

黄必城, 苏涛, 封国林. 2019. 全球海洋蒸发量年代际变化归因: 动力因子分析 [J]. 大气科学, 43 (3): 525–538. Huang Bicheng, Su Tao, Feng Guolin. 2019. Interdecadal changes in global ocean evaporation: Dynamic factors analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 525–538. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18117

全球海洋蒸发量年代际变化归因: 动力因子分析

黄必城¹ 苏涛² 封国林^{1,2,3}

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002

3 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

摘 要 本文基于动力调整方法, 利用客观分析海气通量 (OAFlux) 资料研究了 1958~2016 年全球海洋蒸发量变化及其动力作用和辐射强迫分量的变化, 发现海洋蒸发量及其动力作用分量具有一致性年代际变化特征, 特别是在 20 世纪 70 年代及 90 年代末期存在明显的年代际转折。进一步分析发现: 主要动力因子有太平洋—北美遥相关型 (PNA)、北极涛动 (AO)、北大西洋涛动 (NAO)、厄尔尼诺—南方涛动 (ENSO) 和阿留申低压 (AL), 并受到太平洋年代际振荡 (PDO) 的影响, 其中, 1970 年代末期的转折与 PNA、PDO、ENSO 和 AL 密切相关, 而 1990 年代末期的转折还与 NAO 变化有关。动力作用分量的前六个模态解释方差达到 67.5%, 其中, 低纬北太平洋和印度洋蒸发异常主要与海表温度 (SST) 及其引起的环流异常有关, 南太平洋、中纬北太平洋和北大西洋蒸发异常与环流异常直接相关。ENSO 与 PDO 在全球海洋蒸发量上的影响要大于 NAO。单因子相关分析发现南方涛动指数 (SOI)、NAO 和 PDO 与海洋蒸发年代际变化密切相关。总体来说, 动力作用分量在海洋蒸发的年代际变化中起主导作用, 其中, 以 ENSO、NAO 和 PDO 的影响最大。

关键词 海洋蒸发量 动力调整方法 年代际转折 动力因子

文章编号 1006-9895(2019)03-0525-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18117

Interdecadal Changes in Global Ocean Evaporation: Dynamic Factors Analysis

HUANG Bicheng¹, SU Tao², and FENG Guolin^{1,2,3}

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002

3 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Using the dynamical adjustment method, variations of ocean evaporation and its dynamically induced and radiative forced components from 1958 to 2016 are studied based on the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) dataset. It is found that ocean evaporation and its dynamically induced components have consistent interdecadal changes, especially the transitions that occurred in the late 1970s and 1990s. Further analysis shows that the major dynamic factors that affect ocean evaporation are the Pacific–North America teleconnection (PNA), the Arctic Oscillation (AO), the North

收稿日期 2018-01-22; 网络预出版日期 2018-05-30

作者简介 黄必城, 男, 1994 年出生, 硕士研究生, 主要从事水循环研究。E-mail: huangbch16@lzu.edu.cn

通讯作者 封国林, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41530531、41705053, 国家重点基础研究发展计划项目 2017YFC1502300

Found by National Natural Science Foundation of China (Grants 41530531, 41705053), National Basic Research Program of China (Grant 2017YFC1502300)

Atlantic Oscillation (NAO), El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and Aleutian Low (AL). The Pacific Decadal Oscillation (PDO) also has certain impacts. Among these factors, the transition in the 1970s is closely related to the PNA, PDO, ENSO and AL, while the transition in the 1990s is also related to NAO. The first six leading modes of dynamically induced components explain up to 67.5% of the total variance. The anomalies of evaporation in the North Pacific and the Indian Ocean at low latitudes are mainly related to SST and circulation anomalies induced by SST. The evaporation anomalies in the South Pacific, the North Pacific over middle latitudes and the North Atlantic are directly related to anomalies of circulation. ENSO, and PDO have greater impacts on global ocean evaporation than the NAO. Single factor correlation shows that the Southern Oscillation Index (SOI) and changes in the NAO and PDO coincide with the interdecadal variation of ocean evaporation. In general, the dynamically induced component dominates the interdecadal changes of ocean evaporation mainly by ENSO, NAO, and PDO.

