

海河流域夏季降水关键区季内演变及其环流配置的定量化分析

何丽焯,程善俊,马宁,郭军

(天津市气候中心,天津 300074)

摘要: 海河流域夏季降水的空间分布具有明显的季节内变化特征,利用海河流域148个地面气象台站逐日降水资料以及NCEP/NCAR再分析资料,分析了流域夏季各月降水关键区的分布变化以及与其对应的大气环流系统的季内配置差异,并定量计算了主要环流系统对季内各月关键区降水的影响作用大小。结果表明:海河流域夏季降水关键区稳定表现出一种季节内变化,即以海河流域东北部滦河和北三河下游台站降水贡献率最大值区为轴心,从初夏(6月)至盛夏(7月和8月),降水关键区在季节内呈顺时针移动,由海河流域东北部移至流域东部和南部再移至流域东部和中部。初夏,东北冷涡活动对流域关键区降水影响最显著,相对贡献率达69.6%;盛夏7月,流域关键区降水异常主要和西太平洋副热带高压(西太副高)脊线位置有关,其相对贡献率在60%以上;8月,西太副高脊线和东亚夏季风指数对流域关键区降水的相对贡献大小相当。海河流域降水关键区在夏季各月的分布变化,与这些环流系统的季内变化路径(南北摆动或向北推进)具有很好的一致性。

关键词: 海河流域;降水关键区;季内变化;东北冷涡;西太平洋副热带高压脊线;东亚夏季风
DOI: 10.11821/dlxb202001004

1 引言

海河流域地处华北,是中国工农业的主要聚集地之一,也是中国水资源相对匮乏的地区^[1]。夏季是海河流域降水最为集中的季节,夏季降水量的多少及分布对该地区工农业生产和人民生活有重要影响,因此,对海河流域夏季降水的研究具有极为重要的意义^[2]。

海河流域夏季降水不仅受到热带、副热带系统的影响,也与中高纬度大气环流有关^[3-5],且具有显著的年代际和年际变化^[1,6],因此,海河流域夏季降水预测十分困难。近年来,海河流域夏季降水的年际振荡愈加明显,季内月尺度降水的变化也各不相同,这更加大了流域夏季尤其是季内月尺度降水的预测难度。

以往研究针对华北夏季降水的变化及其成因,从环流因子和外强迫因子方面广泛开展^[7-12],但多将夏季降水作为一个整体进行分析。考虑到海河流域夏季降水分布还存在着明显的季节内变化,而目前,针对海河流域夏季降水的季节内变化特征以及与其对应的大气环流配置的季内差异的综合分析还较少。因此,本文着眼于研究海河流域夏季月尺度降水的季节内变化特征以及与其相对应的环流系统的配置差异,并定量地分析了不同

收稿日期:2018-04-10; 修订日期:2019-11-18

基金项目:国家重点研发计划(2018YFA0606302);公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-1)
[Foundation: National Key R&D Program of China, No.2018YFA0606302; China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major Projects), No.GYHY201506001-1]

作者简介:何丽焯(1985-),女,天津人,高级工程师,主要从事气候预测和气候变化研究。E-mail: heliyehly@163.com

通讯作者:郭军(1966-),男,天津人,正研级高工,主要从事气候变化与短期气候预测研究。E-mail: guojun@cma.gov.cn

环流系统在季内各月影响降水变化的贡献大小,以期对流域夏季降水的季内演变和相应的环流特征有更加深入的理解,也为华北地区夏季月尺度降水预测提供具有参考意义的科学依据。

2 资料与方法

根据国家气象信息中心提供的全国2400余个气象站的逐日降水资料,本文选取了1961—2015年夏季(6—8月,下同)海河流域地区148个无缺测台站的数据(图1),以及NCEP/NCAR逐日和逐月再分析资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ [13]。

2.1 环流指数定义

2.1.1 东北冷涡指数 在孙力等[14]关于东北冷涡定义的基础上,界定可能影响海河流域夏季降水的东北冷涡活动关键区域($38^{\circ}\text{N} \sim 48^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$),以满足下列条件的低涡活动为一次东北冷涡天气过程:①在500 hPa等压面上至少能分析出一根闭合等高线,并有冷中心或明显冷槽配合的低压环流系统;②冷涡中心出现在 $38^{\circ}\text{N} \sim 48^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$ 范围内;③冷涡的生命史为3 d或3 d以上。满足东北冷涡天气过程条件的冷涡中心频次标准化值为东北冷涡活动指数(Northeast Cold Vortex Index, NECVI)[15]。

2.1.2 西太平洋副热带高压脊线指数 本文所定义西太平洋副热带高压(西太副高,下同)是指500 hPa高空天气图上588 dagpm等值线在 $110^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$ 范围内所包围的反气旋环流。脊线指数取 10°N 以北 $110^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$ 范围内588 dagpm等值线(若不存在,则选取584 dagpm等值线)所包围的副热带高压体内,纬向风 $u = 0$ 且 $\partial u / \partial y > 0$ 的特征线所在纬度位置的平均值;若某月不存在584 dagpm等值线,则以该月的历史最小值代替。但是,在 $110^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$ 范围内只有1个588 dagpm网格点的孤立副高体,或者只有1个纬度的经线与副高体内的纬向风切变线相交时,均不予考虑[16]。

2.1.3 东亚夏季风指数 将东亚热带季风槽区($10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$)与东亚副热带地区($25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$)6—8月各月850 hPa风场的纬向风距平差,定义为东亚夏季各月季风指数(East Asian Summer Monsoon Index, EASMI)[17]:

$$I_{EASMI} = U_{850[10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}]} - U_{850[25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}]} \quad (1)$$

2.2 贡献率计算方法

2.2.1 台站降水贡献率 指各台站降水量占同时段海河流域总降水量的比例[18]:

$$C_i = \frac{P_{si}}{P_w} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_i 表示第*i*个台站的降水贡献率; P_{si} 表示第*i*个台站的降水量; P_w 表示与 P_{si} 同时段的海河流域总降水量。该方法能够更加清楚地反映在不同时段不同区域降水对整个流域总降水的贡献。

