

闫军,王黎娟,纪晓玲,等.影响宁夏的热带气旋远距离暴雨特征和预报概念模型[J].热带气象学报,2020,36(1):32-41.

文章编号:1004-4965(2020)01-0032-10

影响宁夏的热带气旋远距离暴雨特征和预报概念模型

闫军^{1,2,3}, 王黎娟¹, 纪晓玲^{2,3}, 薛宏宇³, 谭志强³, 任小芳³, 邵建^{2,3}

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室/宁夏回族自治区气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002; 3. 宁夏回族自治区气象台, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 利用JMA最佳TC路径资料和NCEP/NCAR再分析资料,普查了1961—2010年宁夏的暴雨个例,并对影响宁夏的热带气旋远距离暴雨进行了统计和合成分析。结果表明:宁夏各测站远距离暴雨日数在暴雨总日数中普遍占比达30%~46%,是宁夏暴雨类型里十分重要的一类。远距离暴雨主要集中在8月,较宁夏暴雨气候多发期推迟10~20天。台湾岛及其以东洋面和海南岛附近是宁夏产生远距离暴雨的热带气旋高频影响关键区,在两个TC高频影响区域之间还存在一个少台风甚至无台风影响的海域。进一步诊断分析表明,热带气旋、中纬度槽(涡)、副热带高压、水汽通道及高空急流是产生远距离暴雨的主要影响系统。根据诊断特征将远距离暴雨分为两类,揭示其环流差异主要体现在热带气旋和副高位置、水汽输送通道及海平面气压场,并在此基础上归纳了两类远距离暴雨的预报概念模型。

关键词: 热带气旋;远距离暴雨;统计特征;预报概念模型;宁夏

中图分类号: P444

文献标志码: A

Doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2020.004

1 引 言

热带气旋引起的降水及其路径预报方法一直是热带气旋研究的主要内容之一^[1-3]。中国近海台风活动不但能够直接在东南沿海地区产生暴雨^[4-6],而且能通过中低纬系统的相互作用,直接或间接地造成北方内陆地区极端暴雨天气过程。台风暴雨可分为台风眼壁暴雨、台风螺旋雨带或外围降雨、台风倒槽降雨、台风内切变线暴雨、台前飚线暴雨、遥远降雨即台风远距离暴雨6部分^[7-8]。2007年陈联寿^[9]提出了台风远距离降雨的定义:(1)降雨发生在台风的范围之外;(2)降雨与台风存在着内在的物理联系。该降雨的产生与台风右侧东南气流向中纬度槽前输送水汽有关,也可能

与台风作为大气中的一个扰动源向前传播的波动有关。Cote^[10]给出了另一种远距离暴雨的定量判定条件:(1)降水区雷达反射率 ≥ 35 dBZ,降水持续时间超过6 h;(2)24小时降水量 ≥ 100 mm;(3)降水区与台风环流之间在雷达图像上有明显的界限且二者之间存在深厚的水汽通道相联结。Cote的定义缺少台风与其他系统相互作用的描述,且对于我国西北内陆干旱地区而言,24小时降水量超过100 mm这一条件显然是不适宜的,因此有必要结合西北的强降水气候特征,对影响西北的热带气旋远距离暴雨过程的选取标准作出相应的调整。

一些研究表明,近海台风活动与我国西北地区东部降水关系密切。丛春华等^[11]指出,我国的热带气旋远距离暴雨事件在空间分布上存在两个

收稿日期:2019-07-15;修订日期:2019-11-08

基金项目:中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2015-086);国家自然科学基金项目(41975085);国家自然科学基金地区科学基金项目(41865008);宁夏回族自治区重点研发项目(2018BEG03002)共同资助

通讯作者:王黎娟,女,湖北省人,教授,主要从事旱涝机理方面的研究。E-mail: wljfw@163.com

高频区,分别位于环渤海地区和川陕交界处。卓嘎等^[12]统计分析了台风活动与我国降水的关系,发现台风活动与青藏高原东侧年降水量之间的联系最显著。据谢金南等^[13]研究,台风活动与西北区东部旱涝存在正相关联系,少台风活动年青藏高原东北侧干旱,多台风活动年高原东北侧多雨。姚宗国等^[14]研究发现台风有利于西北地区东部降水的产生,敏感区位于河套;并分析了多台风年和少台风年环流形势及其对西北地区东部降水影响的差异。侯建忠等^[15]发现位于西北内陆的陕西地区,近海台风活动与重大洪灾事件关系极为密切,相关率达90%。由于研究对象范围及所用资料与方法的不同,上述结论中台风活动与降水统计最密切的区域大体接近但不完全一致,基本可以确定的是,位于青藏高原东北侧的西北地区东部一带,降水事件与台风活动关系是显著的。

除山东省^[16]、陕西省^[15, 17-21]对影响当地的热带气旋远距离暴雨进行了相关统计工作外,以往的研究多为各省预报业务人员针对当地个例的诊断分析或数值模拟为主,系统研究较少,且单个个例诊断分析难以给出完整的预报概念模型供预报员参考。宁夏气象工作者^[22-26]在分析宁夏近年来的暴雨过程中发现,20020608、20060714、20080730、20130620等暴雨过程中均存在台风与中纬度天气系统的相互作用,业务一线预报人员也普遍认同宁夏出现暴雨过程时,我国近海往往有台风活动这一预报经验。不仅相当部分的宁夏暴雨个例我国近海有台风活动,在总结暴雨预报概念模型工作中调查发现,暴雨发生时台风中心位置分布似乎存在着一定的规律性,因此,有必要系统研究我国近海热带气旋与宁夏强降水事件之间的内在联系,为提高和改进宁夏此类天气预报水平和方法提供参考依据。

2 资料与方法

使用的主要资料包括1961—2010年以来的NCEP 2.5°×2.5°再分析资料(间隔6h),宁夏常规观测站点日降水数据和JMA最佳TC路径资料。热带气旋研究区域为105~130°E,15~30°N。