Keywords Ocean evaporation, Dynamical adjustment method, Interdecadal turning, Dynamic factors

1 引言

蒸发是地表水分平衡和能量平衡的重要组成部分，是决定各地区天气和气候的重要因子，在全球水循环和气候变化中具有举足轻重的作用。海洋蒸发量约占全球总蒸发量的 86% (Schmitt and Wijffels, 1993)，是大气中水汽的主要来源，其变化不仅对海表温度和盐度有直接调节作用，而且能够通过环流与降水对陆地生态环境的形成和演变产生显著影响 (Du and Xie, 2008; Richter and Xie, 2008; Kosaka and Xie, 2013)。与此同时，气候变化也会对海洋蒸发有显著影响，根据克劳修斯—克拉伯龙方程 (Clausius–Clapeyron equation)，全球温度的上升使得大气的持水能力增强，导致水循环加快，有利于蒸发量增加。但是全球变暖背景下海洋蒸发量的变化趋势、幅度、区域分布和影响因子等依然存在诸多不确定性，因此系统研究海洋蒸发变化规律及相关机理具有重要科学意义。先前研究已经指出海洋蒸发量具有明显的年代际变化特征，特别是在 20 世纪 70 年代末期前后存在明显转折 (Yu, 2007; Gimeno et al., 2012; Zveryaev and Hannachi, 2017)。然而，对于海洋蒸发量变化及其原因尚不能给出明确结论 (Dolman and de Jeu, 2010)。

近期越来越多的研究关注动力和热力作用分别对海洋蒸发量变化的影响。一方面有许多研究侧重于环流异常引起的蒸发量变化 (Schott et al., 2009; Mahajan et al., 2010; Josey et al., 2011)。例如，Yu (2007) 利用经验正交函数分解 (EOF) 分析发现 20 世纪 90 年代海洋蒸发增加主要是表面风速增加造成的；Zveryaev and Hannachi (2017)

发现东大西洋及东大西洋—西俄罗斯遥相关配置变化对 1970 年代末地中海蒸发量的年代际转折有重要影响；冰岛和阿留申低压强度的“跷跷板”形态则可以调制北大西洋与北太平洋的蒸发变化 (Honda et al., 2005)。另一方面对于海表温度 (SST) 异常引起的蒸发量变化也有许多研究，其中，Mestas-Nuñez et al. (2006) 指出 1997~1998 年 El Niño 信号使得热带太平洋东部、中纬度太平洋及赤道印度洋的蒸发增强；而且 El Niño 与印度洋偶极子的负位相 (NIOD) 配置能减少印度洋的蒸发 (Pokhrel et al., 2012)。综上可见动力与热力作用对海洋蒸发量变化的贡献存在很大的区域性差异。事实上，在很多海区大气环流、海温和蒸发量之间会存在正反馈机制 (Wind–Evaporation–SST, WES)，因此通常难以区分动力与热力作用对蒸发量变化的相对贡献。Ren et al. (2017) 进一步研究了动力因子对海洋蒸发量变化的影响，发现阿留申低压异常通过改变风速进而影响到西北太平洋的蒸发，但是太平洋地区蒸发明显还受到 ENSO 和 PDO 的调制 (韩子轩等, 2017)。因此海洋蒸发动力因子的具体影响还需要深入研究 (Liu and Allan, 2018)。

相关研究也提出了分离动力作用的方法。Thompson et al. (2009) 为了研究自然变率和人为强迫对全球温度的不同影响提出了动力调整方法 (dynamical adjustment method)，主要是将海平面气压场 (SLP) 回归到北半球平均温度场以不改变温度序列时间分辨率的方式分离出其中的动力作用分量，发现基于 SLP 场的相关指数能够很好地估计大气在表面温度中的动力作用。Wallace et al. (2012) 在此基础上利用偏最小二乘 (PLS) 回归方法进行动力调整，表明动力作用对 20 世纪后期

北半球冷季增暖具有重要贡献，其中PLS回归方法很好地克服了自变量的多重共线性问题和自变量中样本个数较少的问题。Smoliak et al. (2015) 则将PLS回归方法分别应用于时间序列、主成分场和原场并得出了一致的结果，结果指出动力作用对北半球表面温度变化的解释方差可以达到50%。类似地，Guan et al. (2015b) 也利用该方法将温度分离为动力温度和非动力温度两部分，探讨了东亚冷季温度变化过程中的动力和非动力温度的变化特征以及对温度整体变化的相对贡献，发现动力作用是北半球温度年际和年代际变化的主要成因 (Guo et al., 2018)。此外，PLS回归方法还被运用于诊断西北太平洋雪盖及大西洋飓风的年际变化 (Smoliak et al., 2010)、径流预测 (Tootle et al., 2007) 以及东亚夏季风的季节预测 (Wu and Yu, 2016) 等。海洋蒸发量的变化是气候变化的综合反映，同时受到热能、海—气比湿差及风速等的影响 (Liu et al., 1979)，是动力与热力因子共同作用的结果，所以，使用线性相关系数难以定量评估各气象要素对海洋蒸发量变化的贡献。因此，本文利用动力调整方法定量评估全球变暖背景下动力作用对海洋蒸发量变化的贡献，以揭示影响海洋蒸发量年代际变化的主要气候系统。

