

赵威,张恒德,胡艺.东亚季风过渡带降水变化特征及物理机制研究进展[J].海洋气象学报,2022,42(4):1-10.  
ZHAO Wei, ZHANG Hengde, HU Yi. Review of precipitation variations over the monsoon transitional zone in East Asia: characteristics and physical mechanisms [J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(4): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.04.001. (in Chinese)

## 东亚季风过渡带降水变化特征及物理机制研究进展

赵威,张恒德,胡艺  
(国家气象中心,北京 100081)

**摘要:** 东亚季风过渡带地处东亚夏季风北边缘附近,是典型的生态脆弱区与气候敏感带。东亚季风过渡带降水变化同时与东亚夏季风和中高纬西风带环流系统的变化密切相关,变异机理与典型季风区和干旱区降水有较大差别。目前专门针对东亚季风过渡带降水变异机理的研究还比较少。此文从东亚季风过渡带夏季降水的年际、年代际变化特征和物理机制出发,分别回顾热带关键区的海温异常和中高纬环流系统等对东亚季风过渡带夏季降水年际变化的影响,以及太平洋年代际振荡、大西洋年代际振荡与气候系统外强迫对东亚季风过渡带降水年代际变化的贡献。最后,在进展回顾的基础上,展望定量区分外强迫和内部变率对东亚季风过渡带降水年代际变化的相对贡献等未来需进一步开展的研究方向。

**关键词:** 东亚夏季风;季风北边缘;降水变化;研究进展

中图分类号: P461;P426.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2022)04-0001-10  
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.04.001

## Review of precipitation variations over the monsoon transitional zone in East Asia: characteristics and physical mechanisms

ZHAO Wei, ZHANG Hengde, HU Yi  
(National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract** The monsoon transitional zone (MTZ) in East Asia, located near the north fringe of East Asian summer monsoon (EASM), is characterized by fragile ecosystem and climate sensitivity. The precipitation over the MTZ is not only significantly linked to variations of EASM, but also closely associated with the mid- and high-latitude westerlies. The precipitation variations over the MTZ in East Asia differ from those in classical monsoon region and arid region and are currently not fully investigated. Focused on the characteristics and physical mechanisms, this paper reviews the factors for the interannual variations of summer precipitation over the MTZ in East Asia such as sea surface temperature anomaly in tropical key areas and extratropical atmospheric teleconnections, etc., and the potential impact of Pacific decadal oscillation (PDO), Atlantic multidecadal oscillation (AMO), and external forcings on interdecadal variations of precipitation over the MTZ. Based on the progress of the previous studies, we put forward several related issues that need to be further investigated in future, for instance, quantitatively distinguishing the relative contributions of external forcings and internal variabilities to the interdecadal variations of precipitation over the MTZ.

**Key words** East Asian summer monsoon (EASM); north fringe of monsoon; precipitation variation; research progress

收稿日期:2022-06-15; 修订日期:2022-07-20

基金项目:国家气象中心青年基金项目(Q202202)

第一作者:赵威,女,博士,工程师,主要从事天气预报研究,zhaowei\_nmc@cma.gov.cn。

通信作者:张恒德,男,博士,正研级高级工程师,主要从事天气预报技术研究,zhanghengde@cma.gov.cn。

## 引言

东亚夏季风 (East Asian summer monsoon, EASM) 爆发后, 阶段性地向北推进和向东扩展是其活动的一个显著特征。早在 1987 年, TAO and CHEN<sup>[1]</sup> 就指出了东亚季风及雨带向北推进的几个阶段: 4—6 月, 伴随着南海夏季风的爆发, 华南前汛期开始; 6—7 月, 东亚夏季风逐渐向北推进, 雨带维持在长江流域; 7—8 月, 东亚夏季风到达黄河以北, 进入华北雨季; 自 9 月初东亚夏季风开始迅速向南撤退; 10 月中旬完全撤出中国大陆。

在整个东亚夏季风北推过程中, 东亚夏季风所能到达的最北的边界被称为东亚季风北界<sup>[2-3]</sup>, 它将整个东亚地区划分为季风影响区和非季风影响区<sup>[4-5]</sup>。在季风影响区和非季风影响区之间, 还存在一个狭长的过渡地带, 即“东亚季风过渡带 (moon transitional zone, MTZ)”<sup>[6-7]</sup>。东亚季风过渡带呈东北—西南走向, 覆盖范围与我国半干旱气候区和农牧交错带高度重合, 横跨内蒙古、河北、山西、陕西、甘肃等若干省份<sup>[6-7]</sup>。作为典型的农牧交错地区, 东亚季风过渡带气候类型复杂、生态系统脆弱, 对气候变化非常敏感<sup>[8-9]</sup>。

胡豪然和钱维宏<sup>[2]</sup> 曾指出, 副热带夏季风北边界位置的年际和年代际变化, 就形成了东亚季风北边缘活动带 (图 1)。地处东亚季风北界附近, 东亚季风过渡带以南地区主要受到东亚季风的影响, 以北地区主要受到中纬度西风的控制。区别于典型的沙漠干旱区与季风湿润区, 东亚季风过渡带降水受到副热带夏季风和中高纬度西风带环流系统的共同作用<sup>[11-13]</sup>。因此, 东亚季风过渡带的水汽源地除我国中东部以及西太平洋等南部海域外, 也包括欧亚大陆等中纬度地区, 此外局地蒸发也是东亚季风过渡带重要的水汽源地。

值得注意的是, 东亚季风过渡带的降水异常和干湿变化与东亚夏季风强度变化之间并不一定有很好的对应关系<sup>[14-15]</sup>, 比如在某些东亚夏季风偏强的年份, 华北地区的降水量并不一定偏多。许多经典的东亚夏季风强度指数在描述东亚季风过渡带降水异常方面存在很大的局限性。已有研究表明, 东亚季风过渡带降水与东亚夏季风北界位置的南北或东西摆动之间有着很好的关联<sup>[16-18]</sup>。无论在年际还是年代际尺度上, 均表现出东亚夏季风北界位置的纬度越低, 出现时间越早, 或持续时间越短, 对应东亚季风过渡带就越是干燥<sup>[16]</sup>。