2.2.2 不同环流系统对海河流域降水的相对贡献率 用于定量分析不同环流系统对海河流域降水的影响作用大小。计算不同环流系统在夏季内各月对流域降水的相对贡献率(R_j)时,采用如下方法:

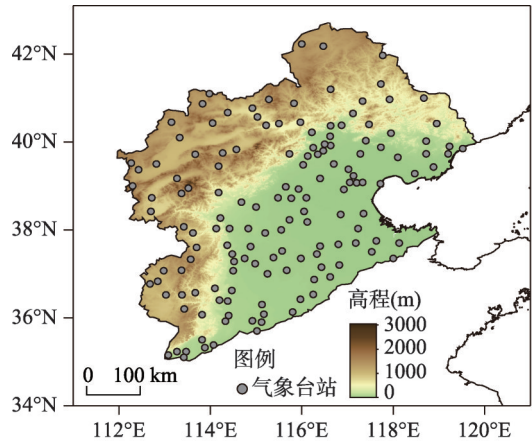


图1 海河流域气象台站分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Haihe River Basin

$$R_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{T_{ij}^2}{\left(\sum_{j=1}^a T_{ij}^2 \right)} \right], \quad T_{ij} = b_j x_{ij} \quad (3)$$

式中: T_{ij} 为多元线性回归方程中的各项; m 表示资料序列的长度; a 表示回归方程中自变量个数^[19]。

2.3 海河流域夏季降水关键区的定义

海河流域夏季降水关键区指在整个流域夏季总降水中起主要贡献的降水区域。定义如下: 对夏季各月流域 148 个台站的 1961—2015 年平均降水贡献率按从小到大升序排列, 将 3 个月序列 70% 分位值的平均值作为夏季海河流域降水关键区的临界阈值。当流域台站的降水贡献率超过该阈值, 就认为这些台站所在的区域为流域夏季降水关键区^[20-22]。

本文之所以选取 70% 分位值作为降水关键区的临界阈值, 是考虑到 75% 及以上的分位数多用于划分“极端”指标, 而本文旨在分析起主要贡献的“关键”区域, 所选分位数应低于 75%, 且若选取极端阈值, 则降水关键区范围太小, 不能很好地反映其季节内变化特征。以 70% 分位的值作为计算阈值划分的降水关键区, 在夏季各月覆盖的台站数仅约 1/3, 但却贡献了流域一半以上的降水量 (6 月接近一半), 并且能够清楚地反映月尺度降水贡献率空间分布的季节内变化特征^[23]。

3 海河流域夏季降水关键区的季节内变化及其环流配置

3.1 海河流域夏季降水关键区季节内变化特征

为研究海河流域夏季降水关键区的季节内变化特征, 首先分析了夏季各月台站降水对流域总降水贡献率的空间分布 (图 2)。其中, 6 月降水贡献率呈现由流域东北向西南逐渐降低的分布特征, 7 月降水贡献率分布则是流域东部南部较高, 向西部北部逐渐降低, 西北部最低, 8 月流域降水贡献率高值区分布于东部和中部, 向西南和西北逐渐降低, 西北部最低。

根据前文定义, 计算出夏季海河流域降水关键区的临界阈值为 0.7%, 当台站降水贡献率超过该阈值时, 其所在区域即为流域降水关键区。从图 2 中可以看到, 6 月海河流域降水关键区主要位于东北部, 7 月降水关键区位于流域东部和南部, 而与 7 月相比, 8 月降水关键区除包括流域东部以外, 原位于南部的降水关键区北抬至流域中部, 呈现出一条东北—西南向的带状关键区。

进一步对海河流域 148 个台站的夏季逐月降水贡献率做年代际时间尺度分析, 得到不同年代海河流域夏季各月台站降水对流域总降水贡献率的空间分布 (图 3)。可以看到, 流域降水关键区在夏季各月的空间变化特征体现出较好的年代际一致性, 即在近 50 多年, 年代际时间尺度上, 海河流域夏季降水关键区均表现出这样一种季节内变化: 以流域东北部滦河和北三河下游台站降水贡献率最大值区为轴心, 从初夏 (6 月, 下同) 至盛夏 (7 月和 8 月, 下同), 降水关键区在季节内呈顺时针移动, 由海河流域东北部移至流域东部和南部再移至流域东部和中部 (图 4)。

3.2 影响海河流域关键区降水的大气环流特征分析

如上分析, 海河流域降水关键区在夏季各月, 尤其是在初夏和盛夏存在明显的差异性分布, 说明影响流域夏季月尺度降水变化的大气环流特征可能也存在差异。为更好地理解这种环流配置的季节内变化, 将海河流域夏季各月降水关键区所覆盖台站的平均降

