3次远距离热带气旋暴雨都是产生在热带气旋登陆后20—60小时。例如0312号台风在2003年8月25日4—6时在海南文昌和广东徐闻登陆,8月25日夜间至27日鲁南、鲁中和半岛地区出现暴雨,巨野雨量达225.3 mm。合成的时间是,从热带气旋登陆时最近的再分析时次起,直到登陆后72小时,间隔6 h。

表6 选取的6个热带气旋特征

Table 6 The characteristics of the selected six tropical cyclones

类型	山东有远距离暴雨的热带气旋			山东无远距离暴雨的热带气旋		
中央气象台编号	9419	9508	0312	7210	7311	9612
名称	Harry	Lois	Krovanh	Cora	Kate	Niki
强度	台风	强热带风暴	台风	台风	台风	台风
起止时间	8月24—29日	8月24—30日	8月15—26日	8月21—29日	8月20—27日	8月18—23日
登陆时间(北京时)	8月27日22时	8月28日10时	8月25日04时	8月28日08时	8月25日01时	8月22日04时
登陆地点	广东徐闻	海南万宁	海南文昌	海南文昌	海南文昌	海南陵水
登陆时最大风速(m/s)	28	30	35	30	30	33
登陆时中心气压(hPa)	985	980	965	970	970	970
登陆后路径趋向	登陆后西行	登陆后西行	登陆后西行	登陆后西行	登陆后西行	登陆后西行
登陆期间山东出现暴雨时间	8月29日夜间	8月29日	8月26—27日	无	无	无
暴雨站数	7	11	29—21	0	0	0
暴雨极值(mm)	97.3	78.9	225.3			
出现测站	金乡	曹县	巨野			

4.2 中低纬环流系统特征

分别对上述两类热带气旋登陆时和登陆后的500、700和850 hPa的高度和风进行合成平均。分析合成的环流平均场发现,在山东造成远距离暴雨的热带气旋登陆时,500 hPa中高纬度西风带环流较弱,位于37°N以北。副高北部边缘的偏南气流与西风带中的偏北气流在山东上空37°N附近汇合。500 hPa副热带高压呈带状西伸到中国内陆,在120°E的副高脊线在28°N附近,588 dagpm线的西伸脊点在107°E附近。低层850—700 hPa的副高形状和强度与高层较一致,850 hPa上148 dagpm等值线的西伸脊点在30°N、105°E附近。在热带气旋中心与西太平洋副热带高压之间,华南沿海形成一股较强的东南风急流,深入内陆。东南风急流中心位于华南沿海,850—700 hPa的急流中心风速在18 m/s以上,500 hPa急流中心风速大于14 m/s(图1a,1b)。台风登陆后向西偏北方向移动,登陆后6小时,西风带上在河套地区的南部新生低槽加深东移。登陆后24小时,500 hPa西风槽前的西南气流与副高北部边缘的西南气流相叠加影响山东。低层850—700 hPa,华南沿海的东南风急流中心一直维持在14 m/s以上,这股急流绕过副高脊线转成西南风急流到达山东南部(图1c,1d)。山东位于这股低空西南风急流的左前方,暖湿气流在此产生较强的辐合上升,产生暴雨。由于副热带高压较稳定,高空西风槽东移减慢。这种环流形势持续到台风登陆后48小时。48小时以后,低层台风低压减弱消失,华南沿海的东南风急流明显减弱,影响山东的

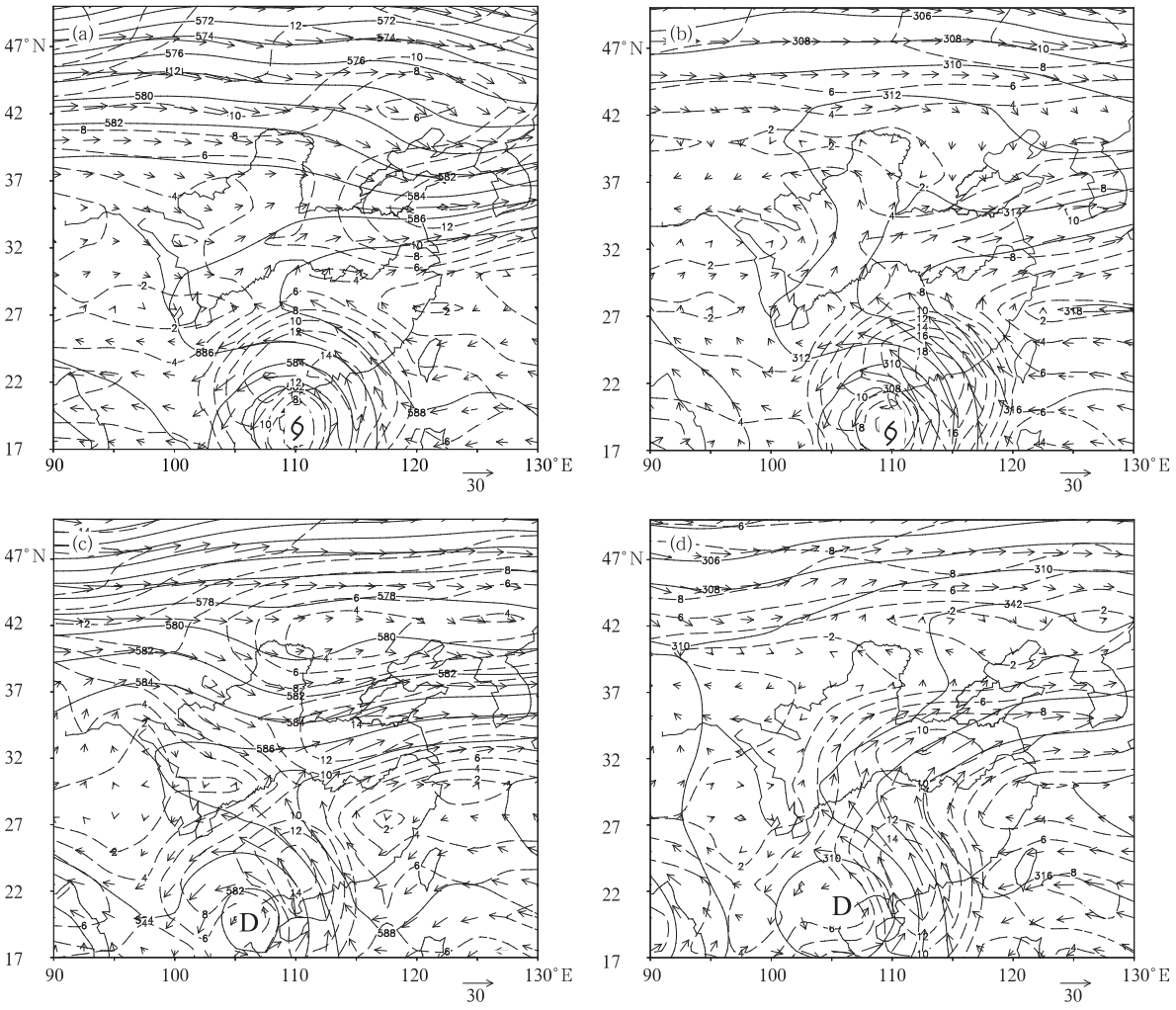

图 1 山东有远距离热带气旋暴雨的合成平均环流

(实线:等高线,单位 dagpm,虚线:等风速线,单位:m/s,间隔都是 2,箭头:风矢量)