由于宁夏地处西北内陆干旱地区,严格按照日降水量≥50 mm将导致研究样本偏少,为此作如

下定义:同一个降水区不少于5个测站的日降水量≥25 mm即作为一个暴雨日。

本文参考陈联寿^[9]、Cote^[10]、丁治英等^[27]给出的远距离暴雨定义,综合考虑中低纬系统相互作用、水汽输送通道及宁夏降水气候特点三个因素,给出宁夏远距离暴雨的选取标准:(1) 同一个降水区不少于5个测站的日降水量≥25 mm;(2) 降水在台风环流之外;(3) 需有产生降水的中纬度天气系统配合;(4) 降水区与热带气旋之间在850 hPa或700 hPa存在明显的水汽通道。

3 远距离暴雨统计特征

按照同一个降水区不少于5个测站日降水量≥25 mm的标准,1961—2010年宁夏共发生区域性暴雨110次,其中有台风在西太平洋活动或在我国沿海陆地登陆的多达83次。按照上文定义的宁夏远距离暴雨选取标准,满足标准的过程共计43次,占有暴雨过程的39%。

3.1 远距离暴雨的空间分布特征

1961—2010年,影响宁夏的热带气旋远距离暴雨累积日数全区平均为14天,从空间分布图(图1a)可看出,远距离暴雨事件自东南向西北呈现递减趋势,其中,东南部地区最多,有14~24天,位于宁夏最南端的涇源站最多达24天;而宁夏北部远距离暴雨日数最少,仅有6~8天;中部地区则有9~14天。

由于远距离暴雨日数的空间分布特征与宁夏暴雨的气候空间分布特征基本一致,为了将远距离暴雨的空间分布特征从暴雨气候特征中抽离出来,我们计算了逐个测站远距离暴雨日数在总暴雨日中的百分率占比,从而得到远距离暴雨的百分率占比分布图(图1b)。可看出,图1b中的空间分布与图1a中的特征有明显的区别,全区空间分布南北差异并不十分显著。除了宁夏北部有两站不足30%以外,其他地区远距离暴雨日数在暴雨总日数中的占比普遍在30%~46%,由此也可看出远距离暴雨在宁夏暴雨类型里是十分重要的一类。分析图1b表明,远距离暴雨在暴雨中占比最大的区域位于宁夏东部区域和中部偏西地区,其中最大位于宁夏东部的麻黄山站,达到46%。

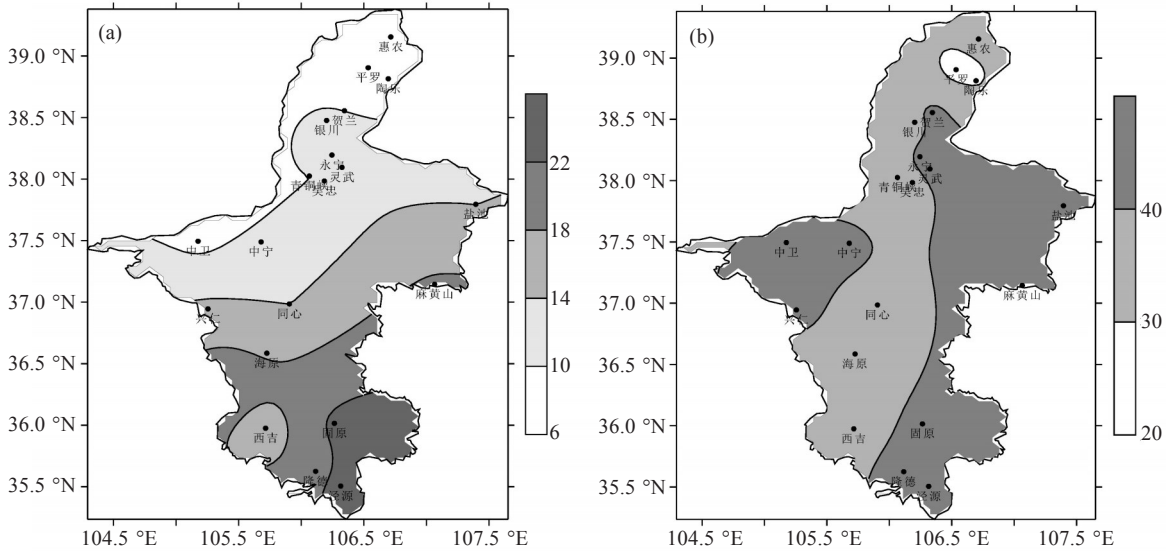


图1 影响宁夏的热带气旋远距离暴雨累积日数空间分布(a,单位:日)及其在暴雨日数中的百分率占比分布(b,单位:%)

3.2 远距离暴雨的时间变化特征

图2为宁夏远距离暴雨过程日数逐旬分布图,全年中最早的远距离暴雨出现在6月8日(1970年),最晚出现在9月27日(1996年)。远距离暴雨7月下旬开始逐渐增多,主要集中发生在8月,其中8月下旬发生次数最多,进入9月后次数明显减

少。宁夏暴雨具有明显的季节变化特点,7月下旬和8月上旬发生次数最多^[28],而远距离暴雨多发期较之推迟10~20天,这主要是因为8月无论从台风影响的范围以及台风造成的降水量来看,均是影响我国最严重的月份^[29]。