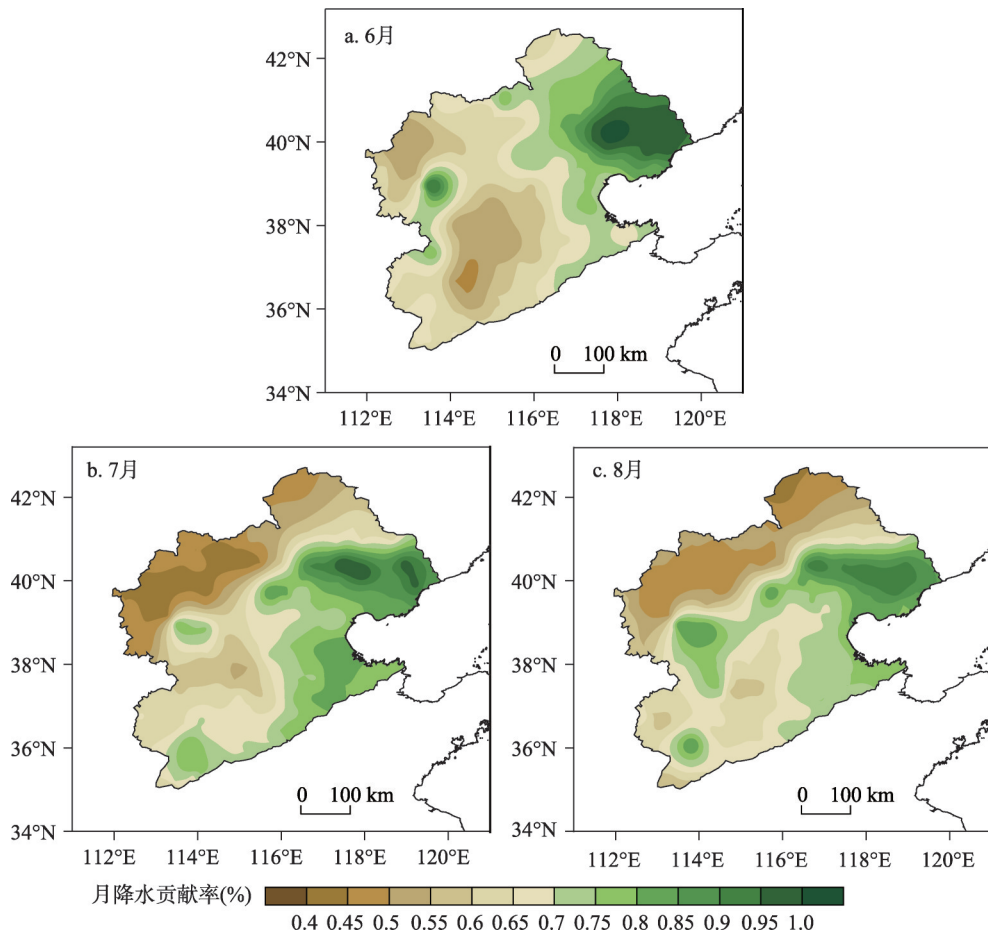


图2 1961—2015年夏季海河流域148站月降水贡献率分布
Fig. 2 Distribution of monthly contribution of precipitation to total amount
at 148 stations in the Haihe River Basin during 1961-2015

水量进行标准化,以1个标准差为阈值,选取大(小)于一个正(负)标准差的年份作为流域关键区典型多(少)雨年(表1)。根据选定的典型异常年,对大气环流场进行差值合成,重点分析了与流域夏季各月关键区降水所关联的大尺度环流特征。

图5为夏季各月海河流域关键区降水异常偏多和异常偏少年的环流差值场合成结果。可以看到,初夏500 hPa高度场上(图5a1),东亚中高纬度地区表现出北正南负的偶极位势高度异常,其中,正位势异常区域中心位于贝加尔湖北侧,负位势异常区域中心位于海河流域北部,这与东北冷涡频发性活动时东亚中高纬度地区500 hPa高度场的异常分布特征极为一致^[15],且负位势异常区域的位置正好与初夏东北冷涡的活动范围相吻合。此时海河流域尤其是其北部地区受到差值低压控制,当低压中心发展时,气旋性环流增强,流域北部位于该气旋性环流异常的底部,因此偏北气流增强,北方冷空气在该气流引导下推进至流域北部一带,伴随源自于西风带的整层异常水汽输送在流域辐合^[10, 24](图5b1),有利于海河流域初夏关键区降水增多。同一时段在副热带地区,西太副高主体位于海洋上空,其脊线位置在22°N附近(图7a),主要影响我国南方地区,尚未能影响到海河流域降水。