(a. 登陆时 500 hPa,b. 登陆时 700 hPa,c. 登陆后 24 小时的 500 hPa,d. 登陆后 24 小时的 700 hPa)

Fig. 1 The average circumfluence of torrential rainfalls caused by remote tropical cyclone in Shandong

(solid lines: geopotential height, unit: dagpm, interval:2, dashed lines: wind speed, unit: m/s, interval:2, arrowhead: wind vector)

(a. 500 hPa at landing, b. 700 hPa at landing, c. 500 hPa at 24 hours after landing, d. 700 hPa at 24 hours after landing)

西南风急流东移。高空 500 hPa 西风槽逐渐移出山东,山东的暴雨天气逐渐结束。

在山东无远距离暴雨的热带气旋登陆时,500 hPa副热带高压也成带状,脊线位置偏北在 30°N附近,西伸脊点偏西在 105°E 附近。中高纬度西风带环流较强,位置偏南。西风带中的偏北气流与副高边缘的偏南气流在 35°N 以南汇合。500 hPa 大于 18 m/s 的西风中心位于 42°N 附近。850—500 hPa 在华南沿海台风中心东北部的东南风急流的偏东分量较大。850—700 hPa 急流中心的风速明显偏小 (12—14 m/s),中心偏西,位于台风中心的北部(图 2a、2b)。这种形势不利于华南沿海的水汽向北输送。

台风登陆后 24 小时内,500 hPa 西风带环流变平直,没有西风槽东移。副高强度减弱,大于 588 dagpm 的区域明显减少,位于长江中游。850—500 hPa 台风中心北部的东南风急流中心西移到广西上空。急流的偏南风分量较小,维持在 30°N 以南的地区(图 2c,2d)。副热带高压的北部为西风带环流,南部为东风带气流,两股气流被副高分开。登陆台风外围的暖湿气流只影响 27°N 以南的地区。山东只受西风带环流影响,无暴雨产生。

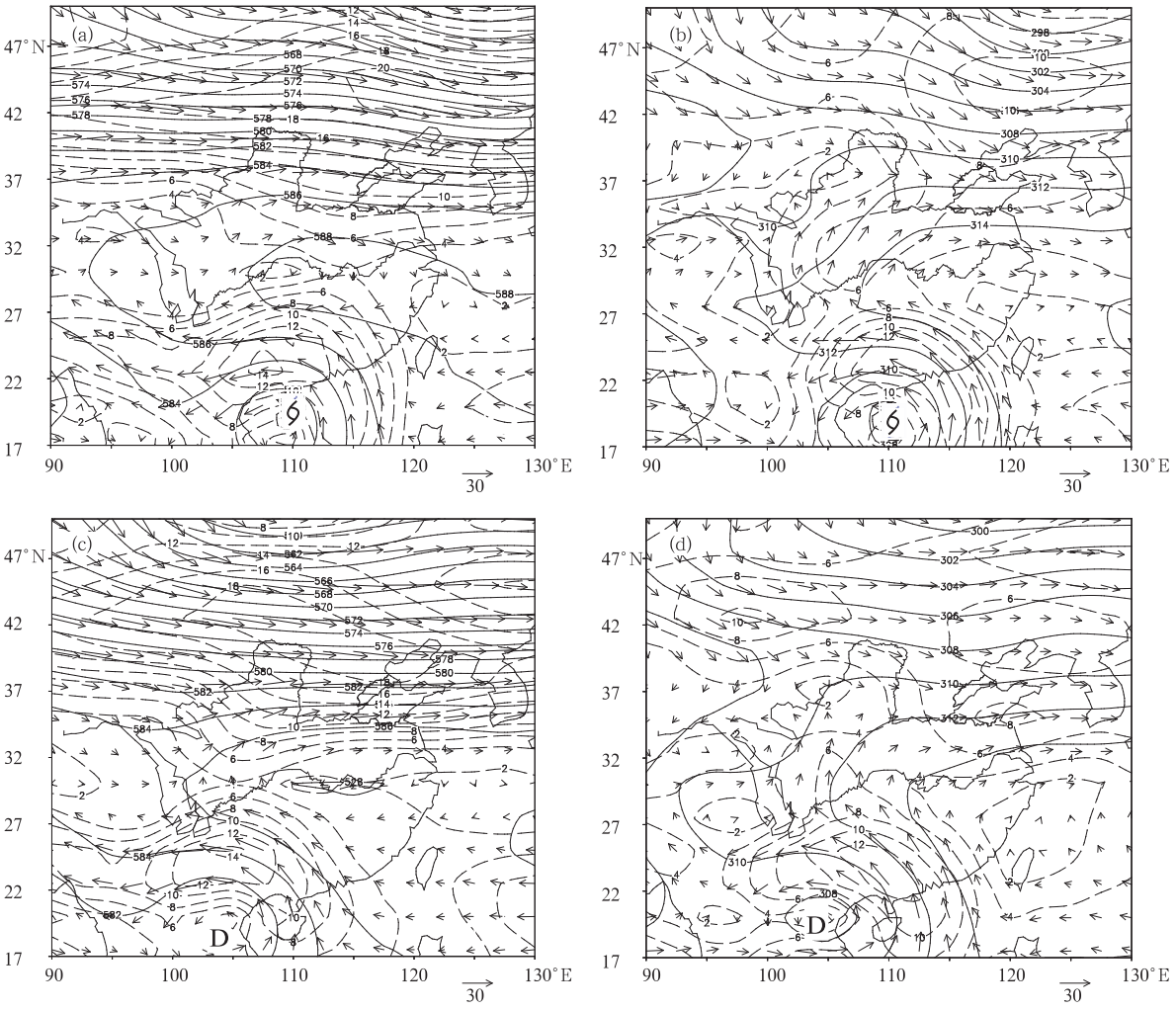

图 2 山东无远距离热带气旋暴雨的环流合成平均图

(实线:等高线,单位:dagpm,虚线:等风速线,单位:m/s,间隔都是 2,箭头:风矢量),

(a. 登陆时 500 hPa,b. 登陆时 700 hPa,c. 登陆后 24 小时 500 hPa,d. 登陆后 24 小时 700 hPa)