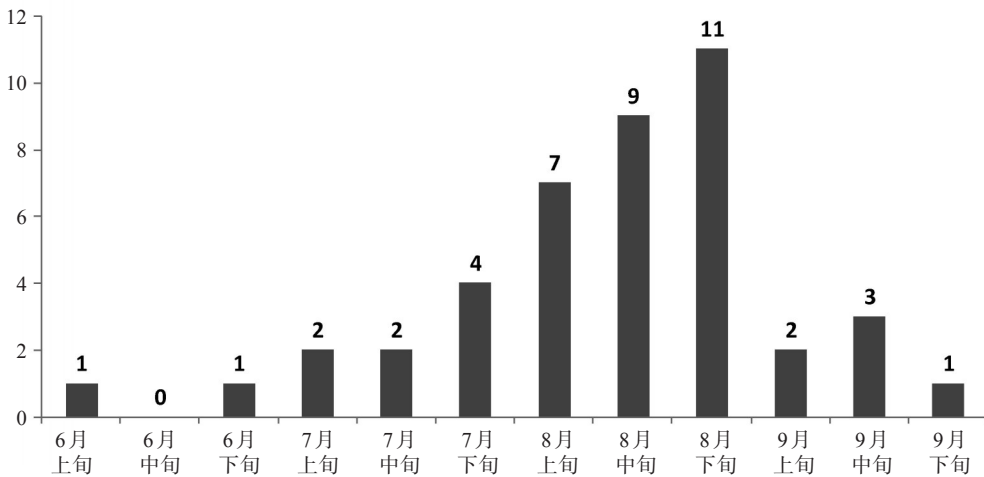


图2 影响宁夏的热带气旋远距离暴雨逐旬分布 单位:日。

3.3 远距离暴雨热带气旋中心位置分布特征

宁夏发生远距离暴雨时,热带气旋中心的位置分布如图3a所示,热带气旋主要分布在105~130°E,15~30°N的近海洋面上,最北可到达黄海海域。并非热带气旋深入内陆距离宁夏越近越容易产生远距离暴雨,大部分暴雨过程发生时,热带气旋位于近海洋面上,仅有16%的远距离暴雨发生在热带气旋深入内陆之后,且产生远距离暴

雨时热带气旋的中心位置多位于江南中南部和华南西南部,深入内陆最远的产生远距离暴雨的热带气旋曾到达四川盆地南侧。上述深入内陆后才产生远距离暴雨的热带气旋路径汇总如图3b所示,主要分为两支优势路径,一支从台湾附近登陆、以西北偏西路径进入内陆,另一支从广东省登陆、以西北路径进入内陆,特别是广东省登陆这支往往可深入更远的距离。

远距离暴雨发生时,热带气旋最明显的分布特征是,存在两个较集中的分布区域(图3a绿色圆圈所示)和一个少TC甚至无TC的区域(图3a红色圆圈所示)。其中,分布最多的区域位于 $120 \sim 130^{\circ}\text{E}$, $20 \sim 28^{\circ}\text{N}$ 台湾海峡和台湾以东洋面,其次位于 $105 \sim 115^{\circ}\text{E}$, $18 \sim 23^{\circ}\text{N}$ 的海南岛周边洋面及沿海陆地,此区域热带气旋个数略少于台湾岛处,但位置分布更加集中,以海南岛为中心 300 km 半径范围内分布最密集。另外,在上述两个集中区域之间,在广东东部沿海至菲律宾西北侧之

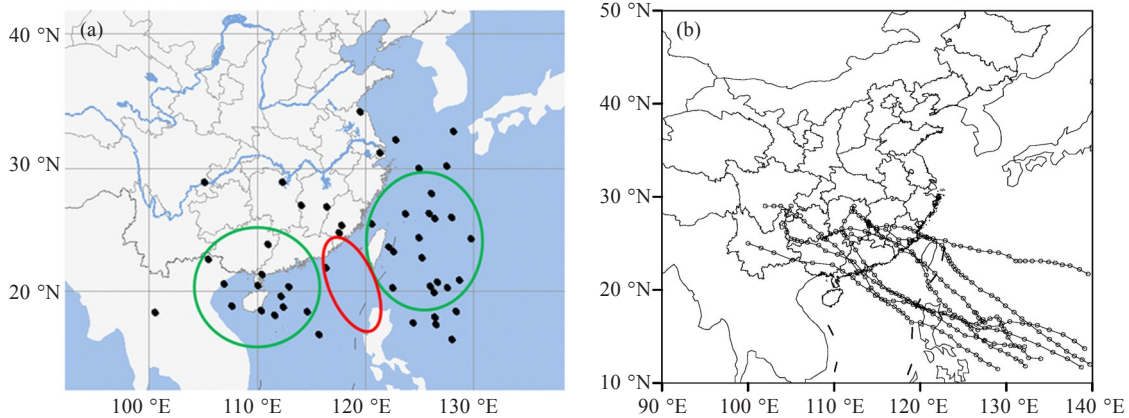


图3 宁夏发生远距离暴雨时热带气旋中心的位置分布(a),深入内陆后产生远距离暴雨的热带气旋路径汇总图(b)
a中黑点表示TC中心位置,绿色圆圈表示多TC影响区域,红色圆圈表示少TC影响区域。

4 远距离暴雨合成分析

按照上述宁夏产生远距离暴雨时近海热带气旋的两个集中分布区域分类,分别考察其环流形势特征,分析表明,两种类型产生远距离暴雨的主要影响天气系统,如热带气旋、西太平洋副热带高压(以下简称副高)、西风槽、低空急流等的强度和空间位置分布上有较显著的差异,因此,有必要将两类远距离暴雨分别加以讨论并总结其异同点,这将对建立针对此类暴雨过程预报有参考价值的概念模型有较大帮助。

为便于讨论,我们将热带气旋集中分布在台湾东侧区域的远距离暴雨称为“Ⅰ类”,而将分布在海南岛附近区域的称为“Ⅱ类”。Ⅰ类选取的暴雨个例为:19610927、19780813、19850824、19940819、19960727、19960731、20010918、20060714;Ⅱ类选取的暴雨个例为:19640814、19730824、19940624、19950828、20010726、20030825。

间的洋面上是一个热带气旋对宁夏暴雨影响很少的海域,在所有远距离暴雨样本中,仅有1例位于该区域中,在丛春华等^[11]研究川陕地区的远距离暴雨给出的TC位置分布图上可看到相似的特征。

上述热带气旋中心位置分布统计特征表明,导致宁夏出现远距离暴雨时的热带气旋的确存在明显的规律性,类似于寒潮天气过程冷高压影响关键区的概念,台湾岛及其以东洋面和海南岛附近是宁夏产生远距离暴雨的热带气旋影响的关键区。