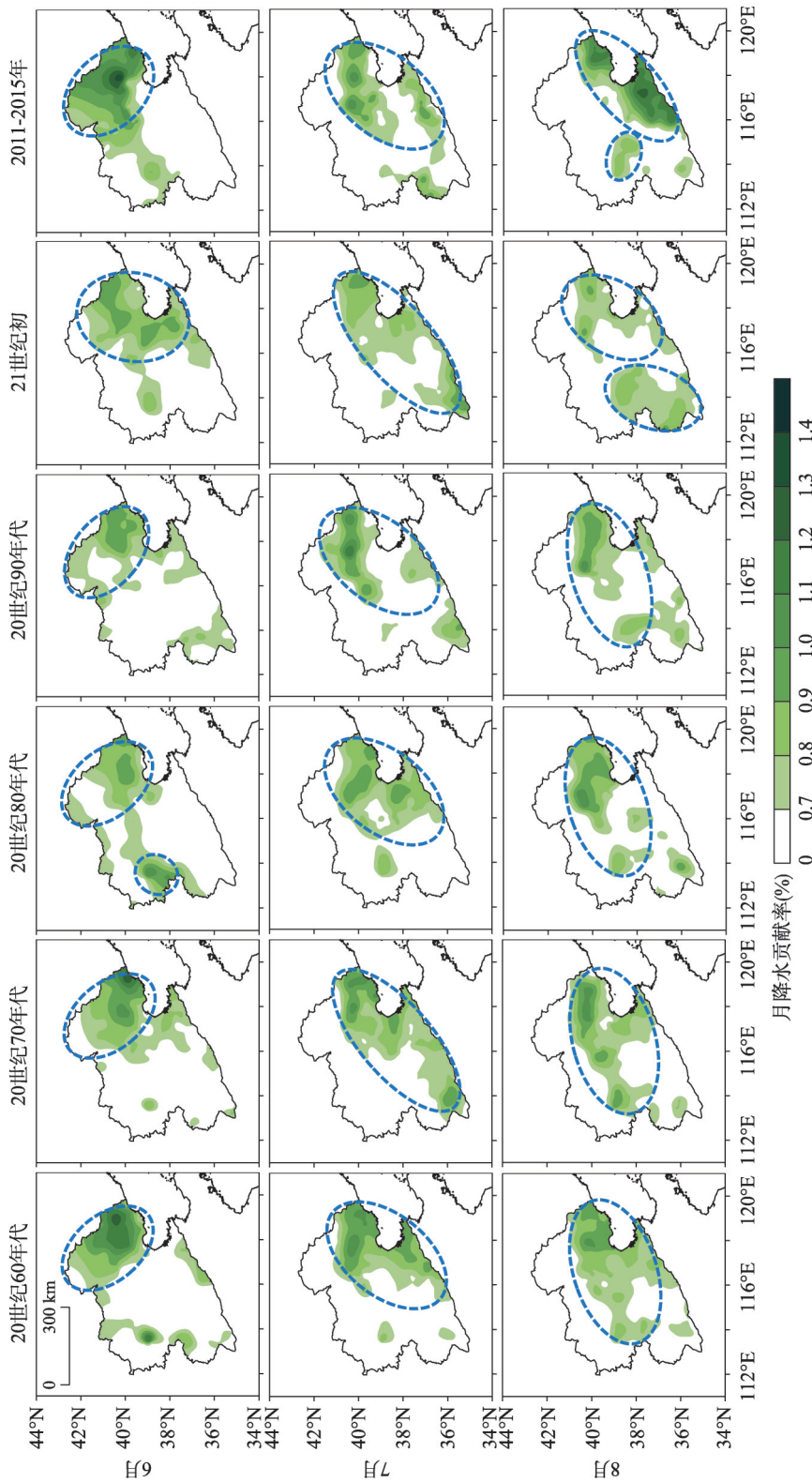


图3 1961—2015年海河流域夏季各月降水关键区的年代际分布
Fig. 3 Interdecadal distribution of the high value areas of monthly contribution of station precipitation to total amount in the Haihe River Basin during 1961-2015

盛夏海河流域关键区降水的增多主要和500 hPa高度场“西负东正”的位势高度异常配置有关(图5a2、图5a3),这与已有研究中指出的华北夏季尤其是盛夏降水偏多时中高纬度500 hPa高度场异常分布型态基本一致^[8, 25-27],由图5a2和图5a3可以看到,贝加尔湖以南大部分地区为差值低压控制,日本海上空出现异常高压,海河流域正好位于气旋性环流异常底部和反气旋性环流异常顶部,偏西和西南气流均增强,因此西风带异常水汽输送增强(图5b2);且与初夏相比,盛夏西太副高中心逐步北移,在7月和8月副高脊线的平均位置分别北抬至26°N和29°N附近(图7a),日本海上空的异常高压位于西太副高北部,其正异常中心位置在盛夏期间向东北移动正对应了西太副高的西伸北进,受副高北进的影响,异常的水汽沿着副高西侧的偏南风异常向北输送到海河流域(图5b2、图b3)^[28],有利于流域盛夏关键区降水增多。

不仅如此,华北夏季降水还与东亚夏季风的影响密切相关^[29]。已有研究表明,东亚夏季风的强弱与华北夏季降水无论从年际还是年代际变化上都有很好的对应关系^[30-32]。由图5a2和图5a3可见,8月与7月相比,东亚热带季风槽区(10°N~20°N, 100°E~150°E)与东亚副热带地区(25°N~35°N, 100°E~150°E)月平均850 hPa风场的纬向风距平差明显增大,东亚夏季风增强,同时贝加尔湖以南差值低压中心位置也更加偏东偏北,其前部偏南气流有利于东亚夏季风向更北位置推进,伴随着盛夏西太副高向北推进过程的影响,可能导致与7月相比8月海河流域西部降水关键区位置明显北抬。

此外,从对流层高低不同层次来看,7月和8月海河流域关键区降水所对应的环流异常中已经看不到初夏降水对应的中心位于流域以北的气旋性环流异常,说明盛夏东北冷涡对流域关键区降水异常的影响不大。

综合上述分析,东北冷涡活动、东亚夏季风强弱以及其与西太副高的季节内进程对海河流域夏季各月的降水异常尤其是降水关键区的位置变化都有重要影响。

3.3 不同环流系统对海河流域降水关键区季内分布变化的影响

将东北冷涡、东亚夏季风和西太副高作为影响夏季各月海河流域关键区降水异常的主要环流系统,进一步分析其影响流域降水的位置和范围,并定量计算出这些环流系统对各月降水的影响作用大小,给出相对贡献率。

表1 海河流域关键区降水典型异常年

Tab. 1 Typical abnormal years for precipitation in the key areas of the Haihe River Basin

月份	典型多雨年	典型少雨年
6月	1967, 1971, 1976, 1977, 1979, 1980, 1986, 1991, 2001	1963, 1965, 1968, 1972, 1974, 1981, 1983, 1994, 1997, 1999, 2000, 2010
7月	1961, 1962, 1964, 1969, 1977, 1988, 1990, 1994, 2012, 2013	1968, 1980, 1983, 1984, 1987, 1997, 1999, 2002, 2014
8月	1963, 1964, 1966, 1967, 1969, 1973, 1984, 1987, 1996, 2010	1968, 1989, 1991, 1997, 2001, 2002