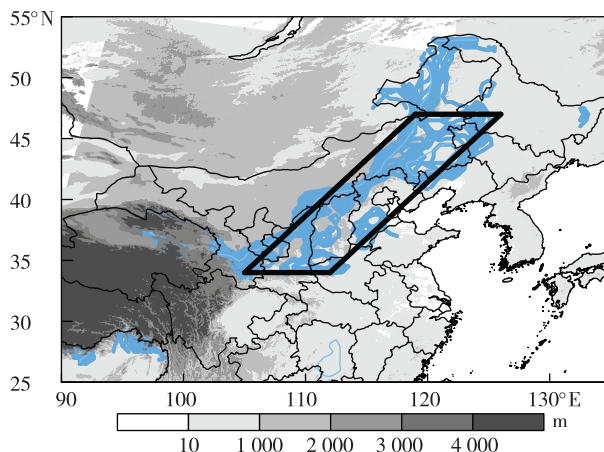


图 1 东亚季风北边缘活动带地理位置示意 (黑色方框; 蓝色实线表示 7 a 滑动平均后 1979—2013 年的东亚夏季风的北边界, 东亚夏季风的北边界是根据 LIU et al.<sup>[10]</sup> 中的定义, 即北半球夏季 (5—9 月) 和北半球冬季 (11 月—次年 3 月) 日降水量差值为  $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  的地理位置; 灰色阴影表示海拔高度)

Fig. 1 Definition of the MTZ region (represented by the black box) in East Asia (blue lines represent the north fringe of East Asian summer monsoon with a 7-year running window from 1979 to 2013; the north fringe is the place where the daily precipitation difference is  $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  between boreal summer (MJJAS) and winter (NDJFM)<sup>[10]</sup>; areas marked with grey shadings indicate the altitude)

与东亚夏季风的北界变化相对应, 东亚季风过渡带降水也呈现出显著的年际与年代际变化。近年来, 相关研究指出东亚季风过渡带夏季降水异常受到气候系统内部变率的调制, 包括丝绸之路遥相关、北大西洋涛动等大气环流遥相关型, 以及 ENSO 等热带海气耦合模态等等<sup>[19-21]</sup>。观测显示, 20 世纪下半叶以来, 东亚季风区降水存在明显增多的迹象, 而对于东亚季风过渡带而言, 总降雨量和降雨天数正逐渐减少, 干旱事件逐渐增多, 干旱程度愈发严重<sup>[22-27]</sup>。在全球变暖背景下, 东亚季风过渡带降水的年代际减少是否受到气候系统外强迫 (如温室气体、人为气溶胶等) 的影响, 也成为近年来科学界高度关注的热点问题<sup>[28-32]</sup>。

目前, 围绕东亚夏季风进退及其影响下的东亚季风过渡带降水异常方面的研究还比较少。文中从东亚季风过渡带夏季降水年际、年代际变化的变化特征和驱动因子以及物理机制等几个方面, 系统回顾东亚夏季风过渡带夏季降水异常方面的最新研究进展, 并在最后提出该领域仍需进一步研究的科学问题。对于该领域的持续研究, 不仅有助于深

入理解东亚气候过渡带的干旱化成因,为改进和提高东亚气候过渡带降水的未来预估水平提供科学基础,还可以为气候风险评估、适应管理和政府决策提供科学依据。

## 1 东亚季风过渡带定义

目前,由于研究领域、研究目的以及研究角度的不同,学者们对东亚季风北边缘活动带的地理界定尚未达成统一。比如,一些学者从降水角度进行了定义:史正涛<sup>[33]</sup>采用年降水量为200~450 mm的区域大致作为我国季风北边缘活动带的范围;QIAN et al.<sup>[4]</sup>将降雨量 $4\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 等时线的气候平均位置定义为东亚季风的最北边界。一些学者从地理生态角度进行了定义:王铮等<sup>[34]</sup>指出,胡焕庸早年提出的“人口地理分界线”,即腾冲—黑河的沿线地带就是一条生态环境过渡带。另一些学者从干旱角度进行了定义:WANG et al.<sup>[35]</sup>采用联合国环境规划署的干旱指数(年总降水量/年总蒸发量),将局地干旱指数大于0.2且小于0.65的地区(即半干旱区与半湿润区),定义为“东亚气候过渡区”。

值得注意的是,尽管以往研究对于东亚季风北边缘活动带的定义各不相同,但这些定义所确定的东亚季风北边缘活动带的核心区域却是大体相同的。近年来,“全球季风区”的概念开始被广泛应用于对全球季风和季风降水的研究当中<sup>[36-37]</sup>。比如,LIU et al.<sup>[10]</sup>将全球季风区定义为:局地降水的年变化(即北半球夏季(5—9月)平均降水与冬季(12月—次年3月)平均降水之差)超过 $2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,且局地夏季降水占年总降水量的比例超过55%的地方。QIAN and JIANG<sup>[36]</sup>基于候平均降水率,将局地最大降水率与最小降水率之差有两候超过 $4\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的地区定义为全球季风主导的区域。这些划分季风区与非季风区的方式也为确定东亚区域的季风北边缘活动带提供了参考依据。

## 2 东亚季风过渡带降水的空间分布特征

东亚季风过渡带降水最多的两个月份为7月和8月,占全年总降水量的50%。图2为1979—2019年东亚季风过渡带夏季(7—8月)降水的经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析结果。可以看到,EOF前3个主模态分别为全区一致变化型、东北—西南反向变化型以及经向三极子型,方差贡献率总计68.2%,其中全区一致变化型的方差贡献最大,达到36.1%。EOF前3个主模态对应的

时间序列呈现出显著的年际与年代际变化特征,没有明显的趋势变化。前人研究表明:EOF第一模态的年际变化主要受东亚夏季风环流的控制,位于东北太平洋上的正位势高度异常西侧的西南气流为东亚季风过渡带提供了充足的水汽供应;而第二模态的年际变化更多受中纬度系统的影响,东北地区上空的气旋性环流异常西侧的偏北风阻碍了东亚季风过渡带西部的水汽输送,从而有利于在东亚季风过渡带东部激发上升运动和对流活动<sup>[38-39]</sup>。