2 数据与方法

2.1 数据说明

本文选取的资料包括：(1) 美国伍兹霍尔海洋研究所 (WHOI) 的客观分析海气通量 (OAFlux) 数据中的逐月海洋蒸发资料，水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ；(2) 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 发布的全球逐月再分析资料 (Kalnay et al., 1996)，包括海平面气压场 (SLP)、海表风速场、850 hPa 风场 (U850) 以及 500 hPa 高度场 (H500)，水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ；(3) 美国国家海洋大气局 (NOAA) 气候诊断中心发布的海表温度 (SST) 扩展重建资料 (NOAA ERSST V5)，水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ ；(4) 荷兰气候数据探索网 (Climate Explorer, <http://climexp.knmi.nl> [2017-11-01]) 发布的Niño3.4指数、南方涛动指数 (SOI)、太平洋年代际振荡 (PDO)、大西洋多年代际振荡 (AMO)、太平洋—北美遥相关型 (PNA)、北大西洋涛动 (NAO) 以及北极涛动

(AO) 指数数据 (Thompson and Wallace, 2000; van den Dool et al., 2000)。本文主要研究了全球无冰海洋蒸发量的变化特征及其机理，采用双线性插值方法将所有资料均处理成 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的格点形式，资料时间范围均为1958年1月至2016年12月。

2.2 研究方法

本文利用动力调整方法 (本方法主要基于偏最小二乘回归 partial least squares regression, PLS) 将海平面气压场 (SLP, 空间格点数为 144×73) 回归到海洋蒸发场 (海洋蒸发场可以是区域平均的时间序列或某区域的空间格点矩阵, 文中提到的全球海洋蒸发量平均都是指无冰海洋 ($60^\circ\text{S} \sim 75^\circ\text{N}$) 蒸发量的区域平均), 以提取海洋蒸发量变化的动力作用分量 (Smoliak et al., 2015), 即尽可能地从SLP场中提取预测因子来回归蒸发场, 直到满足交叉有效性 (cross-validation, 通过考察增加一个新的预测因子后, 能否对整个回归方程的预测误差有明显的改善作用, Wallace et al., 2012) 检验。在进行动力调整步骤之前, 需要先将SLP与蒸发时间序列距平化后再进行标准化。具体的动力调整步骤:

(1) 将格点蒸发时间序列与SLP求相关以生成单点互相关图;

(2) 将SLP投影到点互相关图上得到全部时间点的空间场, 分别对某个时间点的空间场的空间点的数值按纬度余弦进行加权平均得到某个时间点的数值, 得到第一个预测因子时间序列 Z_1 ;

(3) 利用最小二乘拟合方法将 Z_1 与格点蒸发时间序列以及SLP进行回归, 从而得到回归方程的剩余蒸发时间序列和剩余SLP。

在剩余蒸发时间序列和剩余SLP的基础上重复上述步骤以得到 Z_2 、 Z_3 、……、 Z_n , 直到这些预测因子的解释方差达到最大, 并且这些预测因子之间相互正交。

本文通过交叉有效性的检验结果提取出6个预测因子 (Guan et al., 2015b; Smoliak et al., 2015), 将提取出的每一个预测因子按照对蒸发时间序列解释方差的贡献由大到小排列, 分别称为第一PLS模态 (PLS1)、第二PLS模态 (PLS2)、……、第六PLS模态 (PLS6)。另外, 将海洋蒸发原始序列与动力作用分量 (dynamically induced) 的差值作为辐射强迫分量 (radiatively forced, 指代非动力作用或热力作用所造成的影响) (Guo et al., 2018)。

3 海洋蒸发量及其动力作用分量和辐射强迫分量的变化特征

图 1a 是 1958~2016 年全球海洋蒸发量的平均分布, 可见具有明显的经向性差异, 高值区主要位于副热带 ($30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$) 海域, 其中在副热带地区各大洋的西风漂流区达到最高, 达到 5 mm d^{-1} 以上, 同时在赤道东太平洋冷舌及南北半球高纬地区蒸发量较低, 大部分区域都在 2 mm d^{-1} 以下。

此外, 全球海洋蒸发量具有明显的年代际变化特征 (图 1b), 特别是在 20 世纪 70 年代及 90 年代末期存在两次较为明显的转折, 其中在 1978 年之前整体呈现下降趋势, 之后转为显著上升趋势, 而在 2000 年左右又出现下降趋势 (Yu, 2007)。影响蒸发的因素很多, 一般认为温度是影响蒸发的重要

因子, 在全球变暖的背景下, 人们预期近地表的大气会变干, 导致水体蒸发量上升。相关研究表明全球平均表面温度在蒸发量上述年代际变化相应时段正好依次有降温、快速增温和增温减缓三个不同阶段 (Yao et al., 2017), 说明海洋蒸发量的年代际变化与全球气候变化联系密切。

图 2 给出了全球海洋平均蒸发量时间序列及其动力作用与辐射强迫分量, 可以明显看出动力作用主要呈现年代际变化特征, 而辐射强迫分量以年际变化为主。其中动力作用分量在 20 世纪 60 年代下降趋势十分明显, 但是此后直到 1970 年代末期变化趋势逐渐放缓, 随后又出现明显的上升趋势, 至 21 世纪之后又开始下降, 这与海洋平均蒸发量的变化趋势基本一致, 可见动力作用在全球海洋蒸发量的年代际变化中起到主导作用。整体而言, 辐射