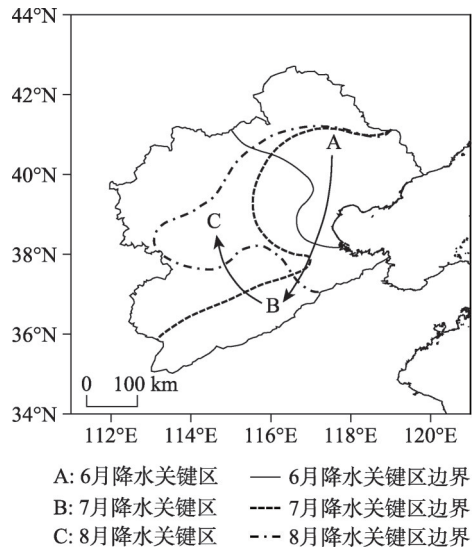
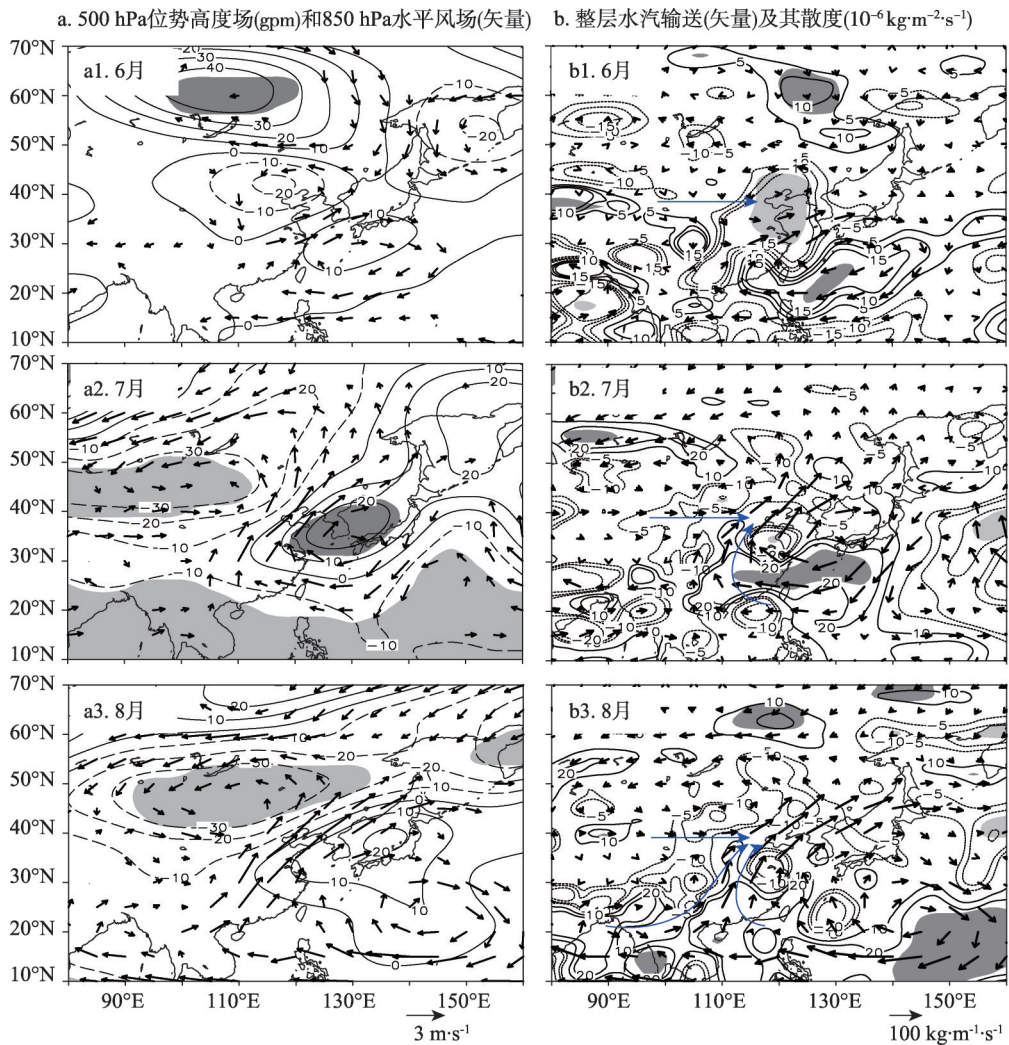


图4 海河流域夏季各月降水关键区的位置变化示意图

Fig. 4 Intraseasonal variations of the high value areas of monthly contribution of station precipitation to the total amount in the Haihe River Basin



注: 图a阴影和矢量分别表示高度场和风场的置信度水平达到95%;图b阴影表示水汽通量散度的置信度水平达到95%,浅色表示水汽辐合,深色表示水汽辐散。

图5 500 hPa位势高度场和850 hPa水平风场、整层水汽输送及其散度在海河流域夏季各月关键区降水偏多和偏少年的合成差异

Fig. 5 Composite differences in geopotential height at 500 hPa pressure level, 850 hPa winds, and the whole layer vapor transportation and its divergence between wet and dry years chosen by each summer month in the key areas of the Haihe River Basin

考虑到西太副高的形态、南北位置和东西位置等各项指数与中国夏季降水的关系十分复杂,本文选取与华北夏季降水关系最为密切的副高脊线指数表征其季节性北进^[16, 33]。同时选取何丽焯等^[15]定义的东北冷涡指数(NECVI,下同)表征冷涡活动频次以及张庆云等^[17]定义的东亚夏季风指数表征季风强弱。以上指数与海河流域夏季各月降水量的同期相关分布如图6~图8所示。

可见,初夏NECVI指数与海河流域降水在其北部的大范围地区呈显著正相关,表明当NECVI值越高(即东北冷涡活动频次偏多)时,流域北部初夏降水可能偏多,当NECVI值越低(即东北冷涡活动频次偏少)时,流域北部初夏降水可能偏少(图6)。显著相关区和海河流域初夏降水关键区的位置基本吻合,如果将流域北部地区阴影所覆盖

的50个站的平均降水量标准化值的时间序列与NECVI时间序列计算相关系数，其在1961—2015年可达0.58，通过了99.9%的置信度检验，说明初夏海河流域北部关键区降水的年际变化主要和东北冷涡活动有关。此时，副高脊线和东亚夏季风指数对海河流域北部关键区降水没有明显影响。

进入盛夏以后，东北冷涡活动对海河流域降水的影响明显减弱，而随着西太副高和东亚夏季风的向北推进（图5、图7a），二者对海河流域降水的影响明显加强。7月，副高脊线指数对流域东部和南部降水均有显著影响（图7b），而东亚夏季风指数则与流域中部和西南部分地区降水有显著正相关关系（图8）。与7月相比，8月副高脊线指数与流域降水的显著正相关区则向北推进至流域东北偏东和西北部分地区（图7b）。这些显著相关区的位置和范围与海河流域盛夏降水关键区的分布基本一致，说明盛夏海河流域关键区降水异常可能是受到西太副高和东亚夏季风的共同影响。

不难看出，东北冷涡对海河流域初夏关键区降水的影响最为明显，而进入盛夏后其影响迅速减弱，这正好对应于冷涡活动高频区在夏季内的南北摆动。研究表明，东北冷涡活动的最大密集带从4月开始逐渐向南移动，6月达到最南端，这时是冷涡活动的最强

