

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.002

中国水汽输送年际和年代际变化研究进展

孙博, 王会军, 周波涛, 李惠心, 朱宝艳

(南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 大气中的水汽输送对于全球的水分循环、气候系统、生态环境等具有重要意义。水汽输送是影响中国旱涝空间分布的重要因素, 其年际和年代际变化与厄尔尼诺-南方涛动、海温、北大西洋涛动、太平洋年代际涛动等因素对东亚大气环流的调控作用有关。本文就近期关于中国地区水汽输送年际和年代际变化的部分研究工作进行了回顾和评述, 包括影响中国东部降水年际和年代际变化的水汽输送机制、影响梅雨特征年代际变化的水汽输送机制、热带海温对中国上空水汽输送的影响机制等问题。此外, 本文回顾了近期与青藏高原地区水汽输送机制有关的研究进展。

关键词: 水汽输送; 年际/年代际变化; 降水; 海温

中图分类号: P339 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2020)05-0644-10

在地球水资源中, 大气中的水汽含量仅占全球总水量的0.001%左右^[1], 但是大气水分循环过程非常活跃、对大气降水具有决定性作用, 对全球气候系统和生态环境具有极其重要的影响。水汽输送是大气水分循环过程中的一个关键要素, 在海洋与内陆之间、低纬地区与高纬地区之间的水分交换过程中扮演着重要角色, 对全球干-湿或旱-涝的空间分布具有重要作用。此外, 在全球变暖背景下, 极端降水、极端降雪、干旱、洪涝等极端气候灾害频发, 对全球社会安全和经济发展造成了巨大威胁, 这些极端气候事件也与水汽输送密切相关^[2-6]。

中国地区的气候变化受季风影响显著, 季风环流主导的水汽输送在其中扮演了重要角色。夏季, 中国降水主要受与印度季风和东亚夏季风有关的水汽输送影响; 冬季, 中国降水则主要受与东亚冬季风有关的水汽输送影响^[7]。1961—2016年期间, 东亚季风环流系统表现出明显的年际和年代际变化特征, 中国地区的水汽输送在不同季节也表现出不同的年际和年代际变化特征。中国地区水汽输送的年际和年代际变化受诸多因素的影响, 包括厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、热带海温、西太平洋对流活动、北大西洋涛动(NAO)、太平洋年代际涛动(PDO)等等。深入理解这些因素影响中国上空水汽输送的物理机制, 对于理解中国气候的年际和年代际变化具有重要意义。

本文根据近期关于中国上空水汽输送年际和年代际变化的部分研究工作进行总结和评述。需要注意的是, 由于地理位置和地势高度的原因, 中国西北地区和青藏高原地区的水汽输送机制与中国东部地区的水汽输送机制具有显著差异, 本文主要关注中国东部地区的水汽输送机制。

1 中国水汽输送的气候平均态

气候平均态是指多年平均的气候状态。北半球夏季(6—8月), 中国地区水汽输送系统主要由以下3条

收稿日期: 2020-04-15; 网络出版日期: 2020-06-12

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200615.1825.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41991283; 41805047)

作者简介: 孙博(1987—), 男, 河北任丘人, 教授, 主要从事气候变化、大气水分循环、气候预测等方面研究。

E-mail: sunb@nuist.edu.cn

通信作者: 王会军, 中国科学院院士。E-mail: wanghj@mail.iap.ac.cn

水汽输送通道组成(图1(a))。①中纬度西风带水汽输送通道。水汽主要来源于中高纬亚欧大陆地区,经中纬度西风带输送至中国西北、华北、东北地区以及青藏高原地区。②印度季风西南水汽输送通道。水汽主要来源于热带印度洋和孟加拉湾,经印度季风以西南气流的形式输送至中国东部地区以及青藏高原地区。③西太平洋副热带高压西侧的水汽输送通道。水汽直接来源于热带西太平洋和中国南海等地,沿副热带高压西侧边缘以东南气流或自南向北气流的形式输送至中国东部地区。

北半球冬季(12月至次年2月),中国地区水汽输送系统主要由2条水汽输送通道组成(图1(b))。①长江以北地区的西北风水汽输送通道。水汽主要来源于中高纬亚欧大陆地区,经东亚冬季风以西北气流的形式输送到中国北方地区。②长江以南的西南风水汽输送通道。水汽主要来源于南亚和东南亚地区,经由青藏高原南侧的西风绕流输送到中国南方地区。

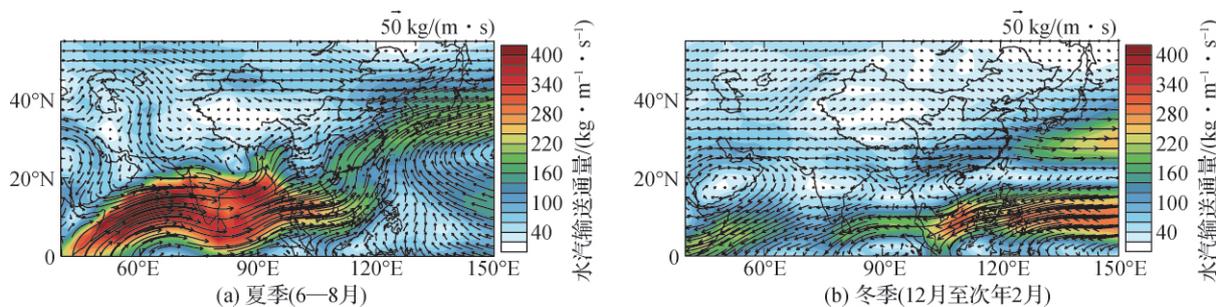


图1 1980—2017年期间1000~300 hPa垂直积分水汽输送通量

Fig. 1 Climatology of monthly mean 1000—300 hPa vertically integrated water vapor flux during 1980—2017