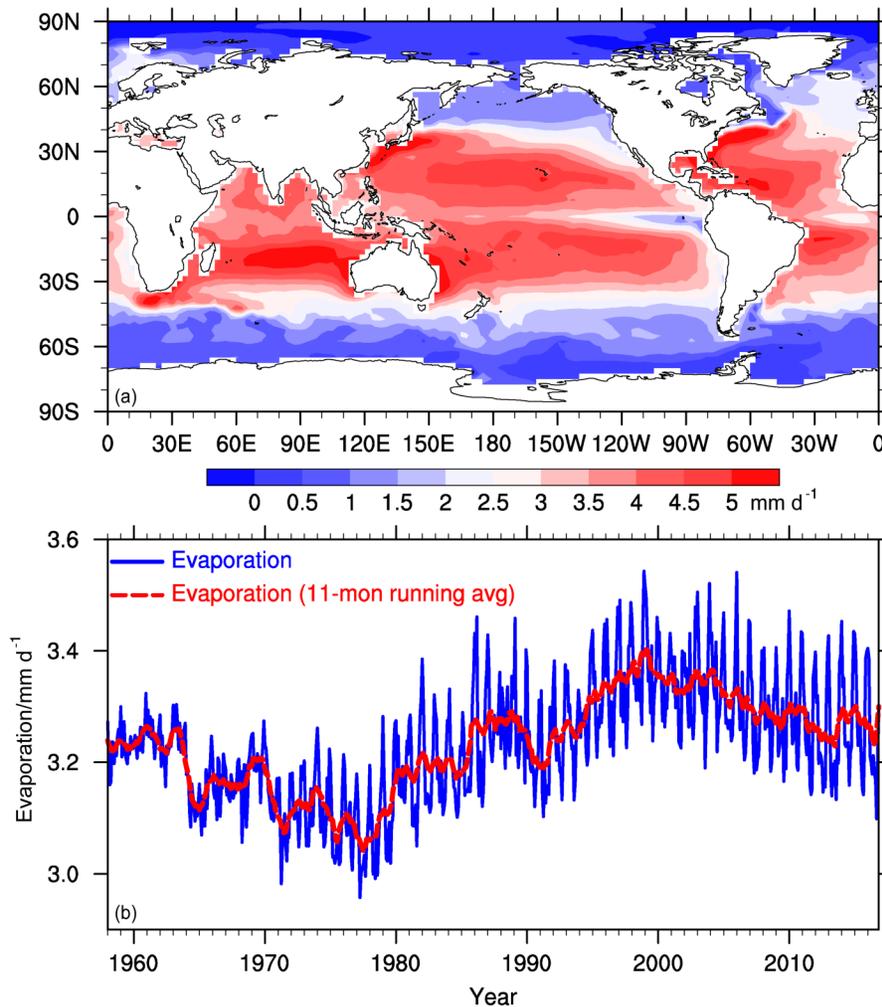


图1 1958~2016年 (a) 海洋平均蒸发量空间分布和 (b) 全球无冰海洋蒸发量平均值的逐月时间序列 (蓝线) 及其11点滑动平均 (红线)。单位: mm d^{-1}
Fig. 1 (a) Spatial distribution of ocean evaporation and (b) time series of monthly mean global ice-free ocean evaporation (blue line) and its 11-month running average (red line) averaged during 1958–2016. Units: mm d^{-1}

强迫分量的年代际变化趋势并不明显，但是需要指出的是其在70年代有较为明显的下降趋势，这与该时段全球海洋平均蒸发量的变化趋势非常一致，而此时动力作用分量的变化趋势并不显著，说明辐射强迫作用在该时段对海洋蒸发量的年代际变化有重要作用。前人的研究结果已经指出北太平洋中高

纬海域是全球温度年代际变化的显著区域（江志红等，2004）。肖栋和李建平（2007）指出1973~1979年存在SST年代际突变现象，特别是北太平洋中部发生降温突变，因此，SST的大幅减少可能是造成70年代海洋蒸发量大幅减少的主要原因。