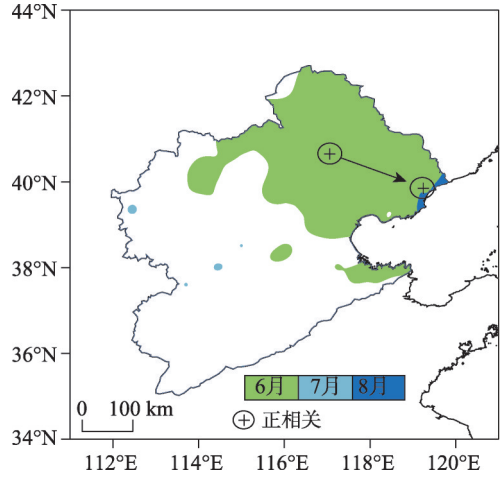


图6 1961-2015年夏季各月东北冷涡指数与海河流域降水显著相关区(置信度水平达95%)的季内变化

Fig. 6 Intraseasonal variations of significant correlation areas (the values exceed 95% confidence level) relating to the Northeast Cold Vortex Index (NECVI) for precipitation in the Haihe River Basin in summer during 1961-2015

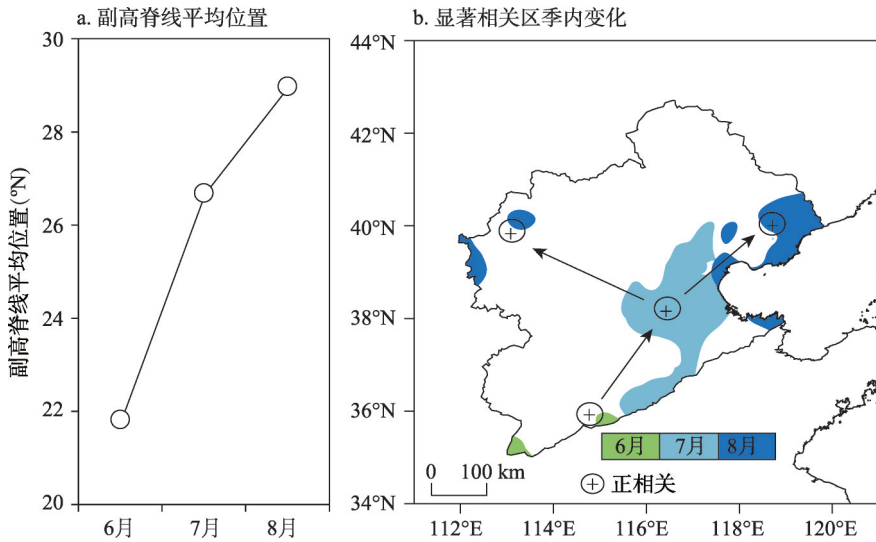


图7 1961—2015年夏季各月西太副高脊线的平均位置以及其与海河流域降水显著相关区(置信度水平达95%)的季内变化

Fig. 7 The monthly ridge line of the Western Pacific Subtropical High (WPSH) averaged and intraseasonal variations of significant correlation areas (the values exceed 95% confidence level) relating to the ridge line of the WPSH for precipitation in the Haihe River Basin in summer during 1961-2015

盛期,而后冷涡活动的主要密集区逐渐北移,虽然在8月仍有一次要的高频区在47°N附近维持^[14],但也仅能够影响到流域东北部的极边缘地区。值得注意的是,东北冷涡活动密集区这一显著变化与盛夏西太副高大幅度北进几乎是同步进行的^[14]。因此,进入盛夏以后,副高脊线和东亚夏季风指数与海河流域降水的相关关系更加明显,其显著相关区表现出的季节内逐步向北的推进过程,与7—8月海河流域降水关键区北拾相一致,都很好地反映了西太副高和东亚夏季风的季节性北进。

以上研究表明,在夏季内不同时段,东北冷涡、东亚夏季风和西太副高不同程度地影响着海河流域关键区降水,为了定量分析三者对流域关键区降水的影响大小,利用Huang等^[19]的方法分别计算了NECVI、东亚夏季风和副高脊线指数对夏季各月流域关键区降水的相对贡献大小(表2)。初夏海河流域关键区降水异常主要和东北冷涡活动有关,其相对贡献率达69.6%;盛夏7月,随着西太副高向北推进,其对流域关键区降水的影响明显加强,相对贡献率在60%以上;对于8月而言,副高脊线和东亚夏季风指数对流域关键区降水的影响大小相当,相对贡献各占50%左右。这与上述定性分析结果基本一致。

4 结论与讨论

本文着眼于海河流域夏季降水的季节内变化,在分析流域各月降水关键区分布特征的基础上,进一步揭示了与其对应的大气环流系统的季内配置差异,并定量化研究了主要环流系统对季内各月关键区降水的影响作用,得出如下结论:

(1) 海河流域夏季降水关键区稳定表现出一种季节内变化:以海河流域东北部滦河和北三河下游台站降水贡献率最大值区为轴心,从初夏至盛夏,降水关键区在季节内呈顺时针移动,由海河流域东北部移至流域东部和南部再移至流域东部和中部。

(2) 东北冷涡、东亚夏季风和西太副高是影响海河流域夏季各月关键区降水异常的主要环流系统,东北冷涡活动高频区在夏季内的南北摆动、东亚夏季风和西太副高的季节性向北推进与海河流域降水关键区的季内变化路径具有很好的一致性。

(3) 在夏季内不同时段,东北冷涡、东亚夏季风和西太副高对海河流域关键区降水的相对贡献有显著差异,初夏东北冷涡活动对流域关键区降水影响最显著,盛夏7月流域关键区降水异常主要和西太副高脊线位置有关,8月副高脊线和东亚夏季风指数对流域关键区降水的相对贡献大小相当。