Fig. 2 The average circumfluence which remote tropical cyclone did not bring torrential rainfalls in Shandong

(solid lines: geopotential height, unit: dagpm, interval:2, dashed lines: wind speed, unit: m/s, interval:2, arrowhead: wind vector)

(a. 500 hPa at landing, b. 700 hPa at landing, c. 500 hPa at 24 hours after landing, d. 700 hPa at 24 hours after landing)

4.3 水汽、能量的输送

为了进一步证实华南沿海登陆西行的热带气旋对山东暴雨的作用,对两类热带气旋登陆时和登陆后低层水汽和能量的输送,及山东上空水汽和能量的收支,进行计算和分析。

分析两类热带气旋登陆后 1000—300 hPa 累积的水汽通量和水汽通量散度可见,山东有远距离热带气旋暴雨时,暴雨区的水汽来源于华南沿海登陆台风外围的偏南风急流的输送。热带气旋登陆时,1000—300 hPa 在华南沿海有一个较强的水汽通量高值中心,中心值在 110 g/(cm· hPa·s)以上,台风登陆后,水汽通量的高值区随偏南风气流向北伸展。登陆后 24 小时,大于 35 g/(cm·hPa·s)的水汽通量的高值舌到达山东南部(图 3a)。水汽随着偏南气流进一步向北输送。登陆后 36 小时,大于 35 g/(cm·hPa·s)的水汽通量高值区覆盖山东,并在山东产生水汽通量辐合(图 3b)。随着西南气流的东移,登陆 48 小时后,水汽通量高值区和水汽通量辐合区移出山东。由此可见,在华南沿海登陆的热带气旋,与中高纬度环流相互作用,在其中心的东部,从华南沿海到山东建立起由东南风转成西南风的弯曲的水汽通道,把大量的水汽从华南沿海向山东输送,在急流的前部产生辐合上升,在水汽通量的高值舌区产生辐合,造成暴雨。

在山东无远距离暴雨的热带气旋,登陆后其中心附近的水汽通量的高值区一直维持在华南,没有向北的水汽输送(图 3c、3d)。登陆台风和副热带高压及中纬度环流的相互作用不利于台风附近的水汽向北输送。

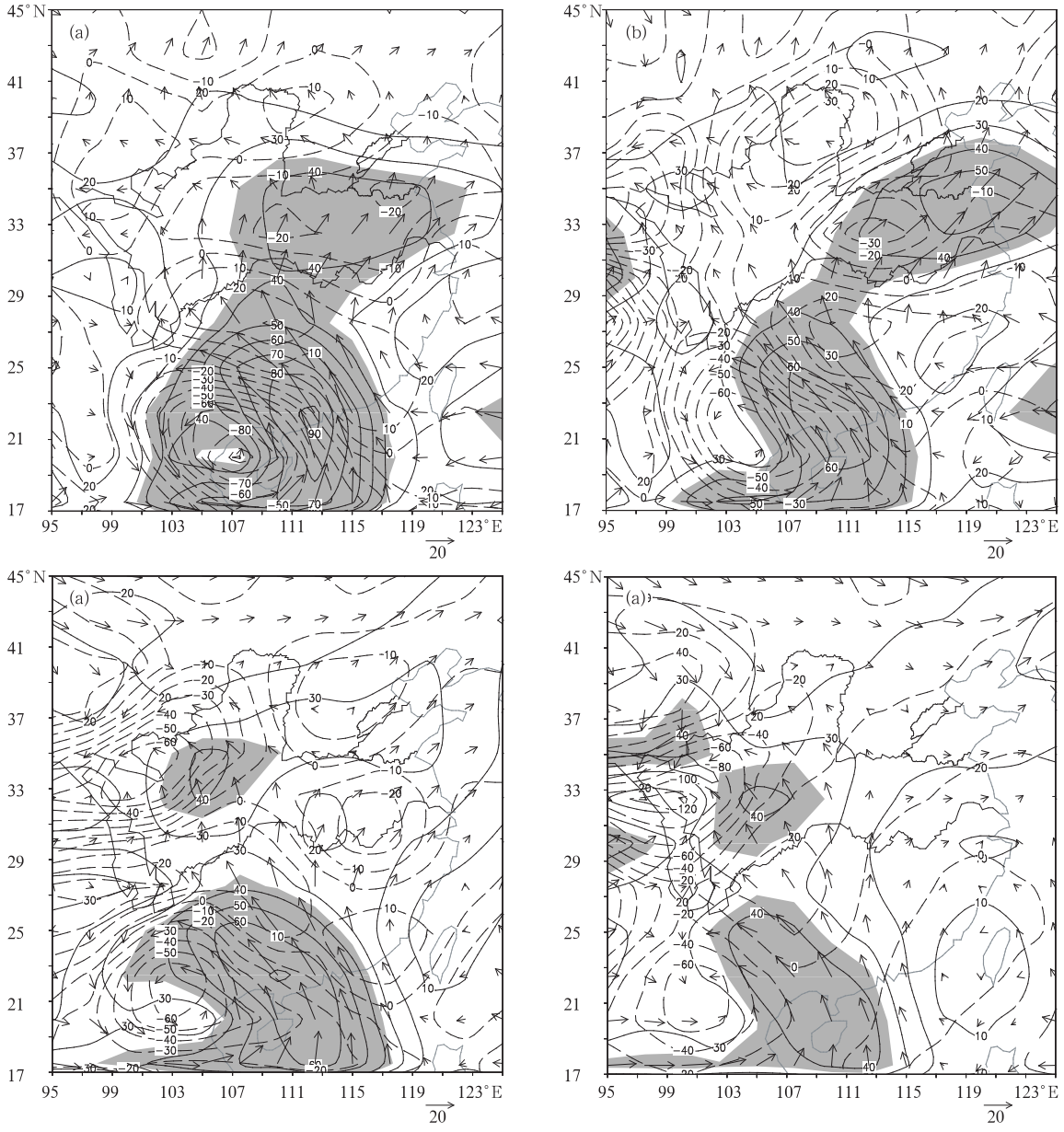

图 3 合成平均的 1000—300 hPa 累计的水汽通量(实线,单位:g/(cm·hPa·s),间隔 10,阴影区表示≥35),水汽通量散度(虚线,单位:$\times10^{-6}$ g/(cm^2·hPa·s))和 850 hPa 风矢量(箭头)

