

华北降水变化研究进展

郝立生¹, 丁一汇²

(1. 河北省气候中心, 石家庄 050021; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

摘 要: 由于近60年来华北降水量呈现减少趋势, 使该地区本已紧张的水资源形势更加严峻, 给工农业生产、居民生活、城市运行造成严重威胁, 已引起政府和科学界的高度关注, 例如为缓解华北用水紧张形势, 国家实施了南水北调工程。华北降水发生变化的机理是什么, 搞清这个问题对认识华北降水未来变化趋势及转型很有借鉴意义。本文重点从华北降水年代际变化特征出发, 回顾了海温、东亚夏季风、副热带高压、积雪和海冰变化影响华北夏季降水的机制。在归纳总结的基础上, 指出了未来研究方向, 主要包括华北降水什么时间发生转型, ENSO影响华北降水的机制以及ENSO长期变化趋势对华北降水年代际变化的影响, 印度洋海温异常影响华北夏季降水的机制, 如何更好地定量描述东亚夏季风季节内、年际、年代际变化及其影响华北夏季降水的机制, 副热带高压季节内变化、长期变化对华北夏季降水的影响。

关 键 词: 华北; 降水; 变化; 研究; 进展

1 引言

20世纪60年代中期以后, 华北降水呈现减少趋势, 特别是70年代以来, 降水减少更加明显^[1]。华北地区降水量减少, 使该地区本已紧张的水资源形势更加严峻^[2], 造成华北地区长时间干旱、地下水位下降、河道断流及生态环境恶化^[3], 严重威胁该地区工农业生产和当地居民生活, 已引起政府和科学界的高度关注。例如, 国家为了解决华北水资源紧张局面, 实施了南水北调工程。在科学界, 一些学者对华北降水变化规律进行了很好研究^[4-5]。

海温是对大气环流有重要影响的一个因子, 它已成为降水气候预测不可缺少的重要参考指标, 这里重点对太平洋、印度洋海温变化与华北降水的关系及影响机制进行回顾。另一个因子是季风, 关于夏季降水变化原因最早始于季风的研究^[6]。季风是广大地区范围内近地面的盛行风向随季节转换发生明显风向改变的风, 主要是由于海-陆热力差异导致的大气环流现象。海陆分布的非对称性造成太阳辐射对大气加热非对称是季风地理分布不同和差异的主要原因。中国夏季降水变化与东亚夏季风环流变化有着密切的联系, 中国大部分地区特别是东部夏季降水受东亚夏季风强弱、爆发早晚以

及持续时间长短影响非常显著。季风及其对降水的影响一直是国内外气象学者关注的研究课题, 这方面的成果很多。还有研究表明, 副热带高压、积雪、海冰等变化对华北夏季降水也有重要影响。

一般来说, 通过对华北降水年际异常及相关因子的影响机制研究, 可以为改进降水气候预测技术和数值模拟技术提供科学基础; 通过对华北降水年代际变化特征及相关因子影响机制研究, 可以为认识华北降水长期变化规律和识别气候态可能发生转型的时间提供科学参考依据。本文重点从华北降水年代际变化特征出发, 分析并总结海温、东亚夏季风、副热带高压、积雪和海冰年际、年代际变化(长期变化)与华北降水之间的关系及其影响机制, 以期改进降水气候预测技术和认识华北降水长期变化趋势提供科学基础。

2 华北降水年代际变化

华北降水年代际变化特征非常突出。根据500年旱涝资料统计^[7], 华北地区夏季降水存在明显的80年周期, 而且这个80年变化周期在整个华北夏季降水低频变化中占了相当的分量, 约占低频变化方差的27%。张庆云^[8]分析1880年以来华北地区

收稿日期: 2011-10; 修订日期: 2012-02.

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF-2010-1); 国家气候中心短期气候预测创新团队基金。

作者简介: 郝立生(1966-), 男, 河北廊坊人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为季风和气候变化。E-mail: hls54515@163.com

降水变化发现,华北降水存在着显著的年代际变化,1883-1898年和1949-1964年是华北降水较丰沛时段,1899-1920年和1965-1997年华北降水处于偏少阶段,其中1980-1993年降水持续偏少,干旱现象严重。王绍武^[9]指出,20世纪50年代,华北夏季多雨,在中国东部地区表现最为突出;60年代,华北降水略多,但长江及以南少雨;70年代,华北北部略多,淮河少雨;80年代,华北干旱,长江流域多雨;90年代,华北干旱持续,而长江流域降水有所增加。近年华北干旱与降水量的年代际变化有关。陈隆勋等^[10]指出,全国年平均降水在20世纪50年代偏多,以后出现下降趋势,到1978年以后,全国平均并无明显的线性增减,但从地域上看,华北降水却呈现出显著减少趋势,自60年代开始一直在减少;80年代开始长江中下游地区降水开始增加,多雨带在80年代及以后由华南北移到长江中下游。周连童和黄荣辉^[11]指出,中国夏季降水在1976年前后发生了一次明显的气候跃变,从1977-2000年夏季长江流域的降水明显增加,而华北地区和黄河流域从1977年起,降水减少。最新资料分析也发现^[12],华北夏季降水确实在20世纪70年代中后期发生了突变,之后降水显著减少。因此,近60年来华北降水发生了明显年代际变化,60年代中期以前降水偏多,60年代后期以来出现减少趋势,特别是从70年代以来减少更加明显,这与大气环流年代际改变和外强迫因子年代际变化有关。