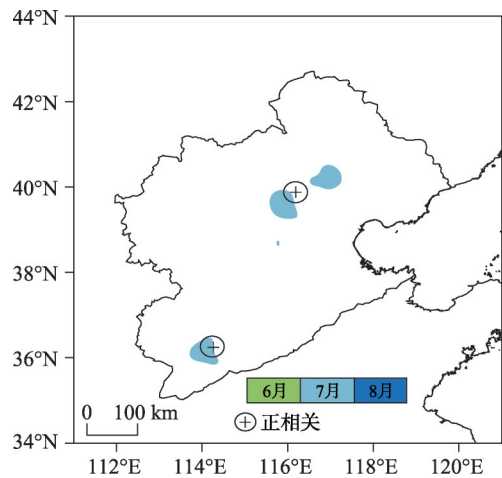


图8 1961—2015年夏季各月东亚夏季风指数与海河流域降水显著相关区(置信度水平达95%)的季内变化

Fig. 8 Intraseasonal variations of significant correlation areas (the values exceed 95% confidence level) relating to the East Asian summer monsoon index (EASMI) for precipitation in the Haihe River Basin in summer during 1961-2015

表2 各项指数对海河流域夏季关键区降水的贡献率

Tab. 2 Monthly relative contributions of atmospheric circulation indices to precipitation in the key areas of the Haihe River Basin in summer

环流指数	贡献率(%)		
	6月	7月	8月
NECVI	69.59	27.70	2.74
副高脊线指数	8.56	60.64	46.01
东亚夏季风指数	21.85	11.66	51.25

值得注意的是, 无论初夏还是盛夏, 海河流域降水关键区中东北部滦河和北三河下游一带都是台站降水贡献的最大值区, 由于这里山区与平原过渡区极短, 地势陡峻, 山脉地形对降水的影响极为明显^[34-35], 是海河流域夏季降水需要重点关注的地区。

海河流域夏季内降水的影响因子十分复杂, 本文仅从环流因子的角度阐述了其对海河流域夏季各月关键区降水的影响作用, 然而已有研究表明, 海温、积雪、海冰等外强迫因子的变化对华北夏季降水也有重要影响^[29], 外强迫因子和环流调整之间的相互作用决定了流域夏季降水量的多少和季节内变化, 具体的相互作用机理和影响机制还需要在今后开展更加深入的研究。

参考文献(References)

- [1] Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(4): 465-476. [黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. *高原气象*, 1999, 18(4): 465-476.]
- [2] Li Chongyin. An analytical study on the precipitation in the flood period over Huabei area. *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, 50(1): 41-49. [李崇银. 华北地区汛期降水的一个分析研究. *气象学报*, 1992, 50(1): 41-49.]
- [3] Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Zhi Rong, et al. Circulation system complex networks and teleconnections. *Chinese Physics B*, 2011, 20(7): 079201.
- [4] Yang Jie, Wang Qiguang, Zhi Rong, et al. Dynamic optimal multi-indexes configuration for estimating the prediction errors of dynamical climate model in North China. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(2): 029204. [杨杰, 王启光, 支蓉, 等. 动态最优多因子组合的华北汛期降水模式误差估计及预报. *物理学报*, 2011, 60(2): 029204.]
- [5] Yang Ping, Hou Wei, Feng Guolin. The characteristics of clusters of weather and extreme climate events in China during the past 50 years. *Chinese Physics B*, 2012, 21(1): 019201.
- [6] Liu Haiwen, Ding Yihui. Analysis of daily precipitation characteristics over North China during rainy seasons. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(1): 12-22. [刘海文, 丁一汇. 华北汛期日降水特性的变化分析. *大气科学*, 2010, 34(1): 12-22.]
- [7] Dai Xingang, Wang Ping, Chou Jifan. Multiscale characteristics of the rainy season rainfall and inter-decadal decaying of summer monsoon in North China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(12): 2730-2734.
- [8] Tan Guirong, Sun Zhaobo. Relationship of the subtropical high and summertime flood/droughts over North China. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(2): 206-211. [谭桂容, 孙照渤. 西太平洋副高与华北旱涝的关系. *热带气象学报*, 2004, 20(2): 206-211.]
- [9] Yang Xiuqun, Xie Qian, Zhu Yimin, et al. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in north China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(4): 789-797. [杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 789-797.]
- [10] Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July-August. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(2): 345-357. [周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 影响华北汛期降水的水汽输送过程. *大气科学*, 2008, 32(2): 345-357.]
- [11] Zhou Liantong. Circulation anomalies pattern causing the persistent drought in north China. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(2): 120-130. [周连童. 引起华北地区夏季出现持续性干旱的环流异常型. *气候与环境研究*, 2009, 14(2): 120-130.]
- [12] Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Liu Haiwen. Simulation of the influence of winter snow depth over the Tibetan Plateau on summer rainfall in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(5): 903-915. [朱玉祥, 丁一汇, 刘海文. 青藏高原冬季积雪影响我国夏季降水的模拟研究. *大气科学*, 2009, 33(5): 903-915.]
- [13] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [14] Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. The climatological characteristics of Northeast cold vortex in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1994, 5(3): 297-303. [孙力, 郑秀雅, 王琪. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系. *应用气象学报*, 1994, 5(3): 297-303.]
- [15] He Liye, Ma Ning, Guo Jun. The impact of the Northeast Cold Vortex on early summer precipitation anomalies in the