## 3 东亚季风过渡带降水的年际变化及影响因素

如前文所述,东亚季风过渡带是东亚夏季风和中纬度西风相互作用的地带,其内部降水变化既受到来自低纬度地区海气相互作用的影响,又受到中高纬度大气环流的作用。接下来将重点回顾热带关键区海温异常对东亚季风过渡带降水年际变化的调制作用,同时也对中高纬气候系统影响的进展加以总结。

### 3.1 热带影响

#### 3.1.1 ENSO的作用

ENSO作为热带地区年际尺度上海气相互作用最显著的模态,是影响东亚夏季风年际变率及降水异常的重要因子<sup>[40-44]</sup>。前人已有大量研究表明,与ENSO有关的热带中东太平洋暖海温异常,能够通过风-海温-蒸发反馈机制,在西北太平洋上空激发反气旋环流异常,并在“印度洋电容器”机制的作用下持续到次年夏季,通过调节西北太平洋副热带高压的强度、位置和形态,进一步引起东亚夏季风的年际变化及与之有关的降水异常。

ZHAO et al.<sup>[45-47]</sup>专门针对东亚季风过渡带晚夏降水的年际变化进行了统计分析和数值模拟研究,结果表明:热带中东太平洋La Niña型的冷海温异常能够通过Gill型罗斯贝(Rossby)波响应在西北太平洋地区激发反气旋环流异常,而这种西北太平洋反气旋环流有利于东亚季风过渡带晚夏降水的年际偏多。根据热带太平洋海温异常的空间形态,最近不少研究指出El Niño事件可以分为两种类型:传统的东太平洋型(eastern Pacific, EP)和中太平洋型(central Pacific, CP)<sup>[48-50]</sup>。这两类ENSO事件的形成机制和演变过程均存在显著差异,对东亚夏季风的影响也有明显不同<sup>[51-54]</sup>。那么,两类ENSO事件对东亚季风过渡带夏季降水影响是否会有不同?目前,相关研究还比较少,而这也是一个未来可以继续探索方向之一。

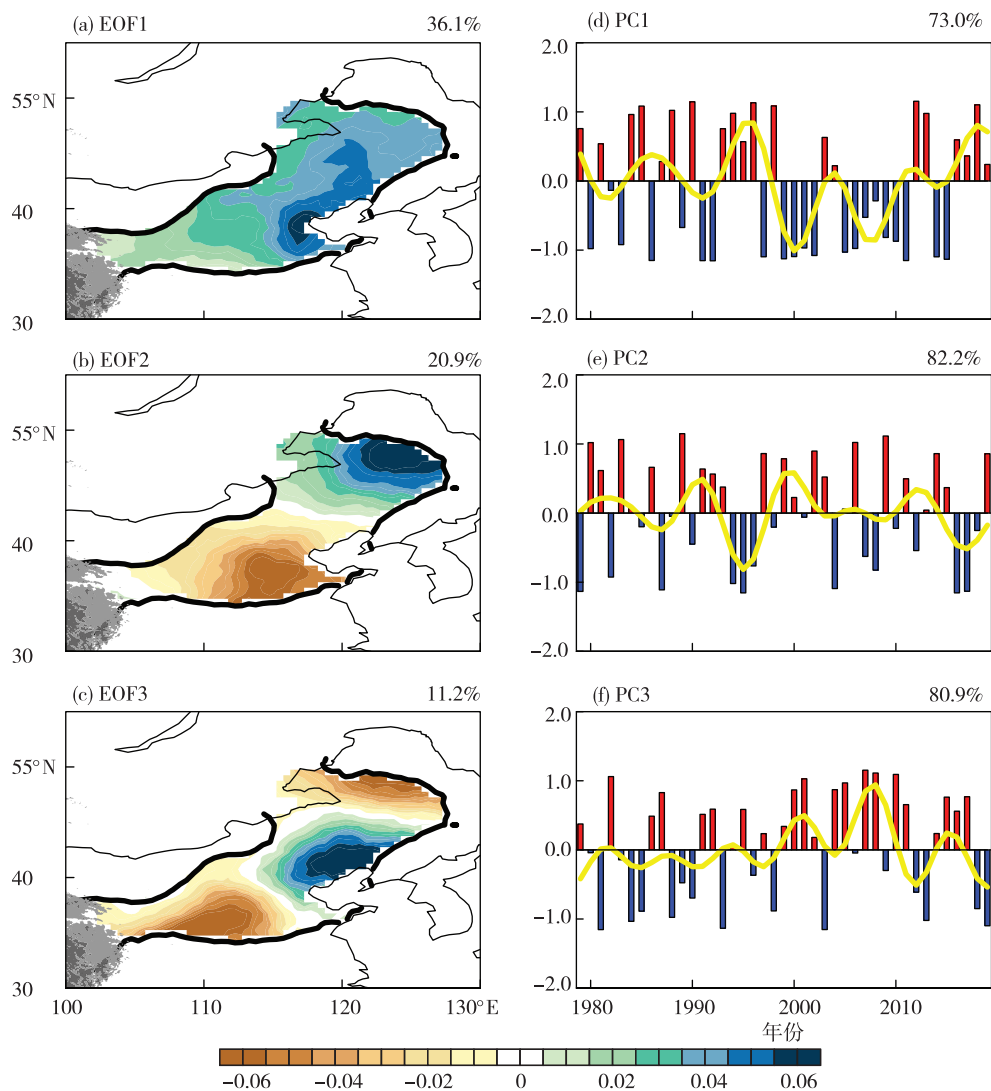


图 2 1979—2019 年东亚气候过渡带 7—8 月降水 EOF 分析结果 (a. EOF 第一模态, b. EOF 第二模态, c. EOF 第三模态, a—c 中右上角数字为该模态的方差贡献率, 色阶表示载荷向量; d, e, f 分别对应 EOF 第一模态、EOF 第二模态、EOF 第三模态的标准化时间系数 PC1、PC2、PC3, d—f 中右上角数字为该时间系数中年际分量的方差贡献率, 黄色实线表示年代际分量)