(a. 在山东有远距离暴雨的热带气旋登陆后 24 小时,b. 在山东有远距离暴雨的热带气旋登陆后 36 小时,c. 在山东无远距离暴雨的热带气旋登陆后 24 小时,d. 在山东无远距离暴雨的热带气旋登陆后 36 小时)

Fig. 3 The average water vapor flux (solid lines, unit: g/(cm·hPa·s), interval: 10, shadow area: ≥35) and the average water vapor flux divergence (dashed lines, unit: $\times10^{-6}$ g/(cm^2·hPa·s), interval: 10) of the accumulative total from 1000 hPa to 300 hPa and the average wind vector (arrowhead) at 850 hPa

(a. 24 hours after tropical cyclone landing in the cases with torrential rainfalls in Shandong, b. 36 hours after tropical cyclone landing in the cases with torrential rainfalls in Shandong, c. 24 hours after tropical cyclone landing in the cases without torrential rainfalls in Shandong, d. 36 hours after tropical cyclone landing in the cases without torrential rainfalls in Shandong)

温湿能即湿焓,单位质量空气的温湿能(杨大升等,1983)为 $E_h=c_pT+Lq$,$c_p=1.005$ J/(g·K),$L=2500.6$ J/g,T 为温度,q 为比湿。温湿能只与水汽和热量有关。与水汽通量类似,温湿能通量表示为$(V\cdot E_h)/g$。应用温湿能通量来表示台风中心附近大气温湿能向山东的输送。

分析两类热带气旋登陆后 1000—300 hPa 累积的温湿能($E_h=c_pT+Lq$)和通量可见,在山东有远距离热带气旋暴雨前,台风中心附近的温湿能也从华南沿海向北输送。在台风登陆后 24—30 小时,从台风中心附近到山东建立起温湿能通量大于 15 J/(cm·hPa·s)的能量输送通道(图 4a、4b)。把台风中心附近的温湿能向山东输送。在 36—48 小时山东上空发展成温湿能通量大于 20 J/(cm·hPa·s)的中心。热带气旋登陆后在山东无远距离暴雨时,台风中心附近的温湿能向北输送的较少,温湿能通量小于 15 J/(cm·hPa·s)。向北没有建立起明显的能量输送通道,温湿能输送主要是向西(图 4c、4d)。

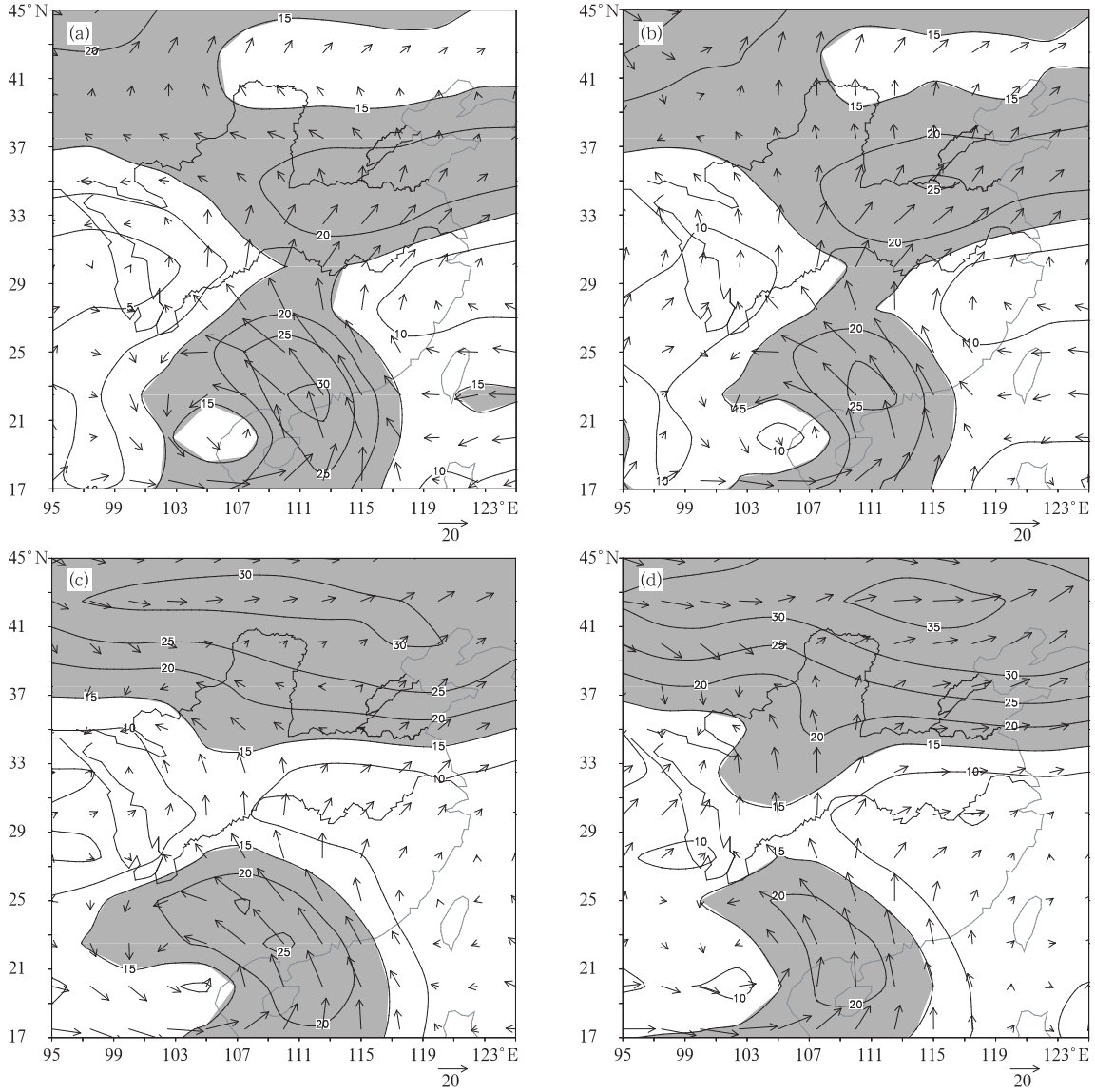

图 4 合成平均的 1000—300 hPa 累计的温湿能通量(实线,单位:J/(cm·hPa·s),间隔 5,阴影区为≥15)和 850 hPa 风矢量(箭头)

(a. 在山东有远距离暴雨的热带气旋登陆后 24 小时,b. 在山东有远距离暴雨的热带气旋登陆后 36 小时,c. 在山东无远距离暴雨的热带气旋登陆后 24 小时,d. 在山东无远距离暴雨的热带气旋登陆后 36 小时)