- Haihe River Basin. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 3745-3752. [何丽焯, 马宁, 郭军. 东北冷涡对海河流域初夏降水异常的影响. 地球物理学报, 2017, 60(10): 3745-3752.]
- [16] Liu Yunyun, Li Weijing, Ai Wanxiu, et al. Reconstruction and application of the monthly Western Pacific Subtropical High Indices. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(4): 414-423. [刘芸芸, 李维京, 艾祝秀, 等. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用. 应用气象学报, 2012, 23(4): 414-423.]
- [17] Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(4): 559-568. [张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 2003, 61(4): 559-568.]
- [18] Shen Qian, Zhang Shixuan, Zhao Junhu, et al. Contribution of typhoon over coastal waters to summer rainfall in eastern China. Acta Physica Sinica, 2013, 62(18): 189-201. [申茜, 张世轩, 赵俊虎, 等. 近海台风对中国东部夏季降水的贡献. 物理学报, 2013, 62(18): 189-201.]
- [19] Huang Jianping, Yi Yuhong. Inversion of a nonlinear dynamical model from the observation. Science in China(Series B), 1991, 34(10): 1246-1251.
- [20] Plummer N, Salinger M J, Nicholls N, et al. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century. Climatic Change, 1999, 42(1): 183-202.
- [21] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. Trend in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. International Journal of Climatology, 2001, 21(3): 269-284.
- [22] Zhai Panmao, Zhang Xuebin, Wan Hui, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [23] Zhang Qiang, Li Jianfeng, Chen Xiaohong, et al. Spatial variability of probability distribution of extreme precipitation in Xinjiang. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 3-12. [张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12.]
- [24] Simmonds I, Bi D, Hope P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. Journal of Climate, 1999, 12(5): 1353-1367.
- [25] Sun Yan, Zhu Weijun, Wang Qianqian, et al. Spatial/temporal variations of summer precipitation anomalies in North China and their relations to atmospheric circulation. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, 33(1): 67-73. [孙燕, 朱伟军, 王谦, 等. 华北夏季降水异常的变化及其与大气环流的联系. 大气科学学报, 2010, 33(1): 67-73.]
- [26] Xu Guiyu, Yang Xiuqun, Sun Xuguang. Interdecadal and interannual variation characteristics of rainfall in North China and its relation with the northern hemisphere atmospheric circulations. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(3): 511-518. [徐桂玉, 杨修群, 孙旭光. 华北降水年代际、年际变化特征与北半球大气环流的联系. 地球物理学报, 2005, 48(3): 511-518.]
- [27] Zhai Yingjia, Li Yaohui, Shi Chunhua. Temporal and spatial characteristics of August precipitation in North China and its causes in last 50 years. Plateau Meteorology, 2013, 32(3): 787-797. [翟颖佳, 李耀辉, 施春华. 近 50 年华北区 8 月降水异常的时空特征及其成因分析. 高原气象, 2013, 32(3): 787-797.]
- [28] Ye Min, Wu Yongping, Zhou Jie, et al. Objective quantification of the water vapor path influencing precipitation in North China in summer. Acta Physica Sinica, 2014, 63(12): 470-481. [叶敏, 吴永萍, 周杰, 等. 影响华北盛夏降水的水汽路径客观定量化的研究. 物理学报, 2014, 63(12): 470-481.]
- [29] Hao Lisheng, Ding Yihui. Progress of precipitation research in North China. Progress in Geography, 2012, 31(5): 593-601. [郝立生, 丁一汇. 华北降水变化研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(5): 593-601.]
- [30] Guo Qiyun, Wang Jiqin. A comparative study on summer monsoon in China and India. Journal of Tropical Meteorology, 1988, 4(1): 53-60. [郭其蕴, 王继琴. 中国与印度夏季风降水的比较研究. 热带气象学报, 1988, 4(1): 53-60.]
- [31] Dai Xingang, Wang Ping, Chou Jifan. Multiscale characteristics of the rainy season rainfall and interdecadal decaying of summer monsoon in North China. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(12): 2730-2734.
- [32] Ding Yihui, Wang Zunya, Sun Ying. Interdecadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. International Journal of Climatology, 2007, 28(9): 1139-1161.
- [33] Zhao Zhenguo. Summer Drought/flood Patterns and Environment Fields in China. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 49-52. [赵振国. 中国夏季旱涝及环境场. 北京: 气象出版社, 1999: 49-52.]
- [34] Fan Guangzhou, Lü Shihua. Numerical simulation study for the effect of terrain on North China summer precipitation. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 659-667. [范广洲, 吕世华. 地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究. 高原气象, 1999, 18(4): 659-667.]

- [35] Wei Yinghua, Chen Hong, Liu Yiwei, et al. Cause analysis of heavy rainfall over the northern Haihe River Basin under terrain influence. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2018, 41(3): 81-88. [尉英华, 陈宏, 刘一玮, 等. 地形影响下海河流域北系强降雨成因分析. *气象与环境科学*, 2018, 41(3): 81-88.]

Intraseasonal evolution of the key areas of precipitation in the Haihe River Basin and quantitative analysis of its associated atmospheric circulation during summer

HE Liye, CHENG Shanjun, MA Ning, GUO Jun

(Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: The precipitation distribution has obvious intraseasonal variation characteristics in the Haihe River Basin (HRB) during summer. In this paper, intraseasonal evolution of the key areas of precipitation in the HRB and its associated atmospheric circulation pattern have been investigated, and the relative contributions of different atmospheric circulation factors to precipitation in the key areas are quantitatively calculated, by using daily precipitation data of 148 meteorological stations over the HRB and NCEP/NCAR reanalysis data. The results present a prominent intraseasonal variation of the key areas of summer precipitation in the HRB. The key areas move clockwise around the lower reaches of the Luanhe River and Beisan River located in the northeastern HRB, which are the maximum contribution areas of station precipitation to the HRB total amount, from early summer (June) to midsummer (July and August). The key areas are distributed in northeast HRB, east and south HRB, east and central HRB along with the movement. During early summer, the activities of the Northeast Cold Vortex (NECV) play a dominant role (relative contribution is 69.6%) in precipitation in the key areas; in July, the anomalous precipitation in the key areas is mainly affected by the ridge line of the Western Pacific Subtropical High (WPSH), with a relative contribution of more than 60%; in August, the ridge line of the WPSH and the East Asian summer monsoon index (EASMI) has an equivalent contribution to precipitation in the key areas. In addition, the monthly significant correlation areas relating to these atmospheric circulation factors for precipitation, are found at the same location as the key areas of precipitation in the HRB, and their intraseasonal changing paths are both accordant with the position changes of the associated atmospheric circulation systems in summer.

Keywords: Haihe River Basin; key areas of precipitation; intraseasonal change; Northeast Cold Vortex; ridge line index of the Western Pacific Subtropical High; East Asian Summer Monsoon