伴随着降水的年代际变化,极端降水事件也发生了明显改变。翟盘茂和潘晓华发现^[13],华北地区极端降水事件频率显著减少;进一步研究发现^[14],1951-2000年夏半年极端降水频次在华北地区减少、在长江流域增加,全年华北地区降水量减少主要是由于强降水频次减少造成的,而长江流域降水增加主要是由于降水强度加大且极强降水事件增多造成的。Wang和Zhou利用1961-2001年中国的台站资料,定义日降水量序列的95%及97.5%为极端事件阈值,也发现华北极端降水事件频率有减少趋势,且这种趋势与平均降水变化趋势空间分布一致^[15]。最新研究也表明,华北近50年夏季降水量出现减少趋势,主要是由于暴雨频率下降造成的^[16]。这些研究结果表明,华北极端降水或暴雨事件出现年代际减少趋势,与华北降水减少有很好的对应关系,是造成华北降水减少的一个内在特征。

3 海温对华北降水的影响

3.1 太平洋海温影响

3.1.1 观测事实

研究表明,热带太平洋海温异常对华北夏季降水有显著影响^[17-19]。热带太平洋海温变化最主要的异常模态是厄尔尼诺。厄尔尼诺(El Niño)/拉妮娜(La Niña)是指赤道中东太平洋海温异常增暖/变冷,并持续半年以上的现象;南方涛动(Southern Oscillation,简称SO)是指太平洋和印度洋海平面气压反向异常变化的现象。20世纪80年代,气象学家意识到厄尔尼诺和南方涛动是一种海气耦合过程,被统一称为ENSO(El Niño/Southern Oscillation)事件。随着对ENSO研究的广泛开展,气象学家认识到ENSO是一种循环过程,其准周期为2~7年,现在ENSO是指热带太平洋地区海气相互作用^[20]。ENSO对全球气候都有着重要的影响,例如ENSO发生时,澳大利亚和印尼的干旱、南美沿岸洪涝、印度季风减弱、美国西北干旱等。ENSO对中国降水也有重大影响^[21-22]。陈文等研究发现,夏季热带中、东太平洋偏暖(El Niño)时,华北地区易发生干旱,但该海区海温偏冷(La Niña)时,华北和长江流域容易发生洪涝^[23]。总体来说,ENSO事件的发展阶段,中国江淮流域和长江中下游地区夏季风降水偏多,多洪涝,而华北和江南降水偏少,华北多干旱。

黄荣辉等研究指出,华北夏季降水发生改变可能主要是由于60年代中期和80年代到90年代初赤道东太平洋海表温度明显升高所致^[24]。陈文等的进一步研究也表明,华北夏季降水从1976年开始明显减少,与太平洋1976年开始明显增暖的年代际变化密切相关^[23]。

3.1.2 影响机制

陆日宇等研究指出,热带西太平洋海温异常是通过其引起的东亚-太平洋遥相关(Eastern Asia and Pacific pattern, EAP)来影响江淮地区夏季降水^[25]。周连童等认为,热带太平洋的SST年代际变化通过影响水汽输送而使中国夏季降水发生改变^[11]。杨修群等研究发现,当热带中东太平洋海温偏高,北太平洋中部海温偏低,即太平洋上主要表现为太平洋十年涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)暖位相,这时,华北地区气温偏高,由异常西北风控制,不利于水汽向华北地区输送,华北地区干旱^[26]。邓伟涛等进一步研究指出,20世纪70年代中后期,北

太平洋中纬度海温由正距平向负距平转变, PDO由负位相向正位相转变, 通过影响东亚夏季风环流系统, 使东亚夏季风由强变弱, 中国东部降水呈现出由“+ - +”转变为“- + -”三极的分布形态, 华北由多雨转为少雨^[27]。

3.2 印度洋海温影响

3.2.1 观测事实

印度洋海温异常最主要的模态是印度洋偶极子。Saji等最早提出了印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)的概念, 并研究了其变化对东亚气候的影响^[28]。这个偶极子主要有正位相型(海温西高东低)和负位相型(海温东高西低), 正位相型振幅强于负位相型。IOD在9-11月最强, 在1-4月最弱^[29]。进一步研究也证明了这一点^[30], 即IOD在秋季表现最明显, 且正位相的强度大于负位相的强度。李东辉等^[31]用EOF方法分解秋季热带印度洋海温得到两个主要模态, 第1模态表现为热带印度洋海温变化的一致性(USB), 该模态反映热带印度洋秋季SSTA的长期趋势变化; 第2模态表现为热带印度洋东西海温异常符号相反的偶极分布(IOD), 该模态主要反映热带印度洋秋季SSTA的年际变化。