值得注意的是,中国各个地区发生降水/降雪时的水汽输送通道与上述水汽输送通道的气候平均态相比存在一定差异。例如,冬季东北地区强降雪的主要水汽源地为中国东部地区、渤海、黄海、日本海^[3];冬季华南地区降水的主要水汽源地是西太平洋^[8];来自中国东部和南部陆地区域蒸发的水汽对夏季和冬季华北地区、北方半干旱地区的降水都有重要贡献^[8-9]。此外,有外国学者认为中国东部石笋记录反映的主要是印度夏季风降水的变率^[10],但近期研究表明印度洋和西太平洋都是中国东部夏季降水的重要水汽源地^[8,11],因此,中国东部石笋记录是可以反映东亚夏季风降水变率的。

2 夏季水汽输送的年际和年代际变化

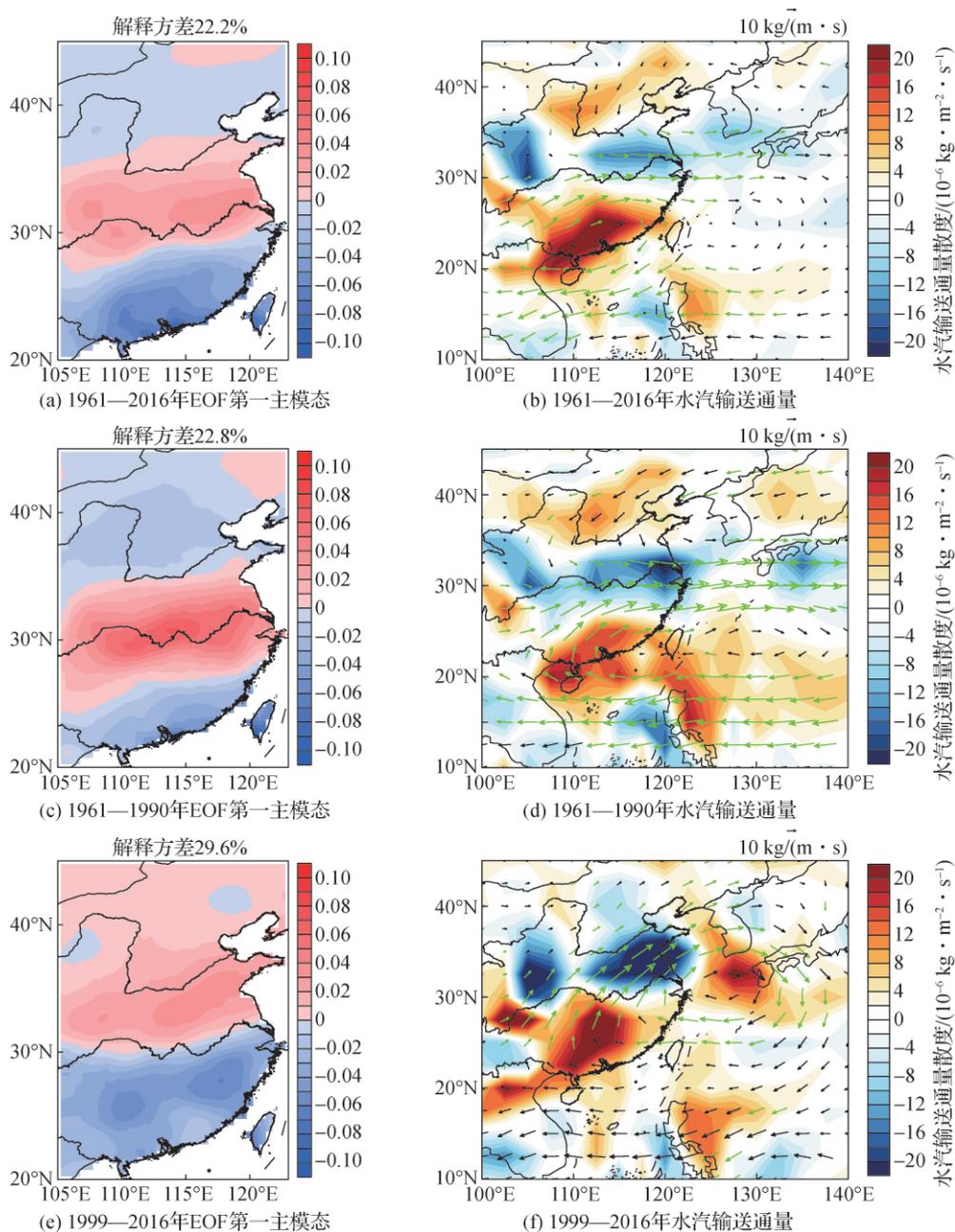
2.1 中国东部夏季降水年际变化的水汽输送机制

过去60年以来,特别是在20世纪90年代以前,中国东部地区夏季降水年际变率的经验正交分解(Empirical orthogonal function, EOF)第一主模态正位相主要表现为“负-正-负”经向三极子型(图2(a),图2(c)),即华南偏少-长江流域偏多-华北偏少,负位相反之^[12]。夏季降水的第一主模态正位相受东亚地区反气旋-气旋式经向偶极子型的水汽输送异常影响(图2(b),图2(d)),该水汽输送异常型可引起长江流域水汽辐合、华南和华北地区水汽辐散,导致长江流域降水偏多,而华南和华北地区降水偏少^[12-13]。同时,该水汽输送异常型也是东亚上空水汽输送年际变化的EOF第一主模态。