图3给出了前6个PLS模态的标准化时间序

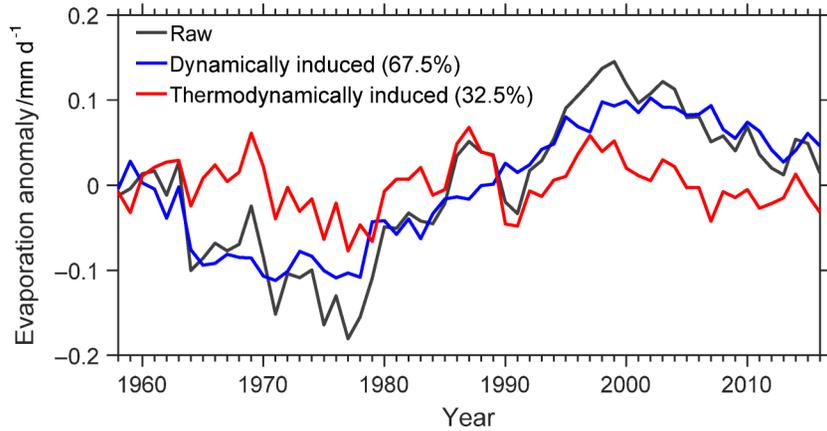


图2 1958~2016年全球海洋平均蒸发量距平（单位： mm d^{-1} ）的时间序列（黑线）及其动力作用分量（蓝线）和辐射强迫分量（红线）。括号中数值为方差贡献百分比

Fig. 2 Time series of global mean ocean evaporation anomalies (units: mm d^{-1} , black line) and its dynamically induced component (blue line) and radiatively forced component (red line) during 1958–2016. The variance contribution ratios are given in parentheses

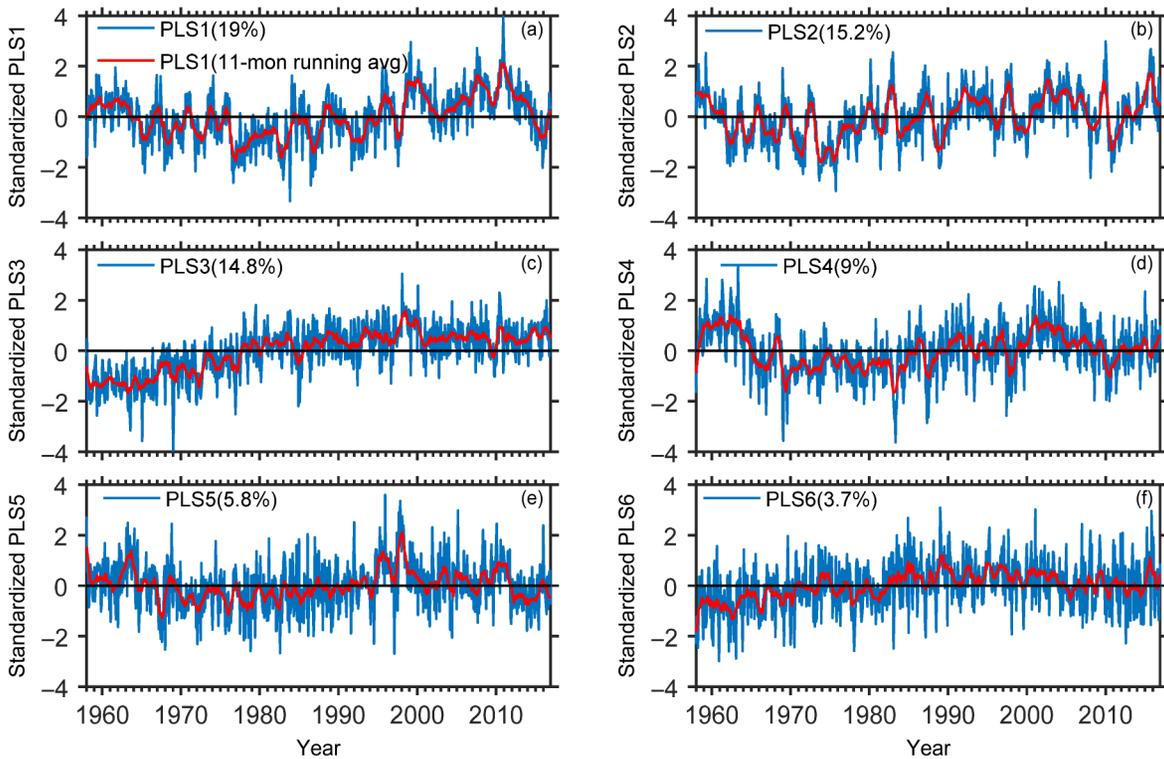


图3 (a) 标准化的PLS1（蓝线）及其11点滑动平均（红线）。(b–f) 同 (a)，但分别为PLS2–PLS6。括号内数值表示各模态对海洋蒸发量变化的解释方差
Fig. 3 (a) Standardized PLS1 [the first PLS (partial least squares regression) predictor, blue line] and its 11-month running average (red line). (b–f) As in (a), but for PLS2–PLS6, respectively. The fraction of ocean evaporation variance explained by the corresponding PLS model is shown in parentheses of each panel