研究发现, 华北夏季降水从1976年开始明显减少, 与印度洋1976年开始明显增暖的年代际变化密切相关, 夏季整个印度洋海温变化与华北夏季降水的负相关性非常显著, 同赤道中东太平洋的负相关性不相上下^[23]。尽管印度洋海温异常幅度比赤道中东太平洋海温异常幅度小, 但与华北夏季降水有更密切的联系^[32]。近50年印度洋海温升高、正IOD指数加强与华北夏季降水减少有很好的对应关系, 华北夏季降水减少可能是由于热带印度洋海温升高和正IOD指数加强造成的^[33]。

3.2.2 影响机制

研究指出^[34-35], 印度洋赤道低纬地区的暖(冷)SSTA, 可以在北半球中高纬度地区激发产生与PNA和EAP类似的冬季遥相关型或夏季遥相关型波列, 对亚洲季风区中低纬度地区的环流异常或天气气候异常有重要作用。当印度洋暖(冷)SSTA强迫时, 亚洲夏季风建立较正常偏晚(偏早), 撤退较早(较晚), 季风季节长度较短(较长), 季风较弱(较强)。这些与华北夏季降水偏少(偏多)有很好的对应关系。李崇银等^[29]研究表明, 赤道印度洋海温偶极子(IOD)通过影响对流层低层流场直接对亚洲夏季风产生影响, 即对应海温偶极子的正位相, 有较强南海夏季风; 而对应海温偶极子负位相, 南海夏

季风将偏弱, 而印度南部地区夏季风将偏强。赤道印度洋海温偶极子还通过影响对流层上层青藏高原反气旋以及西太平洋副热带高压, 对亚洲夏季风产生影响, 即对应海温偶极子的正(负)位相, 青藏高原反气旋将偏弱(强), 而西太平洋副热带高压也将偏弱(强)。贾小龙等^[36]认为, 当前期夏、秋南印度洋偶极子正位相, 次年夏季印度洋、南海(东亚)夏季风偏弱, 副高加强且位置偏南、西伸, 南亚高压偏强位置偏东, 易形成中国长江流域夏季降水偏多; 负位相年反之。后期冬季西太平洋暖池是联系印度洋偶极子与次年中国夏季降水的一条重要途径。顾伟宗等^[37]研究发现, 前冬季印度洋海温偏低, 水汽输送难以到达华北, 反之, 前冬季印度洋海温偏高, 水汽有效输送到达华北, 即前期冬季印度洋海温异常可以通过影响向华北的水汽输送来影响华北夏季降水。

印度洋海温异常又是如何通过影响东亚季风、水汽输送、副热带高压等来影响华北降水的呢? Guan等^[38]指出, IOD能导致在印度季风区低层气流辐合而高层气流辐散, 高层的辐散扰动激发向东北方向传播的Rossby波。刘娜等^[39]进一步研究指出, 北半球对流层位势高度异常场存在和IOD变化密切联系的遥相关作用中心, 这些作用中心呈正负相间的Rossby波列形状分布, 从印度东北部出发, 向东北方向发展, 进入北半球中高纬度和北极地区; 研究还表明, 大气行星波的能量传播是IOD和北半球对流层气候异常之间遥相关的一种可能的联系方式。

3.3 太平洋和印度洋共同影响

3.3.1 观测事实

太平洋海温变化与印度洋海温变化存在密切的联系, 两者可以共同对东亚气候和华北降水产生重要影响。研究发现^[40], 东亚冬季风与同期的赤道东太平洋、热带西印度洋海温有很好的负相关, 与西太平洋暖池海温为正相关, 即在El Niño和正IOD发生时, 冬季风偏弱, 反之偏强。研究表明^[41], IOD与ENSO有很好的正相关关系, 但相关依季节不同, 秋季相关最好, 夏季次之, 冬、春无明显相关; 另外, IOD在夏季、秋季最强, ENSO事件则在秋、冬最强, IOD事件超前ENSO事件2个月达到最强。

统计发现^[42], 赤道东太平洋、热带西印度洋海温升高(降低), 对应西太平洋暖池和热带东印度洋地区海温降低(升高), 可以把这种有机联系的变化称为太平洋—印度洋海温异常模态。这种异常模

态在春、夏、秋、冬四季的时间系数都是 20 世纪 70 年代中期以前以负位相为主,即赤道东太平洋、热带西印度洋海温偏高,西太平洋暖池和热带东印度洋地区海温偏低;而 1977 年以后,该模态系数以正位相为主,与华北降水年代际减少趋势有很好的对应关系。还有研究发现,华北夏季降水从 1976 年开始明显减少,与太平洋、印度洋 1976 年开始明显增暖的年代际变化密切相关^[23]。

3.3.2 影响机制

在年际变化上,刘毓赞等^[40]认为,当赤道太平洋、热带印度洋海温处于正异常时,海表温度异常常在东亚沿海强迫出一个异常的反气旋性环流,东亚处于其西北侧的偏南气流中,导致东亚冬季风减弱;反之,当赤道太平洋、热带印度洋海温处于负异常时,海表温度异常常在东亚沿海强迫出一个异常的气旋性环流,东亚正处于其西北侧的偏北气流中,导致东亚冬季风增强。杨霞等^[43]认为,当 El Niño 年有正 IOD 事件同时发生时,中国北方地区水汽增加,华北降水偏少现象得到抑制;当 La Niña 年有负 IOD 事件同时发生时,北方地区的水汽减少,不利于华北地区的降水。