东亚地区夏季水汽输送和降水年际变化的第一主模态与热带海气相互作用密切相关。当北半球夏季热带西太平洋上空对流活动偏强时,热带西太平洋异常的对流活动可通过激发向北传播的罗斯贝波,在副热带西太平洋上空引起下沉运动异常和反气旋异常,并进一步在其北侧引起上升运动异常和气旋异常(图2(b),图2(d)),反之亦然,此即太平洋-日本/东亚-太平洋(PJ/EAP)遥相关机制^[14-15]。除此之外,北半球夏季热带印度洋海温异常对于东亚夏季水汽输送的年际变化也有重要作用:厄尔尼诺事件处于衰退期的次年夏季,热带印度洋海温一般偏高,其上空增强的对流活动可激发向东传播的开尔文波,在热带西太平洋大气边界层

引起东风异常,从而在西北太平洋大气边界层引起反气旋切变异常,在埃克曼抽吸机制作用下引起西北太平洋大气边界层辐散异常和下沉运动异常,抑制了西北太平洋上空的对流活动,导致西北太平洋出现异常反气旋^[16-20](图2(b),图2(d))。热带印度洋海温异常引起的上述效应称为“开尔文波-埃克曼辐散效应”^[18]。

中国东部夏季降水的年际变化第一主模态及相关的水汽输送异常型在1990年代后发生了年代际变化^[12]。1990年代后,中国东部夏季降水的年际变化第一主模态正位相由之前的“负-正-负”经向三极子型转变为了“负-正”经向偶极子型,即长江以南地区降水偏多-长江以北地区降水偏少,负位相反之(图2(e))。



(b)、(d)、(f) 通量异常(箭头),其中绿色箭头表示通过了90%显著性水平的 t 检验

图2 中国东部地区夏季降水年际变率的 EOF 第一主模态和 EOF 第一主模态标准化时间序列线性回归的水汽输送通量异常
Fig. 2 The first EOF mode of summer precipitation in eastern China with the corresponding explained variance labeled in the top-right corner and the water vapor flux anomalies regressed on the standardized time series of first EOF mode

该空间分布型主要受西北太平洋的反气旋式单极子型水汽输送异常影响(图2(f)): 西北太平洋水汽输送异常为反气旋异常时,反气旋异常西北侧的西南风异常引起中国东部地区西南水汽入流增强,长江以北(南)地区出现水汽辐合(辐散)异常,导致长江以北地区降水偏多(偏少),反之亦然。此次年代际变化背后的物理机制比较复杂,与热带太平洋和印度洋海气相互作用对东亚水汽输送年际变化调控作用的年代际变异有关^[12]。

2.2 中国东部夏季降水年代际变化的水汽输送机制

中国东部夏季降水在20世纪70年代末、90年代初、90年代末发生过3次显著年代际变化,这3次年代际变化与东亚夏季水汽输送的年代际变化密切相关。1979年以后,东亚夏季风显著减弱,中国东部夏季自南向北的经向水汽输送整体减弱(图3(b)),引起长江流域水汽辐合异常,华南和华北地区水汽辐散异常,导致1979年以后长江流域降水增多、而华南和华北地区降水则减少(图3(a))。1992年以后,西北太平洋和中国南海上空出现反气旋水汽输送异常,中国南方地区上空出现气旋式水汽输送异常,长江以北地区上空出现自东向西的水汽输送异常(图3(d)),这些水汽输送异常引起长江以南地区水汽辐合异常、江淮流域水汽辐散异常、华北地区水汽辐合异常,导致1992—1999年期间长江以南地区夏季降水增多、江淮流域降水减少、华北地区降水增多(图3(c));在此期间,华南地区夏季大范围极端降水事件也显著增加^[21]。1999年以后,中国南海上空出现气旋式水汽输送异常,中国南方的西南水汽入流减弱,同时蒙古和中国北方上空出现反气旋式水汽输送异常、中国北方的西风水汽输送减弱(图3(f)),引起长江流域和华北地区水汽辐散异常、黄淮流域和华南地区水汽辐合异常^[22],导致1999年以后长江流域和华北夏季降水减少、黄淮流域和东南沿海地区夏季降水增多(图3(e))。

东亚水汽输送在20世纪90年代末的这次年代际变化与PDO对东亚大气环流的影响有关^[23-24]。PDO在20世纪90年代末以后由正位相转为负位相,热带中东太平洋海温表现为冷异常,北太平洋海温表现为暖异常。统计分析和数值试验表明^[23-24],PDO负位相时,其海温异常可通过海气相互作用引起东亚中纬度地区高空西风减弱,影响东亚上空西风急流的位置并引起西风急流的次级环流发生变化,导致长江流域水汽辐散异常、黄淮流域水汽辐合异常。