Fig.2 EOF analysis on precipitation from July to August in transitional climate zone in East Asia for period of 1979–2019 (a, b, and c represent EOF1, EOF2, and EOF3, the contributions of the three leading modes to the total variance are 36.1%, 20.9%, and 11.2%, respectively, and the color scale represents loading vector; d, e, and f represent standardized time coefficients (PC1, PC2, and PC3) of EOF1, EOF2, and EOF3, the interannual variation explains 73.0%, 82.2%, and 80.9% of the total variance of corresponding PCs, respectively, and the yellow solid lines are interdecadal components of PCs)

### 3.1.2 热带北大西洋海温的作用

近年来,一些学者注意到除 ENSO 的贡献外,热带北大西洋的海温异常对东亚季风过渡带夏季降水的年际变化也有重要的调制作用<sup>[55–58]</sup>。前人基于观测和数值模拟研究<sup>[55–58]</sup>指出,热带北大西洋暖海温异常,一方面能够激发沃克(Walker)环流异常,在热带中太平洋产生异常的下沉辐散运动,通过 Gill 型罗斯贝波响应在西北太平洋地区激发出西

北太平洋反气旋,从而通过热带路径影响西北太平洋反气旋的变化进而调制东亚夏季风及东亚季风过渡带晚夏降水;另一方面,热带北大西洋暖海温异常还能够激发一支横跨欧亚的中高纬遥相关波列,在东亚季风过渡带附近形成负位势高度异常,为该地区降水增多提供有利条件。图 3 为热带北大西洋海温异常影响东亚季风过渡带夏季降水年际变化的物理过程示意图。

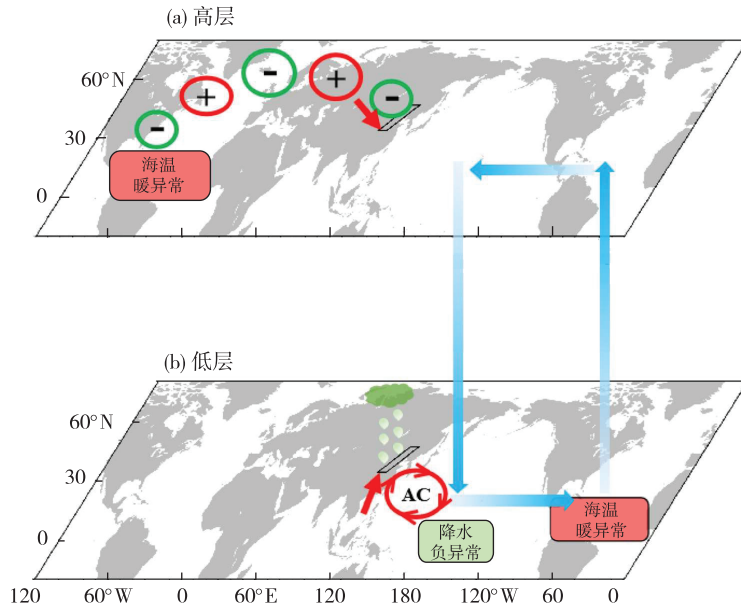


图 3 热带北大西洋海温异常影响东亚季风过渡带 8 月降水异常物理过程示意图 (a. 中高纬路径, 红、绿色圆圈表示 300 hPa 位势高度正、负异常; b. 热带路径, “AC” 代表对流层低层反气旋环流; 蓝色箭头表示热带北大西洋暖海温异常激发的 Walker 环流异常在热带大西洋地区上升, 在热带中太平洋地区下沉; a、b 中的红色箭头表示风, 黑色方框表示东亚季风过渡带的位置)<sup>[46]</sup>

Fig.3 Schematic diagram illustrating impacts of the northern tropical Atlantic (NTA) sea surface temperature (SST) anomalies on the MTZ precipitation anomalies in August (a. mid- and high-latitude pathway, red circles and green circles represent positive and negative anomalies of 300 hPa geopotential height, respectively; b. tropical pathway, “AC” over western North Pacific denotes the anticyclonic circulation in lower troposphere; blue arrows indicate anomalous Walker circulation induced by NTA SST warming with ascending branch in the NTA and descending branch over the central tropical Pacific; in Fig.3a and Fig.3b, red arrows indicate wind anomalies and black boxes denote the MTZ region)<sup>[46]</sup>

### 3.2 中高纬气候系统的影响

热带关键区的海温异常通过激发大气环流异常, 能够影响东亚季风过渡带夏季降水, 沿西风带传播的中高纬遥相关波列的变化对东亚季风过渡带夏季降水的年际变率也有重要调制作用。比如, HUANG et al.<sup>[11]</sup> 研究表明, 中国北方夏季平均降水的年际变化与一种绕球遥相关型 (circum global teleconnection, CGT) 之间有很好的关系, 当 CGT 处于正位相时, 南风异常能够将更多的水汽向中国北方地区输送, 同时高空的辐散增强了华北和东北地区低空的辐合上升运动, 有利于该地区降水的异常偏多。BUHE et al.<sup>[13]</sup> 指出, CGT 模态可以和异常的印度夏季风与北极-欧亚波列一起, 通过水汽输送作用, 构成导致中国北方地区降水一致变化模态的环流型。PIAO et al.<sup>[59]</sup> 研究表明, 前期 5 月北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) 可以通过调制极地-欧亚 (Polar-Eurasian, POL) 型遥相关波列建立与东北亚 7 月降水年际变化之间的显著联系, 并且这种联系在 20 世纪 70 年代之后存在显著的年代际增强。

除此之外, 青藏高原的热力强迫也会影响东亚季风过渡带夏季降水<sup>[59-62]</sup>。例如, SATO and KIMURA<sup>[60]</sup> 研究表明, 夏季青藏高原的热源可以激发遥相关波列, 沿副热带急流传播至东北亚地区, 通过引起异常的垂直运动而影响该地区降水的变化。

## 4 东亚季风过渡带降水的年代际变化及影响因素

伴随着东亚夏季风最北边界的年代际移动, 东亚季风过渡区夏季降水异常呈现出明显的年代际变化特征<sup>[4, 63-66]</sup>。以华北地区为例, QIAN et al.<sup>[4]</sup> 研究表明, 旱季向雨季的转变发生在 1800 年、1875 年和 1940 年左右, 而从雨季向旱季的转变则出现在 1840 年、1910 年和 20 世纪 70 年代后期。20 世纪 70 年代末, 伴随着东亚夏季风突然减弱, 我国东部雨带南移到江淮地区, 呈现“北旱南涝”的分布; 随后雨带继续南移至华南地区, 华北地区降水出现增多, 表现为“+-+”的三极型分布; 90 年代中后期之后东亚夏季风又开始增强, 雨带开始向北移动至长