在年代际变化上,Gong 等^[44]认为,热带太平洋和热带印度洋海表温度(简称 SST)的年代际变化通过影响副热带高压而影响中国东部夏季降水;顾薇等^[45]发现,在 20 世纪 70 年代以前,赤道东太平洋偏低、热带印度洋海温偏低,东亚高空急流偏弱偏北,副热带高压也偏北,华北降水偏多;在 70 年代以后,赤道东太平洋偏高、热带印度洋海温偏高,东亚高空急流偏强偏南,副热带高压偏南,华北降水偏少。Zhou 等^[46]认为,近 50 年来(1950-2000)全球陆地季风降水整体减弱趋势是由于全球热带大洋增暖的强迫作用所致,这种强迫主要来自赤道中东太平洋和印度洋增暖,这意味着热带大洋的增暖是导致观测中过去 50 年全球陆地季风降水减弱的重要原因。Li 等^[47]数值试验也证实了热带海温对东亚季风环流年代际变化的驱动作用,即赤道太平洋和印度洋的变暖是导致东亚夏季风减弱、华北降水减少的重要因子。

4 季风变化对华北夏季降水的影响

4.1 观测事实

华北地区受东亚夏季风影响,降水高度集中在

夏季的 6-8 月,占全年降水总量的 60% 以上。郭其蕴等^[48]研究发现,强的东亚夏季风年,华北降水偏多,长江以南降水偏少,弱季风年则相反。使用不同的分析方法和季风指标,得出的结论也都比较一致,即夏季风强的年份或夏季风异常活跃的年份,华北易涝,夏季风弱的年份,华北易旱。

关于夏季降水变化原因最早始于季风研究^[6],已取得许多重要成果。如陈隆勋^[49]、Tao 等^[50]发现,亚洲地区存在着两支季风环流,即印度季风和东亚季风。影响印度的称为印度季风,影响中国的称为东亚季风,它们是独立的两个子季风系统。由于海陆热力分布和青藏高原大地形的影响,东亚与印度季风存在本质差异。东亚季风是副热带性质的季风,受中高纬度的影响比较大,东亚季风比印度季风要复杂得多。

朱锦红等^[51]发现,华北降水与东亚夏季风强度的长期变化有很好的对应关系,伴随着全球大气环流形势在 20 世纪 70 年代的跃变,亚洲、非洲季风减弱,并一直维持至今,华北降水发生了明显改变。进一步研究表明,近 50 年华北夏季降水减少与东亚夏季风减弱有密切的联系^[52-53]。汤绪等用日可降水量指数定义夏季风北边缘并研究了其变化与夏季降水变化的关系,发现夏季风北边缘自 70 年代末出现南退现象,与华北夏季降水减少有很好的对应关系^[54]。因此,随着东亚夏季风的年代际减弱变化,华北地区降水减少,而长江流域降水增多,使得中国东部地区降水呈现出“南涝北旱”的分布特征。

4.2 影响机制

东亚夏季风可以通过副热带高压的变化来影响华北夏季降水。张庆云等指出^[55],东亚夏季风偏强年,鄂霍次克海区域一般没有阻塞高压,西太平洋副热带高压位置偏北,长江流域梅雨锋区降水比常年偏少,华北夏季降水可能偏多;东亚夏季风偏弱年,东亚中高纬度鄂霍次克海区域一般有阻塞高压型势,西太平洋副高位置偏南,长江流域梅雨锋区降水比常年偏多,华北夏季降水可能偏少。由于季风主要是由于海陆的热力差异引起的,因此,有的学者从大陆和海洋的加热场出发,研究东亚夏季风影响华北夏季降水的机制。如黄荣辉等^[56]认为,热带西太平洋因对流活动产生的热源通过西太平洋副高的变化影响到华北夏季降水。庄世宇等^[57]认为,孟加拉地区的热源异常通过对西太平洋副高的影响而影响华北夏季降水。赵声蓉等^[58]认为,印

度半岛中北部地区和菲律宾附近地区的凝结潜热加热异常将引起青藏高压和西太平洋副高的异常变化,进而影响到华北地区的降水。张礼平等^[59]认为,若夏季暖池对流活动减弱, Hadley 环流偏弱,使得夏季西太平洋副热带高压主体位置偏南,导致中国夏季主雨带不能北推至华北,而长期滞留长江中下游,最后造成长江中游降水异常偏多,华北降水偏少。

张人禾指出,夏季风主要通过水汽输送的变化来影响华北地区夏季降水^[60]。谢坤等认为,与华北地区夏季旱涝密切相关的异常水汽输送主要是南海和西太平洋及西风带水汽输送异常^[61]。马京津等认为,东亚夏季风南风北界的南撤导致了华北地区水汽输送通量的减少,从而造成近年华北夏季降水减少^[62]。