Fig. 4 The flux of average enthalpy of the accumulative total from 1000 hPa to 300 hPa (solid lines, unit: J/(cm·hPa·s), interval: 5, shadow area: ≥15) and the average wind vector (arrowhead) at 850 hPa (a. 24 hours after tropical cyclone landing in the cases with torrential rainfalls in Shandong, b. 36 hours after tropical cyclone landing in the cases with torrential rainfalls in Shandong, c. 24 hours after tropical cyclone landing in the cases without torrential rainfalls in Shandong, d. 36 hours after tropical cyclone landing in the cases without torrential rainfalls in Shandong)

4.4 山东有和无远距离热带气旋暴雨的水汽和能量收支

为了定量说明山东的暴雨与台风中心附近的水汽和能量向山东的输送有密切关系,分别应用表6中列出的两类山东有和无远距离热带气旋暴雨的环流合成平均资料,计算包含山东在内的区域(35°—40°N,115°—122.5°E)300 hPa以下的大气"箱体"中的水汽和能量的收支。各边界和柱体内的水汽输入和输出的计算方法见文献(朱乾根等,2005;吴启树等,2006;龚佃利等,2006)。

$$F_x = \frac{1}{g}\int_{p_0}^{p} qu\,\mathrm{d}p$$
$$F_y = \frac{1}{g}\int_{p_0}^{p} qv\,\mathrm{d}p \tag{1}$$

式(1)中 F_x 和 F_y 分别为纬向和经向的水汽输送量,p_0 取1000 hPa,p 取300 hPa。依据风向 u、v 方向,规定向柱体内(外)的水汽通量为正(负)。由以上公式计算"箱体"各边界各网格点300 hPa以下的纬向、经向水汽通量后,再进行边界积分,计算垂直于东西和南北边界的整层水汽输送通量,最后可得到流经35°—40°N,115°—122.5°E,1000—300 hPa"箱体"内的净水汽输入通量。时间积分后可得到一段时间内的累计水汽净输入量。

对于温湿能的收支,与水汽类似。应用温湿能即湿焓的收支来定量描述暴雨期间热带气旋中心附近的能量向暴雨区的远距离输送。与计算水汽的输送量类似,可得到边界上温湿能的输送通量和一段时间内"箱体"内的累计温湿能的净输入量。

$$E_x = \frac{1}{g}\int_{p_0}^{p} E_h u\,\mathrm{d}p$$
$$E_y = \frac{1}{g}\int_{p_0}^{p} E_h v\,\mathrm{d}p \tag{2}$$

式(2)中 E_x 和 E_y 分别为纬向和经向的温湿能输送量。E_h 为温湿能,g 为重力加速度,其他参量与式(1)相同。

4.4.1 有远距离热带气旋暴雨的水汽和能量收支

对山东有远距离暴雨的一组资料进行合成平均后计算的"箱体"南北和东西边界的水汽输入量表明,在山东造成远距离暴雨的热带气旋登陆后,中心附近的水汽和温湿能都大量地向北输送,绕过副高脊线输送到35°N以北的山东暴雨区。在台风登陆后6小时,通过南边界35°N的水汽流入通量迅速增大(表7),36小时达到 66.0×10^{10} kg/h。在北边界40°N为流出通量,南边界的流入通量远大于北边界的流入通量。南北边界之间的流入和流出通量差在台风登陆18小时后迅速增大,在24—48小时内,两边界之间的流入和流出通量差在 29.4×10^{10}—40.9×10^{10} kg/h,48小时以后迅速降低。说明台风中心附近的水汽在台风登陆后24—48小时输送到山东,为山东的暴雨提供了充足的水汽条件。在西边界也有水汽输入,在台风登陆后42小时达到最大 40.8×10^{10} kg/h,远小于南边界的流入。在东边界有较大的水汽流出,在台风登陆后42小时其流出通量达到 -55.6×10^{10} kg/h。说明暴雨区的水汽主要是从南边界流入,从东边界流出。由此可以证明,南边界流入的水汽与台风中心附近的水汽向北输送密切有关。

从"箱体"内的水汽收支可以看出,在台风登陆后12小时内"箱体"内的水汽为净流出,在12—48小时"箱体"内的水汽为净流入(表7),净流入量为 604.2×10^{10} kg。在18—42小时内净流入量最多,达 494.6×10^{10} kg,占总流入量的81.7%。在48小时内"箱体"中水汽的净流入量最大,达到 535.1×10^{10} kg。暴雨产生在箱体内水汽输入的高值期。说明台风中心附近丰沛的水汽在台风登陆后12小时才开始输送到山东,在48小时前后输送量达到最大。

台风中心附近的偏南气流不仅向山东输送水汽,也输送温湿能量,使得暴雨区的温湿能量升高,不稳定能量积蓄,为暴雨的产生提供有利的温湿条件。分析"箱体"南北边界的温湿能输送可见(表8),在35°N的南边界,台风登陆后6小时内为温湿能的流出,12—54小时有较强的温湿能流入,在36小时流入最强,达 231.4×10^{14} J/h。北边界40°N在12小时内为较强的流入,18—48小时有较强的流出,在36小时流出最强。在18—48小时,南边界的流入远大于北边界的流出。西边界全为流入,东边界全为流出。东边界的流出量大于西边界的流入量。说明暴雨区温湿能的输送来自于华南沿海台风中心附近温湿能的远距离输送。从"箱体"内温湿能的收支可见,在台风登陆后54小时内都为能量的净输入,在24小时的输入通量最大,达 81.1×10^{14} J/h。在18—54小时内的能量输入最多,输入量为1512.7

$\times 10^{14}$ J。从累计的净能量总输入来看,在台风登陆后 54 小时内的能量净输入达到 1945.5×10^{14} J。由此可见,台风在海南或在华南沿海登陆后西行期间,有大量的温湿能输入山东,使得山东的大气增温增湿。不仅为暴雨的产生提供了水汽,还提供了能量。

表 7 有远距离台风暴雨时"箱体"各边界水汽的流入通量和箱体内的水汽收支($\times 10^{10}$)

Table 7 The water vapor flux of every boundary of the "box" and the water vapor budget in the "box" in the cases with torrential rainfalls in Shandong