列, 解释方差分别为 19%、15.2%、14.8%、9%、5.8% 和 3.7%, 累计解释方差达到 67.5%, 可以代表海洋蒸发的主要动力作用因子。从 PLS1 (图 3a) 来看, 20 世纪 70 年代末期至 2011 年有明显的上升趋势, 但是近几年有显著下降趋势; PLS2 在整体上以年际变化为主, 线性变化趋势相对较弱 (图 3b), 其中在 70 年代末和近几年有较为明显的上升趋势; PLS3 在 20 世纪有明显的线性增加趋势 (图 3c), 但在 21 世纪趋于平缓; 此外 PLS6 也主要以年代际变化为主, 在 20 世纪 90 年代之前有线性增加趋势, 但是之后呈现下降趋势 (图 3f); 相对而言, PLS4 (图 3d) 和 PLS5 (图 3e) 的年际变化幅度较大, 但是在 20 世纪 70 至 90 年代也有较大的上升趋势。由此可见, 海洋蒸发的动力作用分量与多个动力因子均密切相关, 并且各因子在不同时段的作用有明显差异。通过交叉对比发现, 动力作用分量在 60 年代的减少主要与 PLS1、PLS2 和 PLS4 有关, 而 80 年代至 21 世纪的增加趋势与前 6 个 PLS 模态均有联系, 特别是 PLS1、PLS3 和 PLS5 起到了非常重要的作用, 而动力作用分量在 21 世纪的减少则与 PLS2、PLS4 和 PLS5 较为一致。

上述结果表明, 动力作用分量是决定海洋蒸发量年代际变化的最直接因素, 而不同动力因子对海洋蒸发量变化的影响在不同时段存在显著差别。具体来说, 70 年代转折主要与 PLS1 和 PLS2 密切相关, 而 90 年代转折则与 PLS1 和 PLS5 有关。

4 动力作用分量的大气环流和海温模态

海洋蒸发量变化是海气相互作用的结果, 为了全面研究海洋蒸发量变化的成因, 本文重点分析了与蒸发量变化相联系的 SST 和高低层环流配置等。

图 4a 为 PLS1 对蒸发量的线性回归结果, 可见正异常区主要分布在副热带西北太平洋、赤道中太平洋至南美西海岸、热带副热带印度洋和大西洋, 负异常区主要集中在赤道中东太平洋和澳大利亚以东海域, 都通过了显著性检验。PLS1 蒸发量异常与 SST 紧密联系 (图 5a), 对应于 ENSO 和 PDO 冷位相和 AMO 暖位相。从空间分布型来看, 副热带西北太平洋蒸发异常偏多和西北太平洋 SST 异常偏暖相关, 赤道中东太平洋蒸发异常偏少与赤道东太平洋 SST 异常偏冷联系密切, 而副热带北太平洋海

温异常西正东负正好与西太平洋 SLP 负异常和东太平洋 SLP 正异常相对应 (图 6a), 大西洋上蒸发异常偏多明显与副热带大西洋风速加强有关 (图 7a), 上层风场对应于辐散有利于蒸发增加 (图 8a), 同时也受到 SST 异常偏暖的影响, ENSO 冷位相可能会导致热带副热带印度洋蒸发异常偏多 (Pokhrel et al., 2012), 其次海表风场也有对应加强。此外, 东南太平洋 SLP 存在明显的正异常中心, 而在澳大利亚一带以负异常为主 (图 6a), 这与南方涛动 (SO) 正位相非常一致。东南太平洋 SLP 异常偏高有利于水汽辐散, 这对蒸发有促进作用; 同时在海表风速上对应赤道中太平洋至南美西海岸风速异常增强 (图 7a), U850 异常辐散, 而澳大利亚以东 U850 以辐合为主 (图 8a), 在此配置下, 促使赤道中太平洋至南美西海岸蒸发异常偏多, 澳大利亚以东蒸发异常偏少。

PLS2 对应赤道中太平洋至南美西海岸蒸发异常偏少, 而副热带北太平洋中部、澳大利亚以东和赤道中东太平洋蒸发异常偏多 (图 4b)。此时 ENSO 和 PDO 均处于暖位相 (图 5b), 其中赤道中东太平洋蒸发异常偏多与 El Niño 型 SST 异常有关, 而这正好对应于西太平洋 SLP 正异常而东太平洋 SLP 负异常, 赤道中太平洋存在异常西风。此时, 阿留申一带 SLP 有负异常中心 (图 6b), 阿留申低压 (AL) 偏强, 北太平洋中部 U850 以辐散为主。在此配置下, 一方面低层风场辐散会促进副热带北太平洋中部的蒸发提高, 另一方面 AL 异常偏强会导致其南侧副热带西风加强 (图 7b), 也会使副热带北太平洋中部蒸发偏多。相关研究也指出 AL 长时间地异常偏强时会加强副热带地区西风, 加快海水向大气释放感热潜热, 从而可能增加海洋蒸发 (朱益民和杨修群, 2003)。此时 SO 为负位相, 澳大利亚附近 SLP 正异常有利于水汽辐散, 对应海表风场上澳大利亚以东风速异常加强、东南太平洋风速异常减弱 (图 7b), 澳大利亚以东 U850 异常辐散、东南太平洋风场辐合 (图 8b), 从而导致澳大利亚以东蒸发异常偏多和赤道西太平洋至南美西海岸异常偏少, 这与 PLS1 的情况基本一致。整体而言, PLS2 与 AL 偏强与 SO 负位相密切相关, 并在一定程度上受到 El Niño 及 PDO 暖位相的影响。