东亚夏季风可通过东亚副热带高空急流变化影响东亚气候和华北地区降水。东亚副热带高空急流是影响东亚气候的重要系统之一,它的强度和南北位置与中国东部各区雨带的开始和结束密切相关。每年随着夏季风的向北推进,急流会发生3次明显的北跳,与东亚夏季雨带的季节性北移在时间上有很好的对应关系。5月初急流第一次北跳,急流轴移到30°N以北,之后南海夏季风爆发;6月初急流的第二次北跳是长江中下游地区梅雨开始的征兆^[50,63];在7月中旬急流又一次北移,之后,长江流域梅雨结束,从而华北雨季开始。研究表明^[64],强夏季风年,东亚高空急流位置异常偏北,会造成长江中下游地区梅雨偏少而华北地区降水偏多;相反,弱夏季风年,急流位置异常偏南,造成长江中下游地区梅雨偏多而华北地区降水偏少。这是由于急流附近有着强烈的水平和垂直风切变,由此产生的斜压和正压不稳定对大气扰动的发展具有重要作用,因此急流强度和南北位置的变化会对其下方的垂直运动和降水产生重要影响。

为了研究季风变化与降水的关系,建立一个能够反映季风变化特征的指标非常重要^[65-67]。由于东亚季风的复杂性,在过去的研究中,已定义了数十个季风指数,每种季风指数都只能从不同的侧面描述季风变化^[68]。高辉等^[69]、江滢等^[70]分别选择几个比较有代表性的夏季风指数进行对比分析,结果发现,这些指数对长江流域降水有很好的指示意义,但却不能很好地描述华北夏季降水变化情况。这是因为,东亚西部为全球最大的欧亚大陆,东部为

全球最大的海洋——太平洋,西侧有全球最高的地形——青藏高原,这些地形特征使得该地区季风有着特殊的表现,空间分布和年际、年代际变化极其复杂,造成对这一地区季风强度和位置变化以及降水的描述非常困难。到目前为止,还没有一个指数能够同时很好地描述东亚季风的复杂性。

5 其他因子的影响

5.1 副热带高压的影响

西太平洋副高作为东亚季风环流系统的重要成员,与中国夏季雨带的形成和区域旱涝有密切的关系。研究表明,华北夏季降水的年际和年代际变化与西太平洋副高脊线位置的年际和年代际变化密切相关^[71-72]。张恒德等^[73]研究表明,华北夏季降水与副高脊线、北界指数之间以正相关为主,与副高面积、强度指数基本呈负相关;当西太平洋副高明显北抬时,华北降水易偏多。

李春等^[74]研究发现,副高脊线和北界位置偏南,贝加尔湖附近常伴有阻塞高压存在,华北夏季少雨;反之,华北夏季多雨。于润玲等^[18]研究发现,西太平洋副高加强西伸北抬,贝加尔湖附近地区为低压槽所控制的环流背景下,华北降水偏多易涝;在相反的环流背景下,华北地区降水将偏少,易出现干旱。谭桂容等^[75]认为,当西太平洋副高偏西偏北时,欧亚上空从高纬到低纬易出现“-+”的遥相关型,华北降水偏少,易旱;反之,易涝。

5.2 积雪的影响

中国学者很早就注意到,青藏高原积雪对气候特别是对中国旱涝变化有重要影响。韦志刚等^[76]利用地面站、NOAA卫星和美国宇航局被动微波遥感仪观测的3种积雪资料,统计分析青藏高原冬春积雪对中国汛期降水的影响,结果发现,冬、春多雪年,夏季长江以北地区少雨,华北平原为明显少雨中心,长江以南为多雨区;冬、春少雪年,夏季长江以北多雨,华北平原为明显多雨中心,东南沿海少雨。进一步研究发现^[77],青藏高原冬季积雪自20世纪70年代后期开始经历了一个显著的从少雪到多雪的转变,造成华北夏季降水减少。最新研究也表明^[78],前期冬季高原积雪多,夏季华北降水偏少,反之可能偏多,华北降水年代际变化与青藏高原积雪年代际变化有很好的对应关系。

积雪又是如何影响华北地区降水的呢? 彭京

备等^[77]认为,青藏高原的积雪变化通过影响西太平洋副高和高原东侧低涡的发展,造成华北夏季降水减少,而使得长江流域降水增多。朱玉祥等^[79]数值模拟证明,青藏高原冬季多雪,会导致青藏高原热源减弱持续到夏季,造成东亚夏季风和南亚夏季风减弱,中国出现“南涝北旱”形势,华北降水偏少。

5.3 海冰的影响

海冰被认为是影响天气和气候的另一个重要因子。关于海冰变化与中国汛期降水的影响研究目前还比较少。武炳义等^[80]研究发现,冬季喀拉海、巴伦支海海冰可以影响8月份海河流域降水。宋华等^[81]研究表明,华北夏季降水与春季北极海冰呈正相关关系,即春季北极海冰面积偏大(小),当年夏季华北大部分地区偏涝(旱)。卞林根等^[82]研究南极冬季海冰涛动指数与中国夏季降水的关系,发现在长江以北地区为负相关,在长江及以南地区为正相关,即南极冬季海冰多,夏季华北降水偏少,反之亦然。