4.1 环流特征分析

4.1.1 Ⅰ类环流特征

200 hPa合成场上(图4a), 30°N 附近我国大陆为庞大的南亚高压所控制,高压北侧 40°N 一带有显著的高空急流,宁夏位于高压东北侧的反气旋辐散区。500 hPa(图4b),热带气旋位于台湾岛附近,处于副高南侧,副高主体位于黄海海域,副高脊线到达 33°N 附近,一直延伸至我国西南地区,平均西风槽线位置位于 100°E 附近,宁夏处于平均西风槽前与副高外围 586 dagpm 等值线之间。考察参与合成的逐个样本发现,热带气旋往往导致副高出现明显的“形变”,海上副高主体呈东-西向带状分布,而伸入大陆部分的高压脊线则被热带气旋“挤压”成东北-西南向,从而使得副高西侧从青藏高原到河套表现为大范围的西南气流,几乎每个样本均有此特征,只是在副高强度上各样本间存在一定差异。中纬度槽多以西来低槽影响为主,不同合成样本之间槽的强度差别较大,强槽可向南伸至 30°N 附近,弱槽则表现为仅仅是

西南风气流中的弱波动,因而平均场上表现出来是一经向度不大的浅槽,样本间中纬度槽的位置差异不大,与平均槽线位置基本一致,位于100°E附近。个别样本,如“20060714”宁夏北部极端暴雨,影响低槽并非从宁夏西侧东移而来,而是东北低压槽及冷锋的“尾部”移至河套地区触发所致。700 hPa副高主体位置与500 hPa相近,但副高控制范围明显“东缩”,宁夏处于低值区或鞍型场环

流下,这种环流下往往有利于高原上低涡的发展东移。海平面气压场宁夏处于西侧冷空气和河套低压倒槽之间锋面附近区域。低空急流(图4c、4d)方面,Ⅰ类700 hPa急流有两种路径分布,一支从四川沿高原边缘进入河套,另一支由台风北侧东南气流直接输送至河套,因此合成图中700 hPa表现出两支急流带。平均场上850 hPa急流最清楚,即从台风外围东南气流直接进入河套地区。

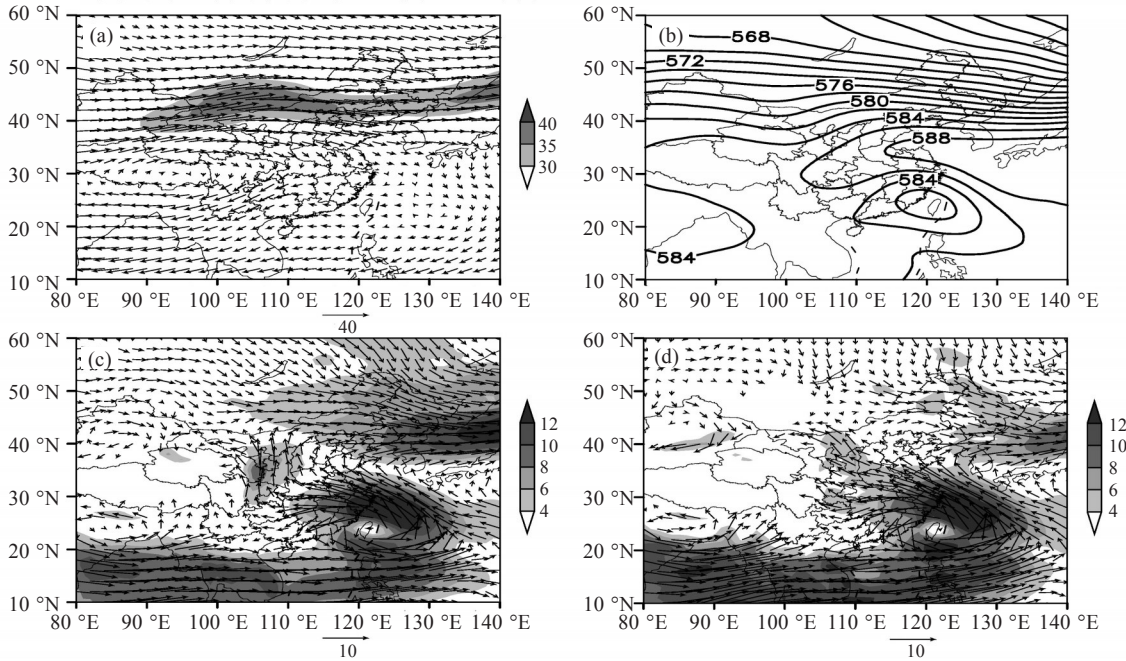


图4 Ⅰ类远距离暴雨环流合成图 a. 200 hPa 风场;b. 500 hPa 等压面位势高度场(等值线,单位: dagpm); c. 700 hPa 风场;d. 850 hPa 风场。箭头表示风矢,阴影为等风速填色,单位:m/s。

4.1.2 Ⅱ类环流特征

200 hPa合成场中(图5a),40°N一带为显著西风急流,急流核位于河套北部。500 hPa(图5b)热带气旋中心位于海南岛附近,处于副高西南侧;副高脊线到达30°N,呈东西向延伸至四川盆地附近,平均西风槽线位置位于105°E附近,宁夏受副高西北侧西南气流控制。700 hPa副高主体位置与500 hPa相近,高原东侧为低压环流,宁夏位于副高与高原低压环流之间,受显著偏南气流控制。海平面气压场我国西南地区至西北地区东部为大范围低压槽区控制,冷空气强度很弱,主要以扩散冷空气形式影响宁夏。700 hPa和850 hPa低空急流(图5c、5d)位置基本一致,由台风北侧东南气流或偏南气流直接输送至河套,但从强度来看,700 hPa急流强度更强。

对比分析两种类型远距离暴雨环流特征,Ⅰ类与Ⅱ类500 hPa上均表现为热带气旋-西太副高-中纬度槽(低涡)三者之间的相互作用;低层均有热带气旋外围低空急流向河套地区输送水汽。