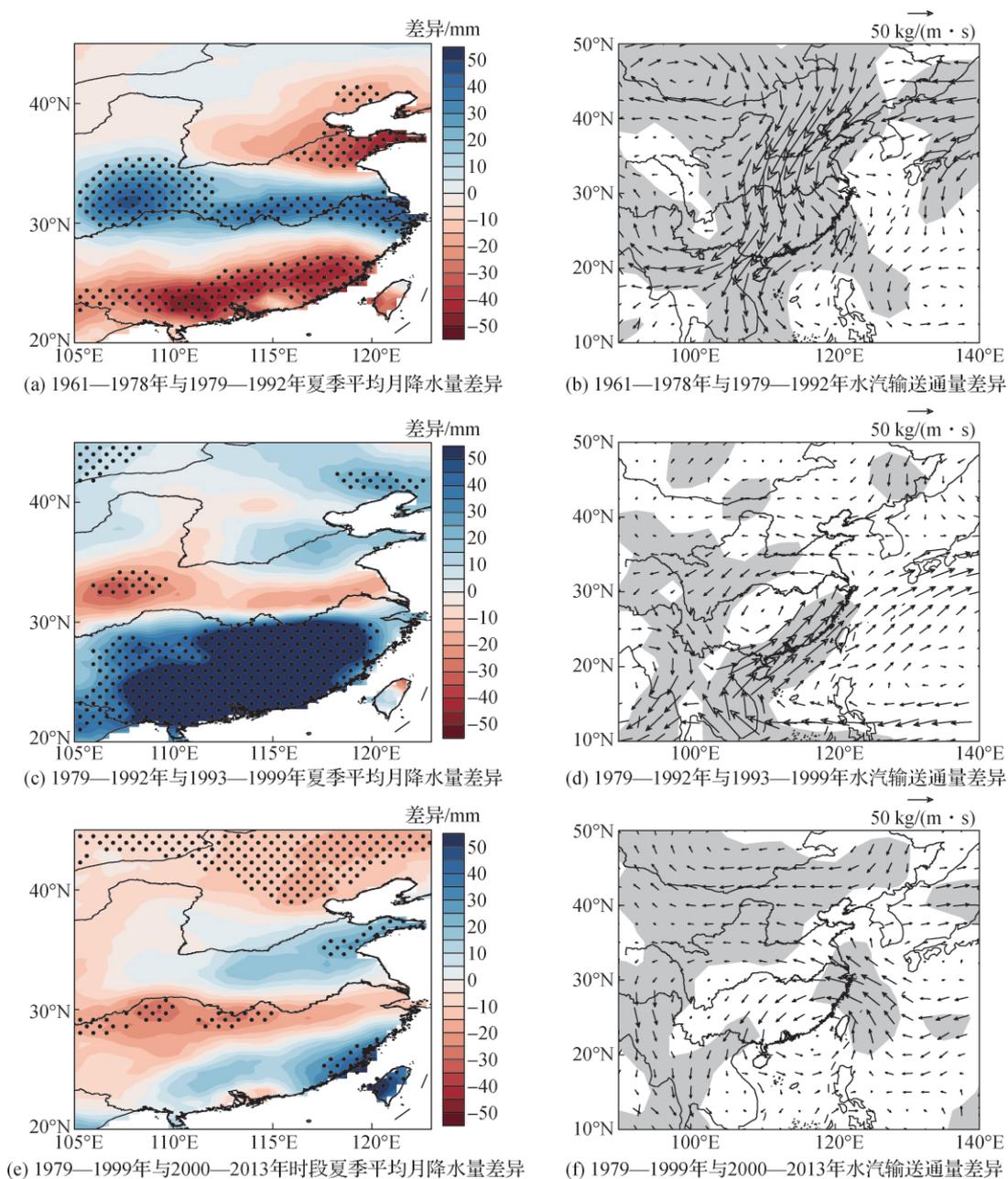
2.3 梅雨特征年代际变化的水汽输送机制

1961—2016年期间,长江流域的梅雨特征表现出了明显的年代际变化。根据综合考虑了降水、相对湿度、垂直速度等变量的梅雨特征指数的变化,长江流域梅雨峰值日期在20世纪80年代之前和90年代之后通常发生在6月下旬,而在1985—1997年期间则推迟至7月初;长江流域梅雨强度在20世纪80年代之前和2005年之后相对较弱,在1985—1997年期间相对较强^[25]。

上述梅雨特征的年代际变化与PDO对东亚夏季水汽输送的调控作用有关。PDO在1961—1980年期间为负位相,在1981—1999年期间为正位相,在2000—2016年期间主要为负位相。在1986—1997年期间,正位相的PDO海温异常引起北太平洋上空逆时针涡旋水汽输送异常,西北太平洋和中国东部上空自南向北的水汽输送减弱,从而引起东亚季风向北推进受阻,导致长江流域梅雨峰值日期延迟;同时,热带中东太平洋的暖海温异常可引起上空对流活动增强,引起包括沃克环流和东亚夏季风系统在内的热带-副热带大尺度纬圈环流发生变异,具体表现为沃克环流减弱,热带海洋性大陆南部上空对流活动减弱,热带海洋性大陆北部、中国南方地区以及长江流域上空对流活动增强,导致长江流域出现水汽辐合异常,梅雨强度增大^[25]。20世纪80年代之前和90年代之后PDO处于负位相的时段则情况相反。

2.4 印度洋海盆模态的年代际变异对东亚水汽输送的影响

印度洋海盆模态(IOBM)是印度洋海温年际变化的主模态,以热带印度洋海温一致呈现海盆尺度的偏暖或偏冷为主要特征,其空间型在20世纪70年代末之后发生了年代际变化,对中国地区夏季的水汽输送产生了重要影响^[26]。



差异为后一阶段减前一阶段，降水量差异场中打点区域和水汽输送通量差异场中灰色阴影区域表示该区域的差异通过了 90% 显著性水平的 *t* 检验

图 3 不同时段夏季平均月降水量 (mm) 和水汽输送通量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 差异

Fig. 3 Differences in June—August mean monthly precipitation and water vapor flux between different periods