台风登陆后时间	"箱体"各边界的水汽净流入通量						"箱体"内的水汽收支		
	35°N 边界流入通量(kg/h)	40°N 边界流入通量(kg/h)	南北边界的净流入通量(kg/h)	115°E 边界流入通量(kg/h)	122.5°E 边界流入通量(kg/h)	东西边界的净流入通量(kg/h)	各时次流入通量(kg/h)	每 6 小时内的净流入量(kg)	累计的净流入量(kg)
0 小时	4.1	8.1	12.1	2.4	−28.8	−26.3	−14.2	0.0	0.0
6 小时	6.3	3.5	9.8	9.6	−25.7	−16.1	−6.3	−61.6	−61.6
12 小时	23.3	−6.3	17.1	5.3	−18.6	−13.3	3.8	−7.6	−69.2
18 小时	32.3	−12.9	19.5	19.2	−30.1	−10.8	8.6	37.3	−31.9
24 小时	52.3	−11.4	40.9	11.4	−25.0	−13.6	27.3	107.7	75.8
30 小时	53.6	−27.4	26.2	27.1	−35.0	−7.9	18.3	136.6	212.4
36 小时	66.0	−31.8	34.2	30.3	−39.2	−8.9	25.3	130.7	343.2
42 小时	58.3	−28.9	29.4	40.8	−55.6	−14.8	14.6	119.6	462.8
48 小时	41.3	−7.1	34.2	29.3	−54.0	−24.7	9.5	72.3	535.1
54 小时	20.6	−3.2	17.4	20.7	−51.2	−30.6	−13.2	−10.9	524.3
60 小时	6.8	2.6	9.5	11.2	−45.5	−34.3	−24.8	−113.9	410.3
66 小时	13.8	0.4	14.2	20.7	−30.3	−9.5	4.7	−60.5	349.8
72 小时	20.5	2.1	18.4	15.6	−22.7	−7.0	11.4	48.2	398.0

表 8 有远距离台风暴雨时"箱体"各边界温湿能的通量和"箱体"内的温湿能收支($\times 10^{14}$)

Table 8 The enthalpy flux of every boundary of the "box" and the enthalpy budget in the "box" in the cases with torrential rainfalls in Shandong

台风登陆后时间	"箱体"各边界的温湿能净流入量						"箱体"内的温湿能收支		
	35° N 边界流入通量(J/h)	40° N 边界流入通量(J/h)	南北边界的净流入通量(J/h)	115° E 边界流入通量(J/h)	122.5°E 边界流入通量(J/h)	东西边界的净流入通量(J/h)	各时次流入通量(J/h)	每 6 小时内的净流入量(J)	累计的净流入量(J)
0 小时	−1.1	143.2	142.1	174.4	−298.5	−124.1	18.0	0.0	0.0
6 小时	−7.9	138.6	130.7	208.5	−313.8	−105.3	25.4	130.3	130.3
12 小时	73.7	55.7	129.3	170.1	−272.0	−101.9	27.5	158.6	288.9
18 小时	131.9	−13.3	118.6	230.6	−328.7	−98.1	20.5	143.9	432.8
24 小时	197.0	−11.3	185.7	193.4	−298.0	−104.6	81.1	304.7	737.4
30 小时	201.7	−114.6	87.0	239.0	−299.0	−60.0	27.1	324.4	1061.8
36 小时	231.4	−166.5	64.8	280.3	−298.3	−18.0	46.8	221.7	1283.5
42 小时	194.2	−138.4	55.8	323.6	−354.3	−30.7	25.1	215.8	1499.3
48 小时	163.5	−32.5	131.0	291.2	−367.2	−76.0	54.9	240.1	1739.4
54 小时	88.4	16.4	104.8	274.9	−366.1	−91.1	13.7	206.0	1945.5
60 小时	0.4	114.4	114.8	233.7	−356.7	−123.0	−8.2	16.7	1962.1
66 小时	8.3	74.4	82.7	251.4	−326.3	−75.0	7.7	−1.4	1960.7
72 小时	61.3	19.2	80.5	239.7	−310.2	−70.4	10.0	53.2	2013.9

4.4.2 无远距离热带气旋暴雨的水汽和能量收支

山东无远距离热带暴雨时"箱体"内的水汽净流入远小于有远距离暴雨时的净流入。从表 9 可以看出,南边界 35°N 的水汽流入通量非常小,台风登陆后 12 小时内为流出,12 小时以后为较少的流入,在 36 小时净流入量最小,只有 4.0×10^{10} kg/h。40°N 的北边界几乎全为流出。在 30—36 小时,北边界的流出大于南边界的流入。由此可见在"箱体"的南边界没有较强的水汽输入。西边界全为流入,东边界全为流出,两边界之间的流入和流出差值较小。从

“箱体"内的水汽收支可见,在台风登陆后24—36小时,“箱体"内为水汽的净流出,流出量达到-74.9×10^{10} kg。48小时内“箱体"中累计的水汽净流入量为234.9×10^{10} kg,比有远距离暴雨时的累计净流入量少300.2×10^{10} kg。由此可见,在山东无远距离热带气旋暴雨时,来自于热带气旋中心附近的水汽输送非常少。

在山东无远距离暴雨时,台风中心附近温湿能向北的输送也较少。从表10可以看出,山东无远距离热带气旋暴雨时,热带气旋登陆后12小时内,“箱体"35°N的南边界为温湿能的净流出。12小时以后虽然转为流入,但在36小时内南边界的温湿能流入较小,在36小时为弱的净流出。在40°N的北边界,12小时以后全为流出。18—54小时,南、北边界

表9 无远距离台风暴雨时“箱体”各边界水汽的流入通量和“箱体”内的水汽收支($\times10^{10}$)

Table 9 The water vapor flux of every boundary of the “box” and the water vapor budget in the “box" in the cases without torrential rainfalls in Shandong

台风登陆后时间	“箱体"各边界的水汽净流入量					“箱体"内的水汽收支			
	35° N 边界流入通量(kg/h)	40° N 边界流入通量(kg/h)	南北边界的净流入通量(kg/h)	115° E 边界流入通量(kg/h)	122.5°E边界流入通量(kg/h)	东西边界的净流入通量(kg/h)	各时次流入通量(kg/h)	每6小时内的净流入量(kg)	累计的净流入量(kg)
0小时	−8.0	−12.3	4.2	40.0	−33.7	6.3	10.6	0.0	0.0
6小时	−1.5	0.8	−2.4	44.8	−43.2	1.6	−0.7	29.5	29.5
12小时	−5.2	−10.9	5.8	31.2	−34.9	−3.6	2.1	4.2	33.7
18小时	24.8	18.9	5.8	63.9	−44.1	19.8	25.6	83.3	117.0
24小时	16.6	13.9	2.7	40.8	−43.3	−2.5	0.3	77.7	194.7
30小时	6.9	18.4	−11.6	59.4	−58.5	0.8	−10.7	−31.5	163.2
36小时	4.0	5.8	−1.8	37.3	−39.2	−1.9	−3.7	−43.4	119.8
42小时	23.0	22.4	0.6	56.4	−43.6	12.8	13.3	28.9	148.7
48小时	15.0	11.0	4.0	46.6	−35.2	11.4	15.4	86.2	234.9
54小时	17.9	21.7	−3.7	63.5	−46.5	17.0	13.3	86.0	320.9
60小时	24.1	9.1	15.1	41.6	−39.2	2.4	17.5	92.2	413.1
66小时	29.3	23.4	5.9	58.9	−52.7	6.2	12.1	88.8	501.9
72小时	24.6	3.0	21.6	28.2	−42.7	−14.5	7.1	57.8	559.7