江以北地区<sup>[63-65]</sup>。

东亚气候过渡带夏季降水的年代际减少,不仅受到气候系统内部变率的调控,还同时受到外强迫的影响。前人研究已初步揭示出太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)和大西洋多年代际振荡(Atlantic multidecadal oscillation, AMO)等气候系统内部变率对东亚半干旱地区干湿变化的调制作用<sup>[66-67]</sup>,以及温室气体、人为气溶胶等气候系统外强迫对东亚地区降水趋势的贡献<sup>[21,28,68-70]</sup>。下面将对 PDO、AMO,以及人类活动影响东亚气候过渡带夏季降水年代际变化的具体物理机制进行回顾。

#### 4.1 PDO 的影响

太平洋年代际振荡(PDO)是北太平洋海面温度年代际振荡的主导模态<sup>[71]</sup>,许多研究都发现 PDO 与东亚夏季风的年代际变化及其影响下的东亚季风过渡带降水密切相关<sup>[19-20,72]</sup>。PDO 的负位相(冷位相)有利于东亚夏季风的增强和东亚季风过渡带降水的增多,而当 PDO 处于暖位相时,日本北部及东西伯利亚气压异常偏低,而华北及其以南的大部分地区气压偏高,华北地区上空由异常西北风所控制,不利于水汽的向北输送,华北地区异常干旱<sup>[73]</sup>。图 4 为 QIAN and ZHOU<sup>[20]</sup>利用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)分析的 20 世纪以来华北地区的帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)与 PDO 位相变化的关系,可以看到华北地区 PDSI 和 PDO 指数呈显著的负相关关系。与 PDO 正位相有关的热带西太平洋和热带印度洋海温的异常增暖,一方面能够激发从热带西太平洋向东亚沿岸延伸的经向波列,即东亚-太平洋(East Asia-Pacific, EAP)/太平洋-日本(Pacific-Japan, PJ)型罗斯贝波列,在华北地区上空形成反气旋环流异常,从而抑制局地降水;另一方面,能够减小海洋性大陆与中高纬度陆地上空的温度差异,使得东亚夏季风减弱,华北地区降水减少<sup>[74]</sup>。

#### 4.2 AMO 的影响

大西洋多年代际振荡(AMO)是发生在北大西洋区域具有海盆尺度的、60~80 a 周期的海面温度异常变化<sup>[75]</sup>,在全球范围内的区域气候演变中发挥着重要作用。许多研究表明,AMO 可以通过激发由北大西洋出发向欧亚中高纬地区传播的准定常罗斯贝波列调制东亚气候过渡带夏季降水的年代际变化<sup>[76-78]</sup>。当 AMO 处于正位相时,北大西洋海温异常增暖激发的丝绸之路型与极地-欧亚型罗斯贝

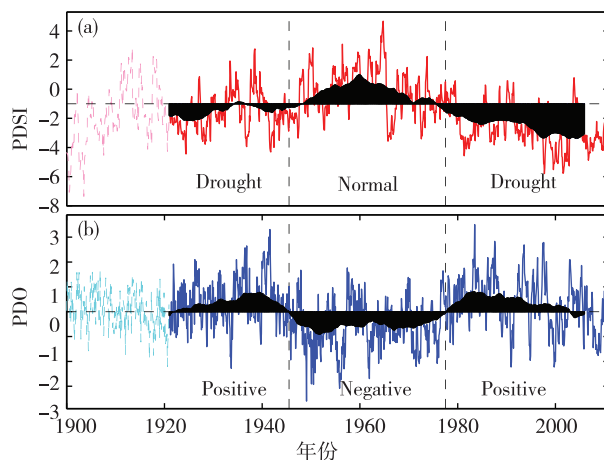


图 4 1900—2010 年月平均华北地区 PDSI (a, 水平虚线“-1”是区分该月份或时期是否处于干旱条件的阈值)和 PDO (b) (开始于 1922 年的带颜色的实线表示低频曲线;阴影表示 132 个月(11 a)滑动平均后的低通分量;垂直虚线表示 1946 年 1 月和 1977 年 1 月)<sup>[20]</sup>

Fig.4 Monthly mean PDSI in North China (a, the horizontal dashed line in Fig. 4a indicates a value of -1, which is a threshold for distinguishing whether a month or a period is in drought conditions) and PDO (b) from 1900 to 2010 (solid colored lines beginning from 1922 represent low-frequency curve; shading area is the low-pass variability after applying a 132-month (11 years) running mean; the vertical dashed lines indicate January 1946 and January 1977)<sup>[20]</sup>

波列,在东北地区上空形成正位势高度异常,使得局地下沉运动增强,不利于局地降水增多<sup>[79]</sup>。PIAO et al.<sup>[78]</sup>研究发现亚洲内陆高原地区的夏季降水在 1999 年前后经历了一次显著减少的突变,一系列大气模式的敏感性试验表明,北大西洋夏季 AMO 型的暖海温异常能够在欧亚地区上空激发一支大气遥相关波列,导致东亚季风边缘地区的降水在 1999 年后明显减少。ZHAO et al.<sup>[77]</sup>研究指出,东亚季风过渡带夏季降水与热带北大西洋海温的年际关系在 20 世纪 90 年代末期发生了明显的年代际变化,90 年代末之前二者关系十分紧密,而 90 年代末之后,二者关系明显减弱,其原因可能是后一个年代类似于 AMO 型的北大西洋海温所激发的遥相关波列的空间结构发生了改变。

#### 4.3 气候系统外强迫的贡献

观测显示,20 世纪下半叶以来观测到的东亚季风过渡带降水呈现出显著减少趋势。除气候系统内部变率的调制外,已有研究也揭示了全球变暖背景下人为强迫(温室气体、人为气溶胶等)的可能贡