4.1.3 Ⅰ类与Ⅱ类环流特征异同点

Ⅰ类与Ⅱ类不同点主要表现在以下几个方面:(1) Ⅰ类200 hPa西风急流和南亚高压脊线位置较Ⅱ类偏北3~5个纬距;(2) 由于热带气旋位置差异,两种类型中副高位置有较大差异,Ⅰ类副高较Ⅱ类位置偏北,且西脊点偏西;500 hPa Ⅱ类平均西风槽位置较Ⅰ类偏东5个经距左右;(3) 海平面气压场上,在蒙古国境内,Ⅰ类为冷高压控制,而Ⅱ类却为大范围低压环流;Ⅰ类中影响宁夏的锋面系统比较清楚,而Ⅱ类冷空气弱,为扩散冷空气形式影响;(4) Ⅰ类中低空急流700 hPa有两种分布路径,850 hPa低空急流最强;而Ⅱ类700 hPa和850 hPa只有一条一致的路径,700 hPa急流强

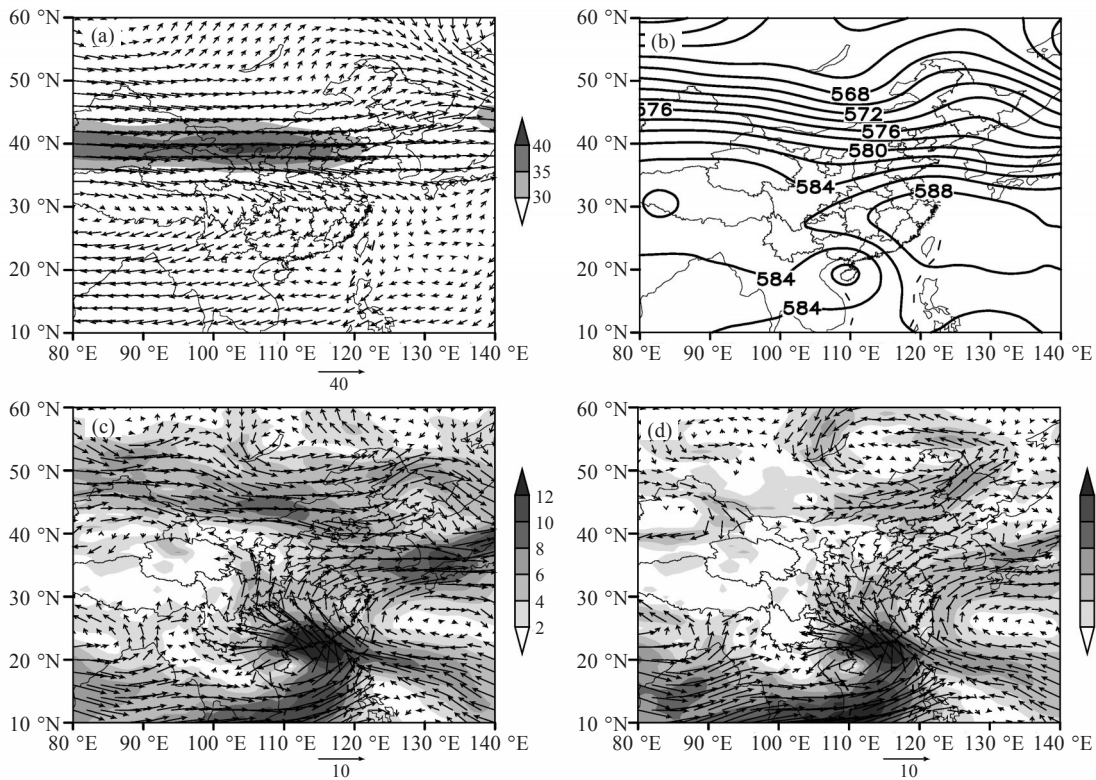


图5 如图4,但为II类远距离暴雨环流

度最强。

4.2 水汽输送特征

水汽输送是形成远距离暴雨的一个重要因素,远距离暴雨过程中水汽通道的不同指向与降水区的位置关系密切^[27]。宁夏深处内陆,处于夏季风影响区的边缘,强降水的发生需要依靠明显的水汽输送,一般水汽输送往往是依靠副高西北侧偏南气流来提供,而近海热带气旋的参与加强了这一水汽输送机制,一方面使得副高位置更偏北一些,另一方面它加强了副高边缘偏南气流的强度,这两方面的因素都促使水汽能大量地进入

内陆从而产生可观的降水,这也是宁夏的热带气旋远距离暴雨在所有暴雨类型中占据很大比重的原因之一。

分析I类和II类整层水汽通量(图6a、6b)发现,两种类型中均存在明显的从热带气旋东侧指向宁夏的水汽输送通道。不同点主要表现在水汽输送的源地和路径的区别。I类水汽源地来自台湾附近洋面及东海,以偏东南气流输送为主;II类水汽源地主要来自南海,以偏南气流输送为主。另外,I类热带气旋东侧水汽通量及向宁夏输送水汽的强度较II类更强。

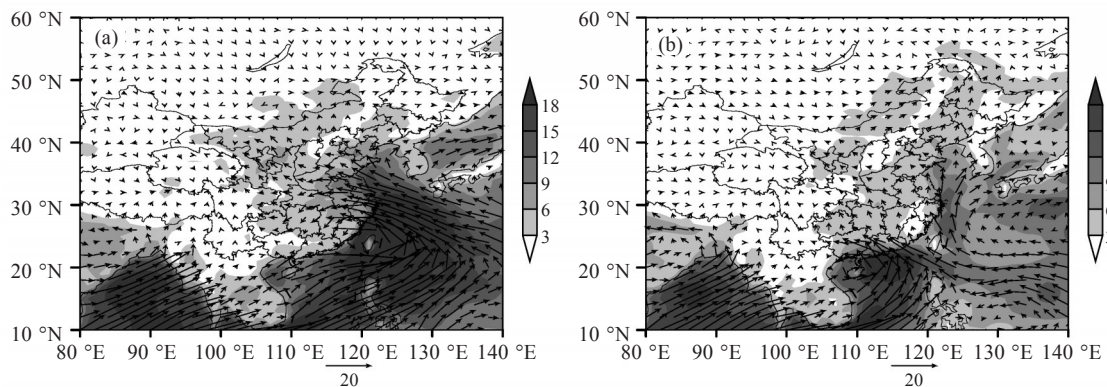


图6 I类(a)、II类(b)地面至300 hPa的水汽通量垂直积分合成图 阴影,单位: $10^6 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{cm})$ 。