1951—1979 年期间，IOBM 的年际变化活动中心主要位于南印度洋。在 IOBM 正位相的夏季，热带印度洋的异常暖中心位于 5°S — 20°S 之间的热带南印度洋，北印度洋暖海温异常较小。此种情况下，印度洋海温异常引起的大气环流异常对亚洲夏季气候影响较小，对中国地区夏季的水汽输送和降水的年际变化影响相对较弱。在 1980 年以后，热带北印度洋夏季海温的年际变率显著增大，IOBM 的年际变化活动中心向阿拉伯海偏移。在 IOBM 正位相的夏季，热带印度洋的异常暖中心位于阿拉伯海和西南印度洋。此种情况下，印度洋海温异常可通过“开尔文波-埃克曼辐散效应”在热带东印度洋和西太平洋引起显著的东风异常，并在孟加拉湾、中国南海、西北太平洋上空引起显著的反气旋水汽输送异常，对中国地区的水汽输送和降水的年际变化

产生重要影响: 在江淮流域引起水汽辐合异常和降水增多, 在长江以南地区引起水汽辐散异常和降水减少。

但是, IOBM 空间型发生年代际变化的原因目前尚未清晰。初步分析表明, 其年代际变化可能与冬季 ENSO 对次年夏季印度洋海温影响作用的年代际变异有关。

3 中国冬季水汽输送的年际和年代际变化

3.1 冬季水汽输送对强降雪的重要性

东亚冬季水汽输送对于中国地区的大范围强降雪事件有重要意义, 主要体现在以下几个方面。① 水汽输送异常是强降雪事件的重要预报因子。强降雪事件发生过程中水汽输送的时空演变是领先于降雪的, 强降雪发生前 24 h 内由大尺度水汽输送引起的水汽积累对强降雪的发生和维持具有重要作用^[27]。② 来自南方地区和热带海洋的水汽输送异常是中国东部地区大范围强降雪事件的关键因素。例如, 在 2008 年 1 月中国南方的大范围雨雪冰冻灾害和 2018 年 1 月长江流域的 2 次强降雪过程中, 来自孟加拉湾和中国南海的异常暖湿气流持续向中国南方地区和长江流域输送充沛的水汽, 为大范围强降雪事件的发生提供了重要条件^[28]。③ 水汽输送对中国强降雪事件的影响作用具有地域差异性, 对于理解中国不同地区的强降雪事件发生机理至关重要。来自南方的水汽输送和来自北方的冷平流的相互作用是强降雪发生的重要原因, 其中水汽输送是中国北方强降雪最为关键的影响因素, 而冷平流则是长江流域强降雪最为关键的影响因素^[29]。

3.2 东亚冬季经向水汽输送年际变化与热带太平洋海温的关系

东亚经向水汽输送对中国冬季降水具有重要影响, 自南向北的经向水汽输送增强(减弱)通常会导致中国东部冬季降水增多(减少)。ENSO 是影响东亚冬季水汽输送年际变化的重要因素, 前人研究表明 ENSO 主要通过“太平洋-东亚(PEA)”遥相关机制影响东亚冬季气候: 在冬季厄尔尼诺海温条件下, 热带中东太平洋海温偏暖可引起西北太平洋东北信风增强、表面蒸发增强, 从而引起西北太平洋海温偏冷, 在西北太平洋上空引起下沉运动异常和反气旋异常; 沿反气旋异常西侧的南风异常引起东亚冬季风减弱, 导致东亚上空自南向北的经向水汽输送增强^[30](图 4(a))。

然而, 近期的一些年份(2008 年、2018 年等)出现了与上述理论相反的情况: 在冬季拉尼娜海温条件下, 热带中东太平洋海温偏冷引起了东亚上空自南向北的经向水汽输送增强, 导致东亚强降雪事件增多。这些现象与不同时期热带太平洋海温对东亚水汽输送年际变化的不同影响有关^[31]。需要注意的是, 东亚经向水汽输送与热带太平洋海温的关系在冬季不同月份(12 月、1 月、2 月)之间也是存在差异的。2008 年和 2018 年拉尼娜海温条件下出现的东亚经向水汽输送增强主要发生在 1 月份。

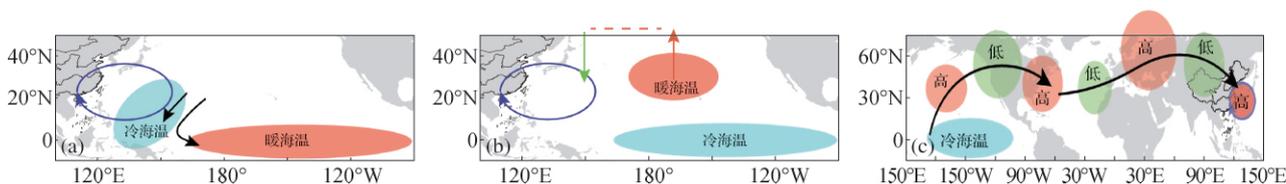


图 4 冬季热带太平洋海温影响东亚上空经向水汽输送的 3 条路径示意

Fig. 4 Schematic diagrams for three different mechanisms of tropical Pacific sea surface temperatures influencing the East Asian water vapor transport during winter

近期 Sun 等^[31]研究发现, 1 月份热带太平洋海温与东亚经向水汽输送年际变化的相关关系及相应的物理机制在 20 世纪 70 年代末发生了年代际变化。在 1961—1979 年期间的 1 月份, 东亚经向水汽输送的年际变化主要受 PEA 遥相关机制影响(图 4(a)), 东亚经向水汽输送与热带太平洋海温指数 Niño 3.4 指数呈显著的正相关关系。在 1980 年之后的 1 月份, 主导东亚经向水汽输送年际变化的物理机制发生了显著变化, 东亚经向水汽输送与 Niño 4 指数在 20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代呈显著的负相关关系, 表明 1980 年之后热