献<sup>[4,21,28,62-63]</sup>。其中,人为气溶胶强迫一方面通过直接辐射效应减小东亚地区海陆经向热力差异,削弱东亚夏季风,从而导致北方地区更多干旱少雨事件的发生<sup>[67-69,80]</sup>;另一方面,还可通过间接辐射效应增加云滴数浓度,降低雨滴碰并效率,进而导致局地小雨频率和雨量的显著下降<sup>[81-82]</sup>。温室气体的辐射强迫对东亚夏季风的影响则存在两种竞争机制:一是通过增加海陆的热力差异使得东亚夏季风增强;二是通过增加大气稳定度使得哈得来(Hadley)环流下沉支扩大,Walker环流减弱,从而令季风环流减弱<sup>[83]</sup>。通过改变东亚夏季风的强度和南北位移,温室气体的辐射强迫也能影响我国北方地区的旱涝格局<sup>[21,28]</sup>。基于CMIP5历史实验和单因子强迫试验的输出结果,ZHAO et al.<sup>[81]</sup>检验了人为和自然强迫对东亚季风过渡带晚夏(8月)降水减少趋势的相对贡献。结果表明:气溶胶强迫通过减小海陆热力差,从而在我国中东部低层激发显著的偏北风异常,抑制来自南部海洋上空的水汽输送,导致东亚季风过渡带上空更加干燥;而温室气体强迫的贡献是通过激发南风异常使得东亚季风过渡带变湿,从而抵消人为气溶胶强迫的影响。自然强迫对东亚季风过渡带干旱趋势的影响较弱。

目前,对于气候系统内部变率与外强迫影响东亚气候过渡带降水趋势相对重要性的定量研究仍较欠缺。上述工作仅从定性角度揭示人为强迫的可能贡献,但并未从定量角度阐明气候系统内部变率和外强迫对20世纪下半叶以来东亚季风过渡带干旱化趋势的相对贡献,而这也是值得进一步研究的科学问题。

## 5 总结与展望

文中对东亚夏季风进退及其影响下的东亚夏季风北边缘活动带夏季降水变化的相关进展进行了回顾。在年际时间尺度,从ENSO的影响、热带北大西洋海温的影响、ENSO与热带北大西洋海温的协同作用等几个方面,归纳了东亚夏季风北边缘活动带夏季降水年际变化的影响因子及物理机制;在年代际尺度上,从PDO的影响、AMO的影响,以及气候系统外强迫的影响等几个方面,总结了东亚夏季风北边缘活动带夏季降水年代际变化的影响因子及物理机制。目前,针对东亚夏季风进退及其影响下的东亚夏季风北边缘活动带降水变化机理的研究还比较少,未来相关研究应关注如下方面:

(1) 两类ENSO的作用。前人研究表明,CP型

与EP型ENSO事件在形成机制和演变过程均存在显著差异,对东亚夏季风的影响也有明显不同。那么,两类ENSO事件对东亚季风过渡带夏季降水年际变化的影响是否也存在差异?这一问题有待深入研究。

(2) 中高纬西风环流和副热带环流系统的贡献。东亚夏季风北边缘活动带降水同时与东亚夏季风和中高纬西风带环流系统的变化密切相联,以往研究大多从定性角度分析东亚夏季风或中高纬西风带环流的作用,缺乏对二者相对贡献的定量阐释。如何定量描述中高纬西风带环流和东亚夏季风副热带环流系统的贡献,二者是否存在年际或年代际尺度特征,仍有待进一步研究。

(3) 气候系统内部变率和外强迫对东亚气候过渡带降水年代际变化的定量贡献。全球变暖背景下东亚气候过渡带降水的年代际变化,不仅受到气候系统内部变率的调制,还受到气候系统外强迫的影响。由于区域降水具有较大的内部变率,其对全球变暖的响应信号极易被内部变率所掩盖<sup>[76]</sup>。因此,在年代际时间尺度上量化东亚气候过渡带降水变化中气候系统内部变率与外强迫的相对贡献目前仍是一个难点<sup>[77]</sup>,有必要借助国际先进的气候变化归因方法深入开展系统研究。

(4) PDO和AMO对东亚季风过渡带降水年代际变化的间接调制作用。前人研究表明,东亚气候过渡带降水的年际变化与热带中东太平洋海温、热带北大西洋海温等诸多因子的变化密切相关,而在年代际尺度上,PDO、AMO等通过海气相互作用对于影响东亚气候过渡带降水年际变化的关键区海温异常又有着显著的调制作用。那么,PDO、AMO能否通过影响这些关键因子,来调制东亚气候过渡带降水的年代际变化呢?这同样是值得继续深入研究的问题。

## 参考文献:

- [1] TAO S Y, CHEN L X. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]. New York: Oxford University Press, 1987: 61-92.
- [2] 胡豪然, 钱维宏. 东亚夏季风北边缘的确认 [J]. 自然科学进展, 2007, 17(1): 57-65.
- [3] MEI S L, CHEN W, CHEN S F. On the relationship between the northern limit of southerly wind and summer precipitation over East China [J]. Atmos Oceanic Sci Lett, 2015, 8(1): 52-56.
- [4] QIAN W H, LIN X, ZHU Y F, et al. Climatic regime