4.3 散度场特征

合成样本中远距离暴雨落区多位于宁夏中南部,虽然宁夏地域面积相对较小,但不同样本间暴雨空间分布仍存在着差异,加之散度场量级很小,对于水平风场的变化十分“敏感”,且辐散辐合区域的水平尺度往往较小,因此水平散度的合成平均场特征不能着眼于“局部”,只能根据影响系统的空间位置作大致分析。

两类远距离暴雨过程对流层高、低层的水平散度合成场分布如图7所示,在图7a、7b和图7e、7f中,热带气旋在低层850 hPa存在辐合区,在高层200 hPa对应有辐散中心;远距离暴雨区主要分布在宁夏中南部,850 hPa上与暴雨相关的中纬度槽(涡)及切变线附近对应有负散度中心,其上空200 hPa为正散度区域,大致位于高空西风急流入口区南侧;在暴雨区与热带气旋之间,特别是热带气旋北侧至副高西侧一带,在850 hPa存在较明显的正散度区域,在200 hPa高空与之对应的是南亚

高压东部脊线附近,存在明显的负散度中心。上述分析能够看出,远距离暴雨区附近、副高及热带气旋三者所在区域的平均水平散度分布大体呈现低层负、正、负,高层正、负、正、正、正、正的分布特征,暴雨区与热带气旋区域对应上升运动,而副高西侧为下沉运动,这三者之间可能形成垂直环流,来自热带气旋与暴雨区的上升气流,其中一部分在高层分别向南亚高压脊线方向汇合,使得该区域质量堆积气流下沉(这在图7f表现得尤为明显),该区域下方对应为副热带高压西侧,这种垂直环流可以促进副高的稳定维持或西伸加强;此外,200 hPa暴雨区附近的气流辐散将导致低层气压降低,南亚高压东部脊线区域的气流辐合使得低层气压升高,从而加大了低层副热带高压西侧与暴雨区之间的气压梯度,使副高西侧偏南气流强度得以维持与加强,同理,在热带气旋与副高之间也存在着类似的相互作用,这将有利于水汽与能量从热带气旋向远距离暴雨区输送。

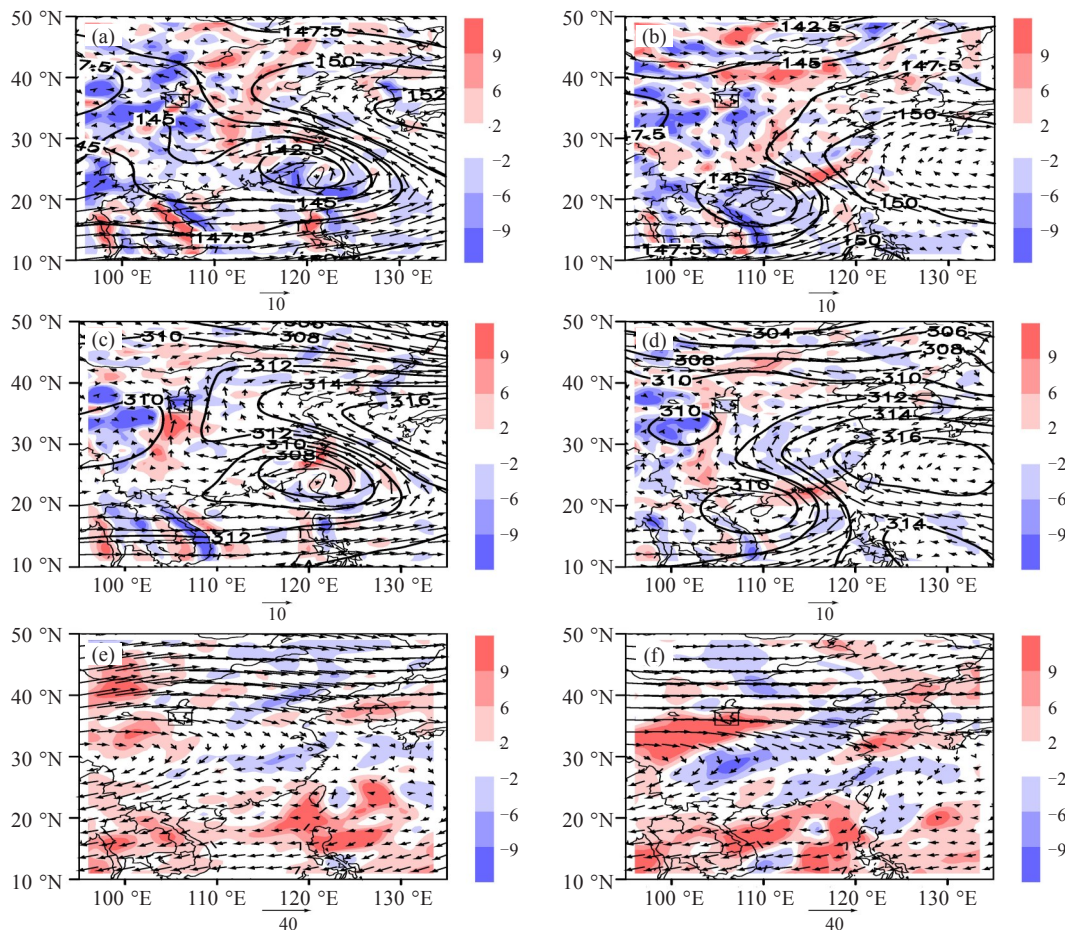


图7 I类(左列)和II类(右列)远距离暴雨850 hPa(a、b)、700 hPa(c、d)、200 hPa(e、f)散度场(阴影,单位: 10^{-6}s^{-1}),水平风场(矢量,单位: m/s)以及位势高度(等值线,单位: dagpm)合成分析 矩形方框代表远距离暴雨区域。