表10 无远距离台风暴雨时“箱体”各边界温湿能的通量和“箱体"内的温湿能收支($\times10^{14}$)

Table 10 The enthalpy flux of every boundary of the “box" and the enthalpy budget in the “box" in the cases without torrential rainfalls in Shandong

台风登陆后时间	“箱体"各边界的水汽净流入量					“箱体"内的水汽收支			
	35° N 边界流入通量(J/h)	40° N 边界流入通量(J/h)	南北边界的净流入通量(J/h)	115° E 边界流入通量(J/h)	122.5°E边界流入通量(J/h)	东西边界的净流入通量(J/h)	各时次流入通量(J/h)	每6小时内的净流入量(J)	累计的净流入量(J)
0小时	−69.6	117.3	47.7	325.3	−350.8	−25.5	22.2	0.0	0.0
6小时	−63.1	71.7	8.5	364.3	−388.0	−23.7	−15.2	21.2	21.2
12小时	−108.2	132.7	24.5	323.6	−365.1	−41.5	−17.0	−96.6	−75.4
18小时	56.1	−81.8	−25.7	440.3	−405.6	34.7	9.0	−23.9	−99.3
24小时	54.7	−29.8	24.8	378.6	−389.9	−11.4	13.5	67.5	−31.8
30小时	13.6	−25.4	−11.7	456.5	−463.7	−7.1	−18.9	−16.2	−48.0
36小时	−4.6	17.6	13.0	379.5	−394.5	−15.0	−2.0	−62.7	−110.8
42小时	114.6	−131.4	−16.8	447.6	−426.6	21.1	4.3	6.8	−104.0
48小时	110.7	−116.5	−5.7	434.7	−411.0	23.7	18.0	66.8	−37.2
54小时	130.6	−147.8	−17.1	490.4	−492.2	−1.9	−19.0	−3.0	−40.2
60小时	165.7	−101.0	64.7	398.3	−429.7	−31.4	33.3	42.7	2.6
66小时	202.2	−170.8	31.4	472.4	−483.4	−11.0	20.4	161.0	163.6
72小时	165.6	−64.2	101.3	348.4	−422.6	−74.2	27.2	142.8	306.4

的输入和输出通量的累计差值为-39.2×10^{10} kg/h,为净流出;在西边界全为流入,在东边界全为流出。在36小时内,西、东边界的温湿能通量差为负值,也为净流出。从"箱体"内的温湿能收支情况可以看出,在台风登陆后36小时内,"箱体"内为能量的净流出。36小时后虽有能量的流入,但量值较小。说明登陆台风中心附近的温湿能没有被传输到北方"箱体"内,位于"箱体"内的山东无暴雨天气产生。

5 结 论

(1) 在华南沿海登陆和活动的热带气旋与西风带系统和副热带高压系统相互作用,可在山东产生暴雨和大暴雨天气。山东的这种远距离热带气旋暴雨年均2.5次,7月最多。这类暴雨的范围广、雨量大,强度强。70%为大暴雨。出现暴雨的时间比热带气旋登陆时间滞后。

(2) 在华南沿海登陆的热带气旋其中心附近的偏南风急流对山东的远距离台风暴雨起重要作用。在山东有远距离暴雨的热带气旋登陆时中心东部都有一股东南风或偏南风急流指向内陆,而无远距离暴雨的热带气旋登陆时,43.2%在华东或华南沿海为偏东风或东北风。

(3) 统计分析表明,热带气旋在华南沿海登陆和活动期间,山东有、无远距离台风暴雨的西风带环流有明显不同。有暴雨时,山东500 hPa为西风槽前偏南气流,850—700 hPa伴有低值影响系统,为偏南风和气旋性环流控制。无暴雨时,山东为槽后脊前的西北气流、东北气流、高压脊、反气旋性环流或副高控制。

(4) 副高的位置与山东有无远距离热带气旋暴雨密切相关,山东有远距离热带气旋暴雨时,低层850 hPa副高脊线主要在26°—30°N,西伸脊点集中在106°—120°E。无远距离热带气旋暴雨时;副高控制山东时较多。

(5) 合成分析表明,山东的远距离热带气旋暴雨与热带气旋中心附近的偏南风急流、中纬度西风槽和副热带高压的相互结合密切相关。在山东有远距离暴雨的热带气旋,在登陆时中高纬度中低层西风带环流偏北,且较弱。500 hPa西风带中的偏北气流与副高边缘的偏南气流在山东境内的37°N附近汇合;热带气旋登陆后,其中心东部中低层的偏南风急流向北伸展,绕过副高脊线直达山东。低空偏南风急流在台风中心附近至山东之间建立起水汽通道,暴雨产生在低空急流的左前方。

(6) 在山东无远距离暴雨的热带气旋登陆时,中高纬度500 hPa的西风带环流强,且偏南。西风带中的偏北气流与副高边缘的偏南气流在35°N以南汇合。台风登陆后西行期间,西风带变得平直。台风中心附近的东南风急流的偏南风分量较小,维持在30°N以南的地区。

(7) 计算山东上空"箱体"内的水汽和温湿能的收支可见,有远距离热带气旋暴雨时,台风登陆12—48小时,有来自于35°N南边界的大量的水汽和温湿能的净流入。山东无远距离热带气旋暴雨时,其南边界的水汽和温湿能的流入量非常小。由此可以证明山东的暴雨与远距离的台风中心附近的水汽和温湿能的输送有密切关系。

References

Chao Gangfeng, Zhang Shanjun, Zhu Guanzhong. 1988. Weather Analysis and Prediction of Shandong (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 165-168

Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years (in Chinese). Chinese J Atmos Sci, 25(3):420-432

Chen Lianshou. 2003. An overview on the impact of interaction between low-mid latitude circulation on rainfall and tropical cyclone behavior. Paper Presented at the 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 29 May—2 June. Fort Lauderdale. FL. USA. 63

Chen Zhongming, Huang FuJun, He Guangbi. 2002. A case study of interactions between the tropical cyclone and the southwest vortex. Part I:Diagnostic analysis (in Chinese). Chinese J Atmos Sci, 26(3): 352-360