- shift and decadal anomalous events in China[J]. *Climatic Change*, 2007, 84(2):167-189.
- [5] QIAN W H, SHAN X L, CHEN D L, et al. Droughts near the northern fringe of the East Asian summer monsoon in China during 1470 – 2003 [J]. *Climatic Change*, 2012, 110(1/2):373-383.
- [6] 李栋梁, 吕兰芝. 中国农牧交错带的气候特征与演变[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(5):76-81.
- [7] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(5):739-747.
- [8] YANG J P, DING Y J, CHEN R S, et al. Fluctuations of the semi-arid zone in China, and consequences for society [J]. *Climatic Change*, 2005, 72(1/2):171-188.
- [9] DAI A G. Drought under global warming: a review [J]. *WIREs Clim Change*, 2011, 2(1):45-65.
- [10] LIU J, WANG B, DING Q H, et al. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: results from ECHO-G model [J]. *J Climate*, 2009, 22(9):2356-2371.
- [11] HUANG R H, CHEN J L, HUANG G. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24(6):993-1023.
- [12] HUANG G, LIU Y, HUANG R H. The interannual variability of summer rainfall in the arid and semiarid regions of northern China and its association with the northern hemisphere circumglobal teleconnection [J]. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(2):257-268.
- [13] BUEH C, LI Y, LIN D W, et al. Interannual variability of summer rainfall over the northern part of China and the related circulation features [J]. *J Meteor Res*, 2016, 30(5):615-630.
- [14] 刘长征, 王会军, 姜大膀. 东亚季风区夏季风强度和降水的配置关系[J]. *大气科学*, 2004, 28(5):700-712.
- [15] 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠. 东亚夏季风变化与华北夏季降水异常的关系[J]. *高原气象*, 2016, 35(5):1280-1289.
- [16] ZHANG H L, ZHANG Q, YUE P, et al. Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2016, 121(23):13901-13918.
- [17] 李春, 韩笑. 东亚夏季风北界与我国夏季降水关系的研究[J]. *高原气象*, 2008, 27(2):325-330.
- [18] 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[J]. *气象学报*, 2009, 67(1):83-89.
- [19] MA Z G. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO) [J]. *Chin Sci Bull*, 2007, 52(15):2130-2139.
- [20] QIAN C, ZHOU T J. Multidecadal variability of north China aridity and its relationship to PDO during 1900 – 2010 [J]. *J Climate*, 2014, 27(3):1210-1222.
- [21] LI J P, WU Z W, JIANG Z H, et al. Can global warming strengthen the East Asian summer monsoon? [J]. *J Climate*, 2010, 23(24):6696-6705.
- [22] MA Z G, FU C B. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. *Chin Sci Bull*, 2006, 51(23):2913-2925.
- [23] DING Y H, LIU Y J, SUN Y, et al. Weakening of the Asian summer monsoon and its impact on the precipitation pattern in China [J]. *Int J Water Resour Dev*, 2010, 26(3):423-439.
- [24] DAI A G. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nat Clim Change*, 2013, 3(1):52-58.
- [25] ZHANG L X, ZHOU T J. Drought over East Asia: a review [J]. *J Climate*, 2015, 28(8):3375-3399.
- [26] HUANG J P, JI M X, XIE Y K, et al. Global semi-arid climate change over last 60 years [J]. *Climate Dyn*, 2016, 46(3/4):1131-1150.
- [27] DAI A G, ZHAO T B. Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part I: estimates of historical drought changes [J]. *Climatic Change*, 2017, 144(3):519-533.
- [28] ZHU C W, WANG B, QIAN W, et al. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: a possible response to global warming [J]. *Geophys Res Lett*, 2012, 39(9):L09701.
- [29] WANG T, WANG H J, OTTERÅ O H, et al. Anthropogenic agent implicated as a prime driver of shift in precipitation in eastern China in the late 1970s [J]. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13(24):12433-12450.
- [30] LI C X, ZHAO T B, MA Z G. Impacts of anthropogenic activities on climate change in arid and semiarid areas based on CMIP5 models [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59(30):2972-2988.
- [31] ZHAO T B, DAI A G. The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emissions scenario [J]. *J Climate*, 2015, 28(11):4490-4512.
- [32] ZHOU T J, ZHANG W X, ZHANG L X, et al. The dynamic and thermodynamic processes dominating the reduction of global land monsoon precipitation driven by anthropogenic aerosols emission [J]. *Sci Chin Earth Sci*, 2020, 63(7):919-933.
- [33] 史正涛. 中国季风边缘带自然灾害的区域特征 [J].



- 干旱区资源与环境,1996,10(4):1-7.
- [34] 王铮,张丕远,刘啸雷,等.中国生态环境过渡的一个重要地带[J].生态学报,1995,15(3):319-326.
- [35] WANG L, CHEN W, HUANG G, et al. Changes of the transitional climate zone in East Asia: past and future [J]. *Climate Dyn*,2017,49(4):1463-1477.
- [36] QIAN W H, JIANG N. The global monsoon definition using the difference of local minimum and maximum pentad precipitation rates associated with cross-equatorial flow reversal[J]. *Theor Appl Climatol*,2016,124(3/4):883-901.
- [37] WANG B, DING Q H. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years [J]. *Geophys Res Lett*,2006,33(6):L06711.
- [38] WANG Q L, WANG L, HUANG G, et al. Temporal and spatial variation of the transitional climate zone in summer during 1961–2018 [J]. *Int J Climatol*, 2021, 41(3):1633-1648.
- [39] 赵威,韦志刚,郑志远,等.1964—2013年中国北方农牧交错带温度和降水时空演变特征[J].高原气象,2016,35(4):979-988.
- [40] ZHANG R H, SUMI A, KIMOTO M. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. *Adv Atmos Sci*,1999,16(2):229-241.
- [41] HUANG R H, ZHANG R H, ZHANG Q Y. The 1997/98 ENSO cycle and its impact on summer climate anomalies in East Asia[J]. *Adv Atmos Sci*,2000,17(3):348-362.
- [42] WANG B, WU R G, FU X H. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J Climate*,2000,13(9):1517-1536.
- [43] WU R G, HU Z Z, KIRTMAN B P. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia [J]. *J Climate*, 2003,16(22):3742-3758.
- [44] XIE S P, HU K M, HAFNER J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J Climate*,2009,22(3):730-747.
- [45] ZHAO W, CHEN S F, CHEN W, et al. Interannual variations of the rainy season withdrawal of the monsoon transitional zone in China[J]. *Climate Dyn*,2019,53(3/4):2031-2046.
- [46] ZHAO W, CHEN W, CHEN S F, et al. Inter-annual variations of precipitation over the monsoon transitional zone in China during August–September: role of sea surface temperature anomalies over the tropical Pacific and North Atlantic[J]. *Atmos Sci Lett*,2018,20(1):E872.
- [47] ZHAO W, CHEN W, CHEN S F, et al. Combined impact of tropical central-eastern Pacific and North Atlantic sea surface temperature on precipitation variation in monsoon transitional zone over China during August–September [J]. *Int J Climatol*,2020,40(2):1316-1327.
- [48] ASHOK K, BEHERA S K, RAO S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J Geophys Res: Oceans*,2007,112(C11):C11007.
- [49] KAO H Y, YU J Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO [J]. *J Climate*, 2009, 22(3):615-632.
- [50] KUG J S, JIN F F. Left-hand rule for synoptic eddy feedback on low-frequency flow [J]. *Geophys Res Lett*, 2009,36(5):L05709.
- [51] FENG J, CHEN W, TAM C Y, et al. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases [J]. *Int J Climatol*, 2011, 31(14):2091-2101.
- [52] YUAN Y, YANG S. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: focus on ENSO cycles [J]. *J Climate*,2012,25(21):7702-7722.
- [53] CHEN Z S, WEN Z P, WU R G, et al. Influence of two types of El Niños on the East Asian climate during boreal summer: a numerical study [J]. *Climate Dyn*, 2014, 43(1/2):469-481.
- [54] 陈文,丁硕毅,冯娟,等.不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展 [J].大气科学,2018,42(3):640-655.
- [55] ZUO J Q, LI W J, SUN C H, et al. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon [J]. *Adv Atmos Sci*, 2013, 30(4):1173-1186.
- [56] CHANG T C, HSU H H, HONG C C. Enhanced influences of tropical Atlantic SST on WNP-NIO atmosphere-ocean coupling since the early 1980s [J]. *J Climate*,2016,29(18):6509-6525.
- [57] HONG C C, CHANG T C, HSU H H. Enhanced relationship between the tropical Atlantic SST and the summertime western North Pacific subtropical high after the early 1980s [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2014, 119(7):3715-3722.
- [58] FENG J, CHEN W, WANG X C. Reintensification of the anomalous western North Pacific anticyclone during the El Niño Modoki decaying summer: relative importance of tropical Atlantic and Pacific SST anomalies [J]. *J Climate*,2020,33(8):3271-3288.
- [59] PIAO J L, CHEN W, CHEN S F, et al. Intensified impact of North Atlantic Oscillation in May on subsequent July Asian inland plateau precipitation since the late 1970s [J]. *Int J Climatol*,2018,38(5):2605-2612.