海冰是如何影响华北降水的呢?杨修群等^[83]认为,格陵兰—巴伦支海极冰偏多,导致亚洲夏季风环流特别是东亚季风环流增强,中国东南部降水偏多,而东西伯利亚—波弗特海海冰偏多,导致东亚夏季风环流减弱,中国东南部降水偏少。武炳义等^[84]数值模拟结果表明,冬季巴伦支海海冰偏多(少)时,春季(4-6月)北太平洋中部海平面气压升高(降低),阿留申低压减弱(加深),有利于春季白令海海冰偏少(多);到夏季,亚洲大陆热低压加深(减弱),500 hPa西太平洋副热带高压位置偏北(南)、强度偏强(弱),东亚夏季风易偏强(弱),从而影响华北夏季降水。谢付莹等^[85]认为,哈得孙湾关键时段内海冰面积偏大(小),同年亚洲夏季风偏弱(强),8月西太平洋副高的位置偏东(西),强度偏弱(强),东亚西风急流减弱(加强),华北夏季降水偏少(多)。

6 结论与讨论

华北降水减少严重影响该地区水资源供应量,对工农业生产、居民生活、城市运行带来严重威胁。因此,对华北降水变化问题的研究具有十分重要的战略意义。以下是结论和需要进一步研究的问题。

(1) 华北降水变化具有明显的年代际变化特征和突变现象。近50年表现为减少趋势,从20世纪

70年代突变发生以来,华北降水减少更加明显。降水减少尤其夏季降水减少主要是由于极端强降水事件频次减少造成的。既然华北降水存在年代际变化,也就是有从多到少、从少到多的转变过程,那么未来什么时候华北降水发生转型是个值得很好研究的问题。

(2) 关于太平洋海温对华北夏季降水的影响。太平洋海温最主要的异常模态是ENSO,关于这方面的研究成果很多,通常认为它与江淮流域降水关系密切。但近年来的研究发现,ENSO对华北夏季降水也有重要影响,其中,关于ENSO对华北年际降水异常的研究相对较多,而对华北降水年代际变化的研究还比较少,关于ENSO影响华北降水的机制研究更少,需要加强这方面的研究。

(3) 关于印度洋海温对华北夏季降水的影响。研究发现,虽然热带印度洋海温变化异常幅度比赤道东太平洋海表温度异常幅度小很多,但对华北夏季降水却有更重要的影响,这在以往的研究中没有给予更多关注,这方面的研究成果还比较少。一般认为,热带印度洋海温平均值变化是造成华北夏季降水长期变化趋势的影响因子,而印度洋偶极子是造成华北夏季降水年际异常的影响因子。那么印度洋海温异常是如何影响华北夏季降水的呢?需要进一步深入研究,这可以为改进降水气候预测技术提供科学基础。

(4) 关于东亚夏季风与华北夏季降水的关系。研究结论大都认为,夏季风强,华北夏季降水偏多,夏季风弱,华北夏季降水少。实际上,东亚夏季风是非常复杂多变的环流系统,其对华北夏季降水的影响非常复杂,通常认为东亚夏季风通过副热带高压、水汽输送、高空急流等的变化来影响华北夏季降水。尽管取得了很多成果,但要准确、定量预测东亚夏季风的暴发时间、持续时间、强度还存在很大难度,常常造成中国汛期降水预测出现很大偏差。关于东亚夏季风的定量描述也很困难。因此,如何更好地定量描述东亚夏季风季节内、年际、年代际变化及其影响华北夏季降水的机制问题仍然需要作进一步深入研究。

(5) 关于西太平洋副热带高压对华北夏季降水的影响。众所周知,副热带高压位置决定雨带的位置,其夏季位置的变化对华北降水尤其暴雨发生有重要影响。目前,对准确预测副热带高压季节内变化还存在很大难度,副热带高压长期变化趋势与华