PLS3 上蒸发异常偏少区域位于太平洋东部分海域和热带大西洋 (图 4c), 而印度洋、北太平洋中部、副热带西北太平洋与中纬北大西洋蒸发异

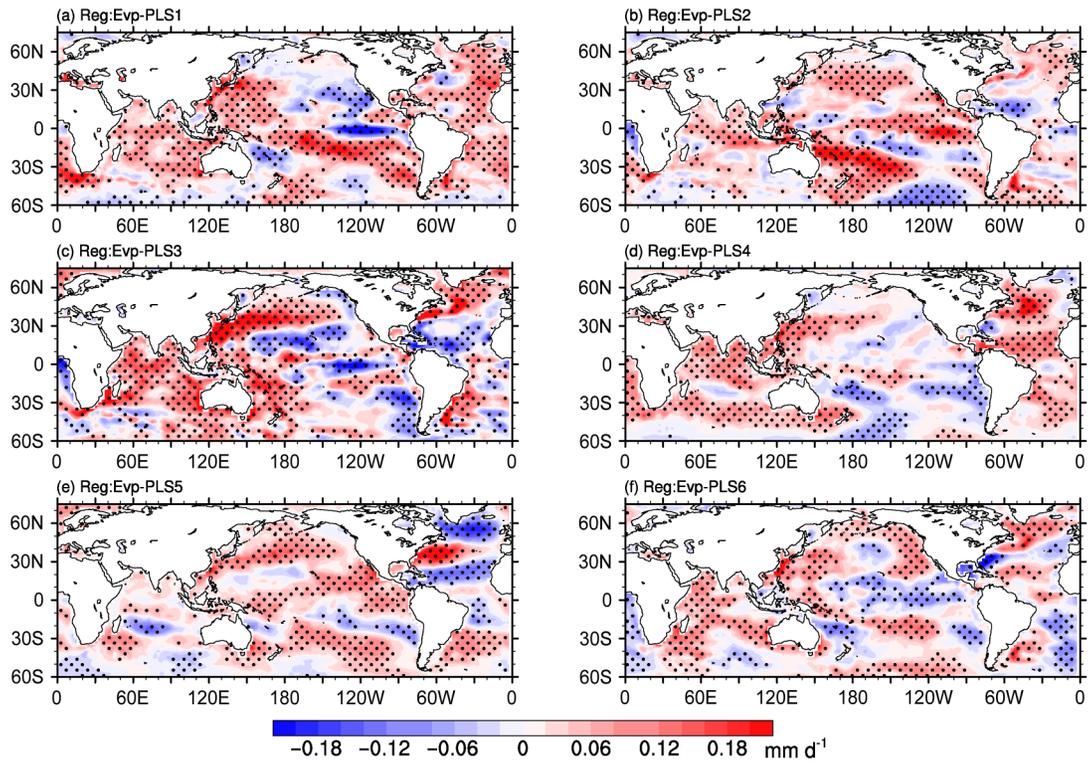


图4 1958~2016年 (a) PLS1、(b) PLS2、(c) PLS3、(d) PLS4、(e) PLS5、(f) PLS6对海洋蒸发距平场 (单位: mm d^{-1}) 的线性回归。打点区域表示通过95%信度水平检验, 下同

Fig. 4 Anomalies of ocean evaporation (units: mm d^{-1}) regressed onto (a) PLS1, (b) PLS2, (c) PLS3, (d) PLS4, (e) PLS5, (f) PLS6 during 1958–2016. The stippled areas indicate regression at the 95% confidence level, the same hereafter