700 hPa 是宁夏暴雨预报分析中十分重要的特征层,这是因为在多数暴雨过程中,700 hPa 上暴雨影响系统以及动力、热力特征往往表现得最清楚。在图 7c、7d 中,暴雨区位于副高西侧,低压环流东侧,700 hPa 为明显的散度辐合中心,这是中纬度低涡、切变线及副高西侧偏南低空急流共同作用的结果。

5 远距离暴雨预报概念模型

综合以上主要研究结论,根据 I 类和 II 类影响宁夏的远距离暴雨典型过程,概括出两类暴雨

过程的预报概念模型(图 8):两类过程均包含热带气旋、中纬度槽(低涡)、副高和水汽通道、高空急流等主要影响系统,但空间配置有所区别,除了热带气旋所在位置的区别之外,主要差异表现在副高脊线位置 I 类比 II 类更偏北;低空急流 II 类在 700 hPa 和 850 hPa 急流位置基本一致,强度上 700 hPa 相对更强,而 I 类 850 hPa 低空东南风急流即热带气旋北侧那一支强度最强,但 700 hPa 低空急流一部分个例和 850 hPa 一致,另一部分则往往来自云贵高原地区的偏南风急流;冷空气方面, I 类冷空气较清晰,有明显的冷锋,而 II 类主要以扩散冷空气形式影响。

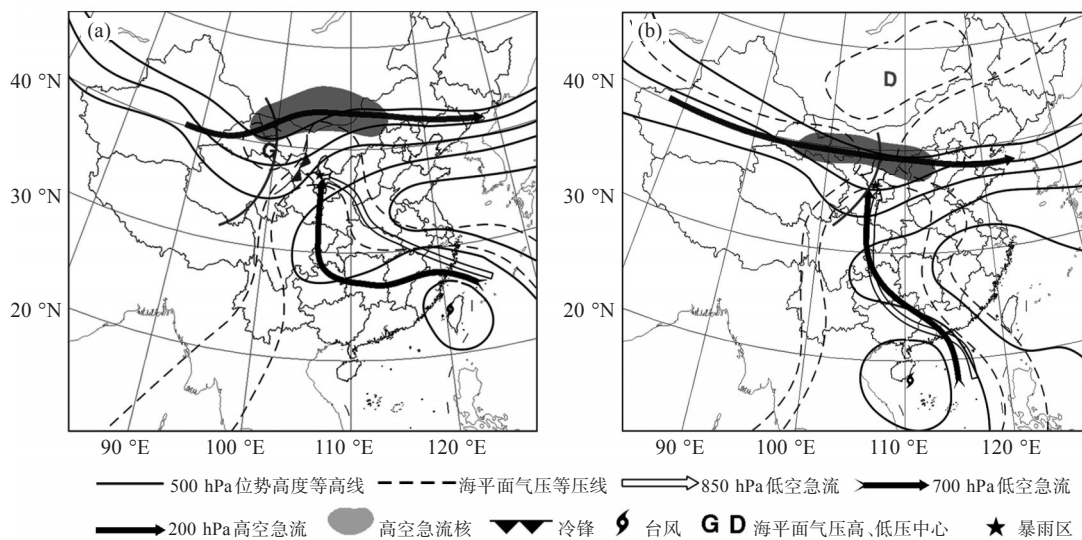


图 8 I 类(a)、II 类(b)影响宁夏的热带气旋远距离暴雨预报概念模型

6 结果与讨论

本文利用 JMA 最佳 TC 路径资料和 NCEP/NCAR 再分析资料,普查了 1961—2010 年宁夏的暴雨个例,并对影响宁夏的热带气旋远距离暴雨进行了统计和合成分析。得到以下主要结论。

(1) 远距离暴雨日数在暴雨总日数中的占比普遍在 30%~45%,占比最大的区域位于宁夏东部的盐池和麻黄山。远距离暴雨主要集中在 8 月,其中 8 月下旬发生次数最多,与宁夏暴雨气候多发期相比较,远距离暴雨多发期较之推迟 10~20 天。并非热带气旋深入内陆距离宁夏越近越容易产生远距离暴雨,84% 的远距离暴雨发生时,热带气旋中心位置位于近海洋面上,在台湾附近

和海南岛周边存在两个较集中的分布区域,这是热带气旋造成宁夏远距离暴雨的关键影响区域;在两个集中区域之间,存在一个少台风甚至无台风影响的海域。

(2) 远距离暴雨过程中,存在明显的自热带气旋东侧指向宁夏的水汽输送通道。不同过程之间的区别主要表现为水汽输送的源地和路径的不同。

(3) 远距离暴雨主要影响系统包括热带气旋、中纬度槽(涡)、副高和水汽通道、高空急流等,副高是联系热带气旋与中纬度天气系统的“桥梁”和“纽带”。远距离暴雨区附近、副高及热带气旋三者所在区域的平均水平散度分布大体呈现低层负、正、负,高层正、负、正、正、正、正的分布特征,暴雨区与热带气旋区域对应上升运动,而副高西侧为下沉运

动,这三者之间可能形成垂直环流,这种垂直环流能够促进副高的稳定维持或西伸加强,同时有利于水汽与能量从热带气旋向远距离暴雨区输送。

在台湾岛和海南岛两个TC高频影响区域之间,为何会存在一个少台风甚至无台风影响的海域?相关研究工作正在进行。此外,本文仅讨论

了TC在两个关键影响区域产生远距离暴雨的情况,事实上,在同样类似的区域内也有很多没有造成远距离暴雨的个例,它们的环流及水汽特征会有怎样的差异以及TC对远距离暴雨影响的数值模拟和敏感性试验等工作都值得去尝试和进一步探索研究。

参 考 文 献:

- [1] 张诚忠,薛纪善,黄燕燕,等. 资料同化对2017年登陆广东沿海台风的短期降水与路径预报影响[J]. 热带气象学报,2019,35(5):577-586.
- [2] 姜丽黎,余晖. 基于动力相似方法的台风极端降水概率预报研究[J]. 热带气象学报,2019,35(3):353-364.
- [3] 王敏,徐祥德,李英. 西北太平洋热带气旋路径异常偏折的分类特征[J]. 热带气象学报,2019,35(2):177-186.
- [4] 覃武,赵金彪,黄荣成,等. 台风“山竹”登陆结构变化及造成广西强降水异常分布的成因分析[J]. 热带气象学报,2019,35(5):587-595.
- [5] 涂小萍,徐蓉,姚日升,等. 登陆福建台风外围环流中宁波地区强对流天气分析[J]. 热带气象学报,2019,35(2):154-165.
- [6] 张东,林芳妮,何如意,等. 珠江口以西登陆热带气旋引发粤东暴雨的成因和预报着眼点分析[J]. 热带气象学报,2019,35(1):14-24.
- [7] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. 应用气象学报,2006,17(6):673-681.
- [8] 丛春华,陈联寿,雷小途,等. 台风远距离暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报,2011,27(1):264-270.
- [9] 陈联寿. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报[C]//第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集,2007:3-7.
- [10] COTE M R. Predecessor rain events in advance of tropical cyclones[D]. Department of Atmospheric and Environmental Sciences, University at Albany, State University of New York, 2007:200.
- [11] 丛春华,陈联寿,雷小途,等. 热带气旋远距离暴雨的研究[J]. 气象学报,2012,70(4):717-727.
- [12] 卓嘎,谢金南,马镜娴. 登陆台风与我国降水的统计关系[J]. 高原气象,2000,19(2):260-264.
- [13] 谢金南,卓嘎. 台风活动对青藏高原东北侧干旱的影响[J]. 高原气象,2000,19(2):244-252.
- [14] 姚宗国,赵光平,王咏青,等. 西北太平洋台风对西北地区东部降水的影响分析[J]. 中国沙漠,2008,28(6):1156-1162.
- [15] 侯建忠,张弘,李明娟,等. 台风活动对陕西重大洪灾事件影响的综合分析[J]. 气象,2010,36(9):94-99.
- [16] 杨晓霞,陈联寿,刘诗军,等. 山东省远距离热带气旋暴雨研究[J]. 气象学报,2008,66(2):236-250.
- [17] 侯建忠. 台风与陕西区域性暴雨的关系与环流特征[J]. 陕西气象,1997(2):5-8.
- [18] 张弘,梁生俊,侯建忠. 西安市两次突发暴雨成因分析[J]. 气象,2006,32(5):80-86.
- [19] 侯建忠,张弘,杜继稳,等. 台风与高原东北侧冷锋暴雨的环境场及云图特征[J]. 气象科技,2006,34(1):41-46.
- [20] 侯建忠,王川,鲁渊平,等. 台风活动与陕西极端暴雨的相关特征分析[J]. 热带气象学报,2006,22(2):203-208.
- [21] 张弘,侯建忠,乔娟. 陕西暴雨若干特征的综合分析[J]. 灾害学,2011,26(1):70-74.
- [22] 纪晓玲,杨婧,朱海斌,等. 宁夏西吉两次诱发地质灾害的极值暴雨对比分析[J]. 灾害学,2016,31(4):54-60.
- [23] 赵蔚,丁永红,马筛艳. 台风登陆背景下宁夏北部两次暴雨天气对比分析[J]. 山东气象,2010,30(3):19-24.
- [24] 纪晓玲,桑建人,马筛艳,等. 贺兰山东麓宁夏一次极值暴雨过程分析[J]. 气象科学,2010,30(3):332-337.
- [25] 肖云清,胡文东,赵立斌,等. 宁夏中北部两次强暴雨过程综合对比分析[J]. 高原气象,2008,27(3):576-583.
- [26] 马筛艳,纪晓玲,沈跃琴,等. “2006-07-14”宁夏区域性暴雨天气分析[J]. 宁夏工程技术,2006,5(4):323-327.
- [27] 丁治英,赵晓慧,邢蕊,等. 2000—2009年夏季东亚热带气旋远距离暴雨统计分析及其个例的数值模拟[J]. 热带气象学报,2014,30(2):229-238.
- [28] 冯建民. 宁夏天气预报手册[M]. 北京:气象出版社,2012:74-75.
- [29] 王咏梅,任福民,李维京,等. 中国台风降水的气候特征[J]. 热带气象学报,2008,24(3):233-238.

CHARACTERISTICS AND CONCEPTUAL MODELS OF TROPICAL-CYCLONE -INDUCED REMOTE PRECIPITATION EVENTS IN NINGXIA

YAN Jun^{1,2,3}, WANG Li-juan¹, JI Xiao-ling^{2,3}, XUE Hong-yu³, TAN Zhi-qiang³,
REN Xiao-fang³, SHAO Jian^{2,3}

- (1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions/ Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, CMA, Yinchuan 750002, China;
3. Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Based on the precipitation data of Ningxia Hui Autonomous Region, Japan Meteorological Agency best track data set of tropical cyclones and the NCEP reanalysis data during 1961—2010, the tropical cyclone remote precipitation (TRP) in Ningxia is discussed. The analysis shows that 30% ~ 45% Ningxia torrential rain processes are TRP events (TRPs), which are a very important type of heavy rain in Ningxia. High frequency of TRPs occurs in August, about 10 ~ 20 days later than the torrential rain climatic peak period of Ningxia. The analysis also shows that there are two regions with high frequency of tropical cyclones when the TRPs occur, i. e., the oceanic area east of the island of Taiwan and the area around Hainan island. Between these two regions, there is one region with low frequency of tropical cyclones. The diagnostic analysis results show that tropical cyclones, mid-latitude troughs, subtropical high, and upper and low-level jet all play a key role in the occurrence of the TRPs. Given the above two regions with high frequency of tropical cyclones, the TRPs are divided into two categories. The prominent differences between these two categories are the location of subtropical high, the moisture channels and the sea level pressure distributions. Two kinds of conceptual models of Ningxia TRPs are obtained in the end.

Key words: tropical cyclone; remote precipitation; statistical characteristics; conceptual models; Ningxia