北夏季降水的关系研究成果也比较少。需要加强副热带高压季节内变化、长期变化对华北夏季降水的影响研究。

参考文献

- [1] 叶笃正, 黄荣辉. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 387.
- [2] 俞煊, 杨贵羽, 周祖昊, 等. 天津夏季降水演变规律及其城市效应. 地理科学进展, 2008, 27(5): 43-48.
- [3] 原志华, 延军平, 刘宇峰. 1950年以来汾河水沙演变规律及影响因素分析. 地理科学进展, 2008, 27(5): 57-63.
- [4] 李春强, 杜毅光, 李保国. 1965-2005年河北省降水量变化的小波分析. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1340-1344.
- [5] 向亮, 刘学锋, 郝立生, 等. 未来百年不同排放情景下滦河流域径流特征分析. 地理科学进展, 2011, 30(7): 861-867.
- [6] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, 1(1): 1-27.
- [7] Zhu J H, Wang S W. 80a-oscillation of summer rainfall over east of China and east Asian summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(5): 1043-1051.
- [8] 张庆云. 1880年以来华北降水及水资源的变化. 高原气象, 1999, 18(4): 486-495.
- [9] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001: 458.
- [10] 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 中国近80年来气候变化特征及其形成机制. 气象学报, 2004, 62(5): 634-646.
- [11] 周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 274-290.
- [12] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805.
- [13] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 2003, 58(增刊): 1-10.
- [14] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [15] Wang Y Q, Zhou L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L09707, doi:10.1029/2005GL022574.
- [16] 郝立生, 闵锦忠, 丁一汇. 华北地区降水事件变化和暴雨事件减少原因分析. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1160-1167.
- [17] 李超. 厄尔尼诺对我国汛期降水的影响. 海洋学报, 1992, 14(5): 45-51.
- [18] 于润玲, 孙照渤, 陈海山. 华北夏季降水与北半球环流及北太平洋海温关系的初步分析. 南京气象学院学报, 2002, 25(5): 577-586.
- [19] 严华生, 严小冬. 前期高度场和海温场变化对我国汛期降水的影响. 大气科学, 2004, 28(3): 405-414.
- [20] Trenberth K E. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(12): 2771-2777.
- [21] 陆端军, 张先恭. 中国降水和温度对 ENSO 响应的特征. 应用气象学报, 1995, 6(1): 118-123.
- [22] 刘颖, 倪允琪. ENSO 对亚洲夏季风环流和中国夏季降水影响的诊断研究. 气象学报, 1998, 56(6): 618-691.
- [23] 陈文, 康丽华, 王玓. 我国夏季降水与全球海温的耦合关系分析. 气候与环境研究, 2006, 11(3): 259-269.
- [24] 黄荣辉, 徐予红, 周连童, 等. 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.
- [25] 陆日宇, 黄荣辉. 东亚-太平洋遥相关型波列对夏季东北阻塞高压年际变化的影响. 大气科学, 1998, 22(5): 727-734.
- [26] 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.
- [27] 邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系. 大气科学, 2009, 33(4): 835-846.
- [28] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, 401(6571): 360-363.
- [29] 李崇银, 穆明权. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响. 大气科学, 2001, 25(4): 433-443.
- [30] 谭言科, 刘会荣, 李崇银, 等. 热带印度洋偶极子的季节性位相锁定可能原因. 大气科学, 2008, 32(2): 197-205.
- [31] 李东辉, 谭言科, 张瑰, 等. 东亚冬季季风对热带印度洋秋季海温异常的响应. 热带海洋学报, 2006, 25(4): 6-13.
- [32] 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠. 华北降水季节演变主要模态及影响因子. 大气科学, 2011, 35(2): 217-234.
- [33] 郝立生. 华北降水时空变化及降水量减少影响因子研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [34] 晏红明, 肖子牛. 印度洋海温异常对亚洲季风区天气气候影响的数值模拟研究. 热带气象学报, 2000, 16(1): 18-27.
- [35] Guan Z Y, Yamagata T. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(10): 1541-1544.
- [36] 贾小龙, 李崇银. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1238-1249.
- [37] 顾伟宗, 陈海山, 孙照渤. 华北春季降水及其与前期印度洋海温的关系. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 484-490.

- [38] Guan ZY, Ashok K, Yamagata T. Summertime response of the tropical atmosphere to the Indian ocean dipole sea surface temperature anomalies. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, 81(3): 533-561.
- [39] 刘娜, 周秋林, 管兆勇, 等. 北半球对流层气候异常对热带印度洋海温偶极子型振荡的响应及动力机制解释. *自然科学进展*, 2008, 18(6): 668-673.
- [40] 刘毓赞, 赵荻, 曹杰. 热带太平洋和印度洋海温异常对东亚冬季风影响的一个物理机制. *高原山地气象研究*, 2008, 28(1): 24-29.
- [41] 李琰, 王亚非, 魏东. 前期热带太平洋、印度洋海温异常对长江流域及以南地区6月降水的影响. *气象学报*, 2007, 65(3): 393-405.
- [42] 据建华, 陈琳玲, 李崇银. 太平洋印度洋海温异常模态及其指数定义的初步研究. *热带气象学报*, 2004, 20(6): 617-624.
- [43] 杨霞, 管兆勇, 朱保林. IOD对ENSO影响中国夏季降水和气温的干扰作用. *南京气象学院学报*, 2007, 30(2): 170-177.
- [44] Gong D Y, Ho C H. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 1436, doi:10.1029/2001GL014523.
- [45] 顾薇, 李崇银, 潘静. 太平洋-印度洋海温与我国东部旱涝型年代际变化的关系. *气候与环境研究*, 2007, 12(2): 113-123.
- [46] Zhou T J, Yu R C, Li H M, et al. Ocean forcing to changes in global monsoon precipitation over the recent half century. *Journal of Climate*, 2008, 21(15): 3833-3852.
- [47] Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950-2000. *Climate Dynamics*, 2010, 34(4): 501-514.
- [48] 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.
- [49] 陈隆勋. 东亚季风系统的结构及其中期变动. *海洋学报*, 1984, 3(6): 744-785.
- [50] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. // Chang C P, Krishnamurti T N. Eds. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 1987: 60-92.
- [51] 朱锦红, 王绍武, 慕巧珍. 华北夏季降水80年振荡及其与东亚夏季风的关系. *自然科学进展*, 2003, 13(11): 1205-1209.
- [52] Dai X G, Wang P, Chou J F. Multiscale characteristics of the rainy season rainfall and interdecadal decaying of summer monsoon in North China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(12): 2730-2734.
- [53] Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 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.
- [54] 汤绪, 陈葆德, 梁萍, 等. 有关东亚夏季风北边缘的定义及其特征. *气象学报*, 2009, 67(1): 83-89.
- [55] 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.
- [56] 黄荣辉, 李维京. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制. *大气科学*, 1988, 12(增刊): 107-117.
- [57] 庄世宇, 纪立人. 夏季副热带西太平洋大气环流持续异常. *科学通报*, 1997, 42(20): 2196-2199.
- [58] 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 华北汛期降水与亚洲季风异常关系的研究. *气象学报*, 2002, 60(1): 68-75.
- [59] 张礼平, 丁一汇, 陈正洪, 等. OLR与长江中游夏季降水的关联. *气象学报*, 2007, 65(1): 75-83.
- [60] 张人禾. El Niño盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用. *高原气象*, 1999, 18(4): 567-574.
- [61] 谢坤, 任雪娟. 华北夏季大气水汽输送特征及其与夏季旱涝的关系. *气象科学*, 2008, 28(5): 508-514.
- [62] 马京津, 于波, 高晓清, 等. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响. *高原气象*, 2008, 27(3): 517-523.
- [63] 李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究. *大气科学*, 2004, 28(5): 641-658.
- [64] 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响. *地球物理学报*, 2004, 47(1): 10-18.
- [65] 郭其蕴. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析. *地理学报*, 1983, 38(3): 207-217.
- [66] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1992, 118(507): 877-926.
- [67] Chen H, Ding Y H, He J H. Reappraisal of Asian summer monsoon indices and the long-term variation of monsoon. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 21(2): 168-178.
- [68] Wang B, Wu Z W, Li J P, et al. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon. *Journal of Climate*, 2008, 21(17): 4449-4463.
- [69] 高辉, 张芳华. 关于东亚夏季风指数的比较. *热带气象学报*, 2003, 19(1): 79-86.
- [70] 江湛, 翟盘茂. 几种亚洲季风指数与中国夏季主要雨型的关联. *应用气象学报*, 2005, 16(z1): 70-76.
- [71] 陈兴芳. 1994年西太平洋副高异常变化及其成因分析. *气象*, 1995, 21(12): 3-7.
- [72] 孙安健, 高波. 华北平原地区夏季严重旱涝特征诊断分析. *大气科学*, 2000, 24(3): 393-402.