带中东太平洋海温偏冷(拉尼娜条件)易引起东亚自南向北的经向水汽输送增强。背后的原因主要是热带太平洋海温影响东亚水汽输送年际变化的路径并不唯一,且不同路径对应的物理机制引起的气候异常也不同。

在 1986—2018 年期间的 1 月份,热带中东太平洋海温通过 PEA 遥相关机制影响东亚水汽输送的作用减弱,这是东亚经向水汽输送与热带太平洋海温关系发生变化的一个原因。热带太平洋海温影响东亚水汽输送的第 2 条路径是 1 月份拉尼娜海温条件下,同期发生的北太平洋中部暖海温异常可引起北太平洋中部上空对流活动增强,从而在西北太平洋引起补偿性的下沉运动异常和反气旋异常,导致东亚自南向北的经向水汽输送增强(图 4(b))。此外,热带太平洋海温还可以通过第 3 条路径影响东亚水汽输送:1 月份拉尼娜海温条件下,热带太平洋海温异常引起的对流活动异常可以激发出向北传播的罗斯贝波,从而影响环北半球遥相关波列,该波列可经过北美、北大西洋和亚欧大陆在西伯利亚上空引起低压异常和气旋异常,并在下游的东亚和西北太平洋引起高压异常和反气旋异常,导致东亚上空经向水汽输送增强(图 4(c))。上述第 2 条和第 3 条路径的影响作用在 1980 年后显著增强,导致在 1980 年后热带中东太平洋海温偏冷易引起 1 月份东亚经向水汽输送增强^[31]。

3.3 中国冬季降水年代际变化的水汽输送机制

中国冬季气候在 20 世纪 80 年代中期经历过一次显著的年代际变化,主要表现为 80 年代中期以后东亚冬季风减弱,中国东部降水增多^[32-33]。相应的水汽输送年代际变化特征主要表现为在 80 年代中期以后,中国东部地区上空有显著的来自东南方向的水汽输送异常,表明有更多的来自副热带西太平洋的水汽输送进入中国东部地区,引起中国东部水汽辐合异常,导致中国南方地区、长江流域、黄淮流域降水普遍增多^[34]。此次年代际变化背后的物理机制目前存在较大争论,可能与气候系统的内部变率和温室气体的强迫作用有关^[35]。在内部变率方面,北极涛动、PDO、大西洋多年代际振荡在年代际尺度上的位相转变可能是引起此次年代际变化的原因之一^[32, 35-36];在温室气体的强迫作用方面,数值试验结果表明,温室气体增多可引起冬季东亚大槽减弱和西伯利亚高压减弱,导致中国地区冬季西北风减弱,从而引起中国东部上空来自东南方向的水汽输送异常^[37-38]。

此外,华南地区和长江流域冬季降水在 1979 年以后分别增多和减少,在 2000 年以后分别减少和增多,也与中国上空水汽输送的两次年代际变化有关^[34]。1960—1978 年与 1979—1986 年 2 个时段的水汽输送差异场表明,在后一时段的冬季,蒙古上空存在反气旋异常,中国东部地区存在自北向南的水汽输送异常,且中国南方地区上空存在气旋异常,这样的水汽输送异常型引起华南地区水汽辐合、长江流域水汽辐散,导致华南地区降水增多、长江流域降水减少。1990—2000 年与 2001—2012 年 2 个时段的水汽输送差异场表明,在后一时段的冬季,中国东部上空存在自东向西的水汽输送异常,长江流域和华南地区上空存在较小的水汽辐合异常。华南降水在后一阶段冬季降水减少的原因尚未清晰,可能的原因之一是缺少来自北方的冷平流与华南上空的暖湿空气相互作用。

4 青藏高原地区的水汽输送机制

青藏高原地区的水汽输送机制与中国东部地区相比具有明显差异。位于青藏高原腹地的三江源地区是长江、黄河、澜沧江的源头汇水区,对于中国地区的气候系统和生态环境有重要意义。

三江源地区春季降水的年际变化主要受 2 支水汽输送异常影响^[39]。一支是从三江源东边界进入该地区的来自中国东部的水汽输送异常,该支水汽输送异常主要受春季亚欧大陆上空大气环流的主模态影响,当主模态处于正位相的年份,西伯利亚上空存在高压异常和反气旋异常,反气旋异常南侧的东风异常可引导来自中国东部的水汽进入三江源地区,导致三江源地区出现水汽辐合异常、降水增多。另一支是从三江源南边界进入该地区的来自中国西南地区、印度、孟加拉国的水汽输送异常,该支水汽输送异常主要受西太平洋、中国南海、孟加拉湾上空的气旋异常影响,与 ENSO 有关。在拉尼娜海温条件的春季,热带西太平洋上空对流

活动增强,在热带太平洋和印度洋上空的大气环流引起 Matsuno-Gill 空间异常型,从而在中国南海和孟加拉湾上空引起气旋异常,该气旋异常北侧的东南风异常可以引导来自低纬地区的水汽从南边界进入三江源地区,导致三江源地区出现水汽辐合异常、降水增多。