- [60] SATO T, KIMURA F. Impact of diabatic heating over the Tibetan Plateau on subsidence over northeast Asian arid region[J]. *Geophys Res Lett*,2005,32(5):L05809.
- [61] WANG B, BAO Q, HOSKINS B, et al. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia [J]. *Geophys Res Lett*,2008,35(14):L14703.
- [62] DUAN A M, WANG M R, LEI Y H, et al. Trends in summer rainfall over China associated with the Tibetan Plateau sensible heat source during 1980–2008 [J]. *J Climate*,2013,26(1):261-275.
- [63] DING Y H, WANG Z Y, SUN Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: observed evidences [J]. *Int J Climatol*,2008,28(9):1139-1161.
- [64] HUANG R H, HUANG G, WEI Z G. Climate variations of the summer monsoon over China[M]//CHANG C P. *East Asian Monsoon*. Singapore: World Scientific,2004:564.
- [65] WANG H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv Atmos Sci*,2001,18(3):376-386.
- [66] SI D, JIANG D B, DING Y H. Synergistic impacts of the Atlantic and Pacific Oceans on interdecadal variations of summer rainfall in Northeast Asia [J]. *J Meteorol Res*,2021,35(5):844-856.
- [67] 郑丽娜.近 55 a 中国西北地区夏季降水的时空演变特征 [J]. *海洋气象学报*,2018,38(2):50-59.
- [68] SUN Y, DING Y H. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia [J]. *Sci Chin Earth Sci*,2010,53(2):284-300.
- [69] SONG F F, ZHOU T J, QIAN Y. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models [J]. *Geophys Res Lett*,2014,41(2):596-603.
- [70] MA S M, ZHOU T J, STONE D A, et al. Detectable anthropogenic shift toward heavy precipitation over eastern China [J]. *J Climate*,2017,30(4):1381-1396.
- [71] WANG H, XIE S P, KOSAKA Y, et al. Dynamics of Asian summer monsoon response to anthropogenic aerosol forcing [J]. *J Climate*,2019,32(3):843-858.
- [72] MANTUA N J, HARE S R. The Pacific Decadal Oscillation [J]. *J Oceanogr*,2002,58(1):35-44.
- [73] QIN M H, LI D L, DAI A G, et al. The influence of the Pacific Decadal Oscillation on North Central China precipitation during boreal autumn [J]. *Int J Climatol*,2018,38(S1):E821-E831.
- [74] 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 [J]. *地球物理学报*,2005,48(4):789-797.
- [75] SCHLESINGER M E, RAMANKUTTY N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years [J]. *Nature*,1994,367:723-726.
- [76] KERR R A. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries [J]. *Science*,2000,288(5473):1984-1985.
- [77] ZHAO W, CHEN W, CHEN S F, et al. Interdecadal change in the impact of North Atlantic SST on August rainfall over the monsoon transitional belt in China around the late 1990s [J]. *Theor Appl Climatol*,2020,140(1/2):503-516.
- [78] PIAO J L, CHEN W, CHEN S F. Water vapour transport changes associated with the interdecadal decrease in the summer rainfall over Northeast Asia around the late-1990s [J]. *Int J Climatol*,2021,41(s1):E1469-E1482.
- [79] PIAO J L, CHEN W, WEI K, et al. An abrupt rainfall decrease over the Asian inland plateau region around 1999 and the possible underlying mechanism [J]. *Adv Atmos Sci*,2017,34(4):456-468.
- [80] LI H X, HE S P, GAO Y Q, et al. North Atlantic modulation of interdecadal variations in hot drought events over northeastern China [J]. *J Climate*,2020,33(10):4315-4332.
- [81] ZHAO W, CHEN W, CHEN S F, et al. Roles of anthropogenic forcings in the observed trend of decreasing late-summer precipitation over the East Asian transitional climate zone [J]. *Sci Rep*,2021,11(1):4935.
- [82] JIANG Y Q, LIU X H, YANG X Q, et al. A numerical study of the effect of different aerosol types on East Asian summer clouds and precipitation [J]. *Atmos Environ*,2013,70:51-63.
- [83] LAU W K M, KIM K M. Competing influences of greenhouse warming and aerosols on Asian summer monsoon circulation and rainfall [J]. *Asia Pac J Atmos Sci*,2017,53(2):181-194.