- [73] 张恒德, 金荣花, 张友妹. 夏季北极涡与副热带高压的联系及对华北降水的影响. 热带气象学报, 2008, 24(4): 417-422.
- [74] 李春, 孙照渤, 陈海山. 华北夏季降水的年代际变化及其与东亚地区大气环流的联系. 南京气象学院学报, 2002, 25(4): 455-462.
- [75] 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.
- [76] 韦志刚, 罗四维, 董文杰, 等. 青藏高原积雪资料分析及其对我国夏季降水的影响. 应用气象学报, 1998, 9(增刊): 39-46.
- [77] 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 青藏高原异常雪盖和ENSO的多尺度变化及其与中国夏季降水的关系. 高原气象, 2005, 24(3): 366-377.
- [78] 宋燕, 张菁, 李智才, 等. 青藏高原冬季积雪年代际变化及对中国夏季降水的影响. 高原气象, 2011, 30(4): 843-851.
- [79] 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.
- [80] 武炳义, 高登义, 黄荣辉. 冬春季节北极海冰的年际和年代际变化. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 249-258.
- [81] 宋华, 孙照渤. 华北地区夏季旱涝的时空分布特征及其与北极海冰的关系. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 289-295.
- [82] 卞林根, 林学春. 南极海冰涛动及其对东亚季风和我国夏季降水的可能影响. 冰川冻土, 2008, 30(2): 196-203.
- [83] 杨修群, 谢倩, 黄士松. 北极冰异常对亚洲夏季风影响的数值模拟. 海洋学报, 1994, 16(5): 35-40.
- [84] 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 北极海冰的厚度和面积变化对大气环流影响的数值模拟. 气象学报, 2001, 59(4): 414-428.
- [85] 谢付莹, 何金海. 华北夏季降水与哈得孙湾海冰的相关分析. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 308-316.

Progress of Precipitation Research in North China

HAO Lisheng¹, DING Yihui²

(1. Hebei Climate Center, Shijiazhuang 050021, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: The precipitation reduction in North China has made the already intense water resource situation even more severe, which poses a great threat to local industrial and agricultural production and future development, and has aroused great concern of the governments at all levels and the scientific community. For example, to alleviate the situation of water stress in North China, the Central Government has implemented the South-to-North Water Diversion Project. What is the mechanism for changes in North China precipitation? Understanding the problem can help us to recognize the future trends and reverse time in precipitation of North China. From the angle of interdecadal variations of precipitation in North China, this article mainly reviewed the impact mechanism on summer precipitation in North China on the sea surface temperature, the East Asian summer monsoon, subtropical high, snow and sea ice changes. Finally, this paper pointed out the direction for future research, including: what is the time for North China precipitation transformation from less to more; the mechanism of ENSO impact on precipitation in North China and the influence of ENSO long-term variation trend on precipitation in North China; what is the impact mechanism of Indian Ocean sea surface temperature anomalies on summer precipitation in North China; how to better quantitatively describe the East Asian summer monsoon intraseasonal, interannual, decadal variations and their impact mechanism on summer rainfall in North China; subtropical high intraseasonal changes, long-term changes and how they affect summer precipitation in North China.

Key words: North China; precipitation; change; research; progress

本文引用格式:

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.