Ding Zhiying, Chen Jiukang. 1995. Diagnosis, comparative analysis and simulation of typhoons with different rainfall intensities. J Nanjing Institute of Meteor(in Chinese),18(2):234-241

Ding Zhiying, Zhang Xinqiang, He Jinhai, et al. 2001. The study of storm rainfall caused by interaction between the non-zonal high level jet streak and the far distant typhoon. J Tropical Meteor (in Chinese), 17(2):144-154

Duan Yihong, Yu Hui. 2005. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone. Acta Meteor Sinaca(in Chinese), 62(5):636-645

Gong Dianli, Wang Qing, Liu Shijun. 2006. The numerical analysis about water vapor budget and transform during a spring heavy rain process in Shandong region. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11(11):109-118

Lei Xiaotu, Chen Lianshou. 2001a. An overview on the interaction between tropical cyclone and mid-latitude western systems. J Tropical Meteor (in Chinese), 25(3):420-432

Lei Xiaotu, Chen Lianshou. 2001b. Tropical cyclone landfalling and its interaction with mid-latitude circulation systems. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 59(5):602-615

Li Jiangnan, Gong Zhipeng, Wang Anyu, et al. 2004. Progress in the study of typhoon rainstorm in recent ten years. Tropical Geography(in Chinese), 24(2):113-117

Li Ying, Chen Lianshou. 2005. Numerical study on impacts of boundary layer fluxes over wetland on sustention and rainfall of landfalling tropical cyclone. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 62(5):683-693

Liu Ming, Chen Jiukang. 1996. A numerical test of 9012 Typhoon Rainstorms//85－906 issue Compilers. Typhoon Science, Operational Experiments and Synoptic and Dynamics Theory Studies (Fourth Volumes)(in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 97-100

Luo Zhexian. 2005. Typhoon self-organization in a multi-scale coexpisting system. Acta Meteor Sinica(in Chinese), 62(5):672-682

Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2000. Diagnoses and simulations of typhoon (Tim) landing and producing heavy rainfall in China. Sci Atmos Sinica (in Chinese), 24(2):223-237

Sun Jianhua, Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by "9608" typhoon. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 64(1): 57-71

Tao Zuyu, Tian Baijun, Huang Wei. 1994. Asymmetry structure and torrential rain of landing typhoon 9216. J Tropical Meteor (in Chinese), 10(1):69-77

Wang Xiuqing, Jiang Xingyu. 1998. An analysis of 9711 typhoon rainstorms and characteristics circulation. Jilin Meteor Quarterly (in Chinese), (10):13-15

Wu Qishu, Shen Tongli, Su Yinlan, et al. 2006. Water vapor analyses and experiments of 0010 typhoon. Sci Meteor Sinica (in Chinese), 26(4):384-391

Yang Dasheng, Liu Yubin, Liu Shigua. 1983. Dynamic Meteorology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press. 296-304

Yu Zhenshou, Liao Shenshi, Huang Kehui, et al. 2005. A numerical simulation study of typhoon Rananim. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 63(6): 903-914

Zhang Jingzhen, Hou Shumei, Zhang Hongwei, et al. 2000. The effect of the interaction between mid and low latitude systems on a heavy rain in Shandong. Meteor Mon (in Chinese), 26 (5):36-39

Zhang Shanjun, Zhu Guanzhong, Chao Gangfeng. 1995. Study on enhanced from onland tropical cyclones moving northward in North China. J Nanjing Institute of Meteor(in Chinese), 18 (3):455-459

Zhu Hongyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 24(5):669-675

Zhu Qiangen, Li Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2005. The Theory and Method of Weather (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 637-643

附中文参考文献

曹钢锋,张善君,朱官忠. 1988. 山东天气分析与预报. 北京:气象出版社, 165-168

陈联寿,孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学, 25 (3):420-432

陈忠明,黄福均,何光碧. 2002. 热带气旋与西南涡相互作用的个例研究 I:诊断分析. 大气科学, 26(3):352-360

丁治英,陈久康. 1995. 不同雨强台风的诊断对比与数值试验研究. 南京气象学院学报, 18(2):234-241

丁治英,张兴强,何金海等. 2001. 非纬向高空急流与台风远距离中尺度暴雨的研究. 热带气象学报, 17(2):144-154

端义宏, 余晖. 2005. 热带气旋强度变化研究进展. 气象学报, 62 (5):636-645

龚佃利,王庆,刘诗军. 2006. 山东一次春季暴雨过程的水汽收支和降水转化数值分析. 气候与环境研究, 11(1): 109-118

雷小途,陈联寿. 2001a. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究. 气象学报, 59(5):602-615

雷小途,陈联寿. 2001b. 热带气旋与中纬度环流系统相互作用的研究进展. 热带气象学报, 17(4):452-461

李 英, 陈联寿. 2005. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验. 气象学报, 62(5):683-693

李江南,龚志鹏,王安宇等. 2004. 近十年来台风暴雨研究的若干进展与讨论. 热带地理, 24(2):113-117

刘铭, 陈久康. 1996. 9012 号台风暴雨的数值试验 // 85-906 项目组. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册). 北京:气象出版社, 9-100

罗哲贤. 2005. 多尺度系统中台风自组织的研究. 气象学报, 62(5): 672-682

孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. 2006. "9608"号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究. 气象学报, 64(1):57-71

孙建华,赵四雄. 2000. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究. 大气科学, 24(2):223-237

陶祖钰,田佰军,黄伟. 1994. 9216 号台风登陆后的不对称结构和暴雨. 热带气象学报, 10(1):69-77

汪绣清,姜兴玉. 1998. 9711 号台风暴雨及其环流特征分析. 吉林气象, (10):13-15

吴启树,沈桐立,苏银兰等. 2006. 2000 年第 10 号台风的水汽分析与试验. 气象科学, 26(4): 384-391

杨大升,刘鱼滨,刘式适. 1983. 动力气象学. 北京:气象出版社, 296-304

余贞寿, 廖胜石, 黄克慧等. 2005. 0414 号台风"云娜"的数值模拟. 气象学报, 63(6):903-914

张经珍,侯淑梅,张洪卫等, 2000. 中低纬度系统相互作用对山东"99.8"大暴雨的影响. 气象, 26(5):36-39

张善君,朱官忠,曹钢锋. 1995. 华北地区登陆北上热带气旋的暴雨增幅研究. 南京气象学院学报, 18(3):455-459

朱洪岩,陈联寿,徐祥德. 2000. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究. 大气科学, 24(5):669-675

朱乾根,林锦瑞,寿绍文等. 2005. 天气学原理和方法 (第三版),北京:气象出版社,637-643