三江源地区夏季降水的年际变化主要受来自西南方向的水汽输送异常影响,该支水汽输送异常与 NAO、ENSO、热带印度洋海温有关^[39]。在 NAO 处于负位相的夏季,NAO 可在亚欧大陆引起西北-东南方向传播的大气环流波列,在西亚和青藏高原上空引起低压异常和气旋异常,气旋异常南侧的西南风异常可引导来自印度上空的水汽进入三江源地区,导致三江源地区降水增多。此外,在厄尔尼诺事件正在衰退的次年夏季,热带印度洋海温偏暖,通过“开尔文波-埃克曼辐散”效应在孟加拉湾引起反气旋异常,该反气旋异常北侧的西南风异常也可引导来自印度的水汽进入三江源地区,导致三江源地区降水增多。研究表明,NAO、ENSO、印度洋海温、东亚夏季风等全球气候系统重要组成部分对夏季青藏高原上空水汽输送年际变化的影响在 20 世纪 70 年代末之前相对较小,而在 20 世纪 70 年代末之后显著增强,这与全球变暖背景下大气水汽含量增加引起的大气对流凝结潜热释放作用增强有关^[40],同时也和前述 IOBM 空间型的年代际变化有关。

三江源地区冬季降水年际变化的水汽输送机制比较复杂,冬季不同月份的降水和水汽输送受不同的因素影响。总体来看,三江源冬季降水的年际变化主要受来自亚欧大陆中纬度西风带的水汽输送和来自印度的西南方向水汽输送影响,驱动因素包括 NAO、ENSO、环北半球遥相关型等。

5 总结与展望

中国上空的水汽输送具有显著的年际和年代际变化特征,其背后的物理机制十分复杂,受 ENSO、热带海气相互作用、NAO、北极海冰等诸多因素影响,且这些因素与中国上空水汽输送的相互作用关系是随着时间发生变化的,这与气候系统内部的自然变率和温室气体的外部强迫作用等有关。本文主要针对中国地区水汽输送的年际和年代际变化研究进展进行了回顾,一些未在本文中深入探讨的关于水汽输送的问题也十分重要。

(1) 理解中国地区水汽输送的季节—年际—年代际变化多尺度相互作用机制对于深入理解中国气候在不同时间尺度上的变率具有重要意义。

(2) PDO 等年代际尺度的信号对于中国地区水汽输送的季节内变化有显著影响、MJO(热带季节内振荡)等季节内振荡信号对中国地区水汽输送的年际变化也会产生影响,但关于上述问题仍需要更多更加深入的研究。

(3) 全球变暖背景下大气环流和大气水汽含量都发生了剧烈变化。未来全球持续变暖情景下,中国上空的水汽输送将如何变化、其年际和年代际变化的物理机制将如何变化都是值得关注的问题,需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] BENGTSSON L. The global atmospheric water cycle [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(2): 025202.
- [2] WANG H J, YU E T, YANG S. An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: large-scale circulation anomalies and hind-cast of the NCAR WRF model [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2011, 113(1/2): 11–25.
- [3] SUN B, WANG H J. Water vapor transport paths and accumulation during widespread snowfall events in Northeastern China [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26: 4550–4566.
- [4] 赵阳,徐祥德,赵天良,等. 中国东部夏季暴雨极端事件与水汽输送相关流型特征 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46: 1123–1140. (ZHAO Y, XU X D, ZHAO T L, et al. Extreme precipitation events in East China and associated moisture transport pathways [J]. *SCIENTIA SINICA Terrae*, 2016, 46: 1123–1140. (in Chinese))
- [5] SUN B, WANG H J, ZHOU B T. Climatic condition and synoptic regimes of two intense snowfall events in Eastern China and implications for climate variability [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2019, 124: 926–941.
- [6] 黄玉霞,王宝鉴,黄武斌,等. 我国西北暴雨的研究进展 [J]. *暴雨灾害*, 2019, 38(5): 515–525. (HUANG Y X, WANG

- B J , HUANG W B , et al. A review on rainstorm research in Northwest China [J]. *Torrential Rain and Disasters* , 2019 , 38(5) : 515–525. (in Chinese)
- [7] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识 [J]. *科学通报* , 2016 , 61(10) : 1029–1041. (DING Y H , WANG H J. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China [J]. *Chinese Science Bulletin* , 2016 , 61(10) : 1029–1041. (in Chinese)
- [8] SUN B , WANG H J. Analysis of the major atmospheric moisture sources affecting three sub–regions of East China [J]. *International Journal of Climatology* , 2015 , 35(9) : 2243–2257.
- [9] SUN B , WANG H J. Moisture sources of semiarid grassland in China using the Lagrangian Particle Model FLEXPART [J]. *Journal of Climate* , 2014 , 27(6) : 2457–2474.
- [10] PAUSATA F S R , BATTISTI D S , NISANCIOGLU K H , et al. Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ controlled by changes in the Indian monsoon during a simulated Heinrich event [J]. *Nature Geoscience* , 2011 , 4: 474–480.
- [11] WANG H J , CHEN H P. Climate control for southeastern China moisture and precipitation: indian or East Asian monsoon? [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 2012 , 117: D12109.
- [12] SUN B , WANG H J. Inter–decadal transition of the leading mode of inter–annual variability of summer rainfall in East China and its associated atmospheric water vapor transport [J]. *Climate Dynamics* , 44(9/10) : 2703–2722.
- [13] ZHOU T J , YU R C. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 2005 , 110: D08104.
- [14] NITTA T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation [J]. *Meteorological Society of Japan* , 1987 , 65: 373–390.
- [15] HUANG R H. The East Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica* , 1992 , 6(1) : 25–37.
- [16] YANG J , LIU Q , XIE S P , et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophysical Research Letters* , 2007 , 34(2) : L02708.
- [17] WU B , ZHOU T J , LI T M. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate [J]. *Journal of Climate* , 2009 , 22(11) : 2992–3005.
- [18] XIE S P , HU K , HAFENER J , et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo–Western Pacific climate during the summer following El Nino [J]. *Journal of Climate* , 2009 , 22(3) : 730–747.
- [19] XIE S P , KOSAKA Y , DU Y , et al. Indo–Western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post–ENSO summer: a review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences* , 2016 , 33(4) : 411–432.
- [20] LI T M , WU B , ZHOU T J , et al. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El Niño: a review [J]. *Journal of Meteorological Research* , 2017 , 31(6) : 987–1006.
- [21] LI H X , CHEN H P , WANG H J. Changes in clustered extreme precipitation events in South China and associated atmospheric circulations [J]. *International Journal of Climatology* , 2016 , 36(9) : 3226–3236.
- [22] SUN B , ZHU Y L , WANG H J. The recent interdecadal and interannual variation of water vapor transport over Eastern China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences* , 2011 , 28(5) : 1039–1048.
- [23] ZHU Y L , WANG H J , ZHOU W , et al. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dynamics* , 2011 , 36(7/8) : 1463–1473.
- [24] ZHU Y L , WANG H J , MA H , et al. Contribution of the phase transition of Pacific Decadal Oscillation to the late 1990s’ shift in East China summer rainfall [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 2015 , 120(17) : 8817–8827.
- [25] SUN B , WANG H J , ZHOU B T , et al. Interdecadal variation in the synoptic features of Mei–Yu in the Yangtze River valley region and relationship with the Pacific Decadal Oscillation [J]. *Journal of Climate* , 2019 , 32: 6252–6270.
- [26] SUN B , LI H X , ZHOU B T. Interdecadal variation of Indian Ocean basin mode and the impact on Asian summer climate [J]. *Geophysical Research Letters* , 2019 , 46(21) . [doi: 10.1029/2019GL085019]
- [27] SUN B , WANG H J. Water vapor transport paths and accumulation during widespread snowfall events in Northeastern China [J]. *Journal of Climate* , 2013 , 26: 4550–4566.
- [28] SUN B , WANG H J , ZHOU B T. Climatic condition and synoptic regimes of two intense snowfall events in Eastern China and implications for climate variability [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere* , 2019 , 124: 926–941.
- [29] XIE Z X , SUN B. Different roles of water vapor transport and cold advection in the intensive snowfall events over North China and

- the Yangtze River valley [J]. *Atmosphere*, 2019, 10: 368.
- [30] WANG B, WU R G, FU X H. Pacific-east Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [31] SUN B, WANG H J, ZHOU B T. Interdecadal variation of the relationship between East Asian water vapor transport and tropical Pacific Sea surface temperatures during January and associated mechanisms [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32: 7575-7594.
- [32] 贺圣平, 王会军. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征 [J]. *大气科学*, 2012, 36(3): 523-538. (HE S P, WANG H J. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(3): 523-538. (in Chinese))
- [33] 王会军, 范可. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 313-318. (WANG H J, FAN K. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 313-318. (in Chinese))
- [34] 孙博. 我国不同区域的水汽源地及有关气候动力学研究分析 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. (SUN B. Moisture sources of precipitation in different regions of China and related climate dynamics [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese))
- [35] DING Y H, LIU Y J, LIANG S J, et al. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28: 693-713.
- [36] WANG Y M, LI S L, LUO D H. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic multidecadal oscillation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114: D02112.
- [37] 施晓晖, 徐祥德. 东亚冬季风年代际变化可能成因的模拟研究 [J]. *应用气象学报*, 2007, 18(6): 776-782. (SHI X H, XU X D. Interdecadal change of East Asian winter monsoon and a numerical experiment on its possible cause [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(6): 776-782. (in Chinese))
- [38] MIAO J P, WANG T, WANG H J, et al. Interdecadal weakening of the East Asian winter monsoon in the mid-1980s: the roles of external forcings [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(21): 8985-9000.
- [39] SUN B, WANG H J. Interannual variation of the spring and summer precipitation over the Three-River-Source region in China and the associated regimes [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(18): 7441-7457.
- [40] SUN B, WANG H J. Enhanced connections between summer precipitation over the Three-River-Source region of China and the global climate system [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52: 3471-3488.

A review on the interannual and interdecadal variations of water vapor transport over China during past decades*

SUN Bo, WANG Huijun, ZHOU Botao, LI Huixin, ZHU Baoyan

(Key Laboratory of Meteorological Disasters, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The water vapor transport in the atmosphere is important for the global water cycle, climate system, and ecological environment. The water vapor transport over China is a critical influential factor for the spatial pattern of drought and flood in China. The interannual and interdecadal variability of the water vapor transport over China is affected by the El Niño-Southern Oscillation, sea surface temperature, North Atlantic Oscillation, and Pacific Decadal Oscillation. This paper reviewed recent studies regarding the interannual and interdecadal variability of water vapor transport over China, including the water vapor transport associated with the interannual and interdecadal variability of precipitation in eastern China, the water vapor transport associated with the interdecadal variation of Mei-Yu features, the influences of tropical sea surface temperatures on the water vapor transport over China, and so on. Moreover, the recent advances in water vapor transport over the Tibetan Plateau are also reviewed.

Key words: water vapor transport; interannual/interdecadal variation; precipitation; sea surface temperature

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41991283; No.41805047).