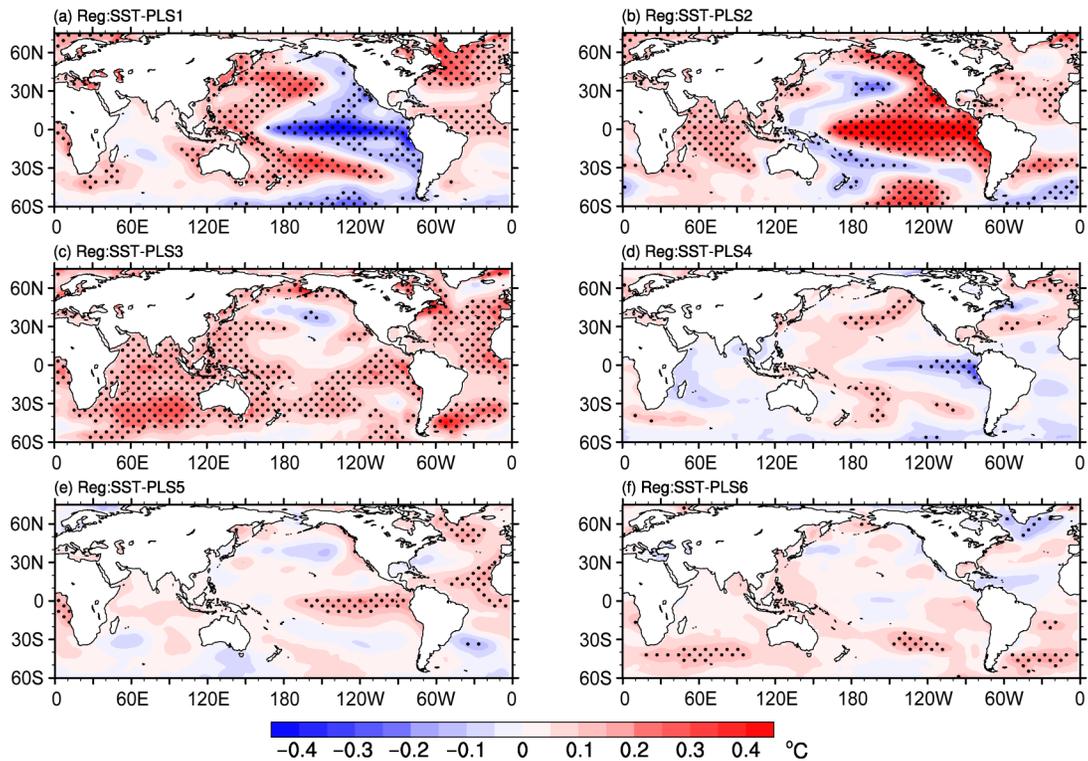


图5 同图4, 但为PLS1-PLS6对SST (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的线性回归

Fig.5 As in Fig. 4, but for linear regression of SST (units: $^{\circ}\text{C}$)

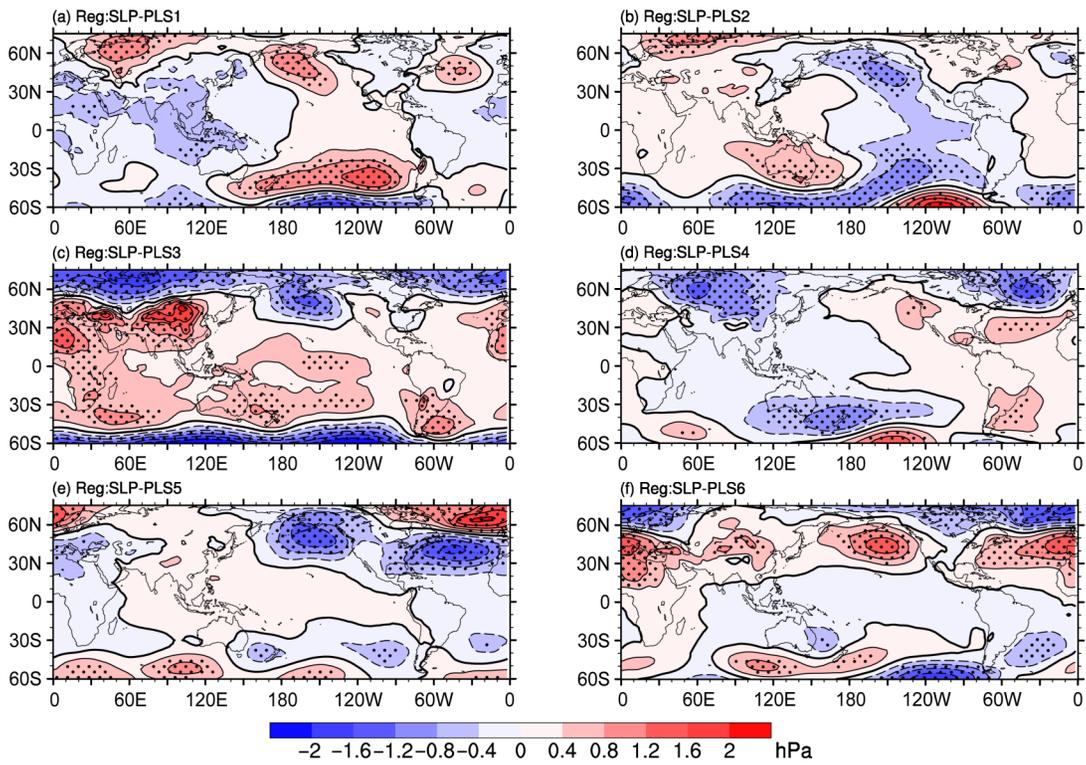


图6 同图4, 但为PLS1-PLS6对SLP (单位: hPa) 的线性回归。黑色加粗线为零线
Fig. 6 As in Fig. 4, but for linear regression of SLP (sea level pressure, units: hPa). The black bold lines are the zero lines

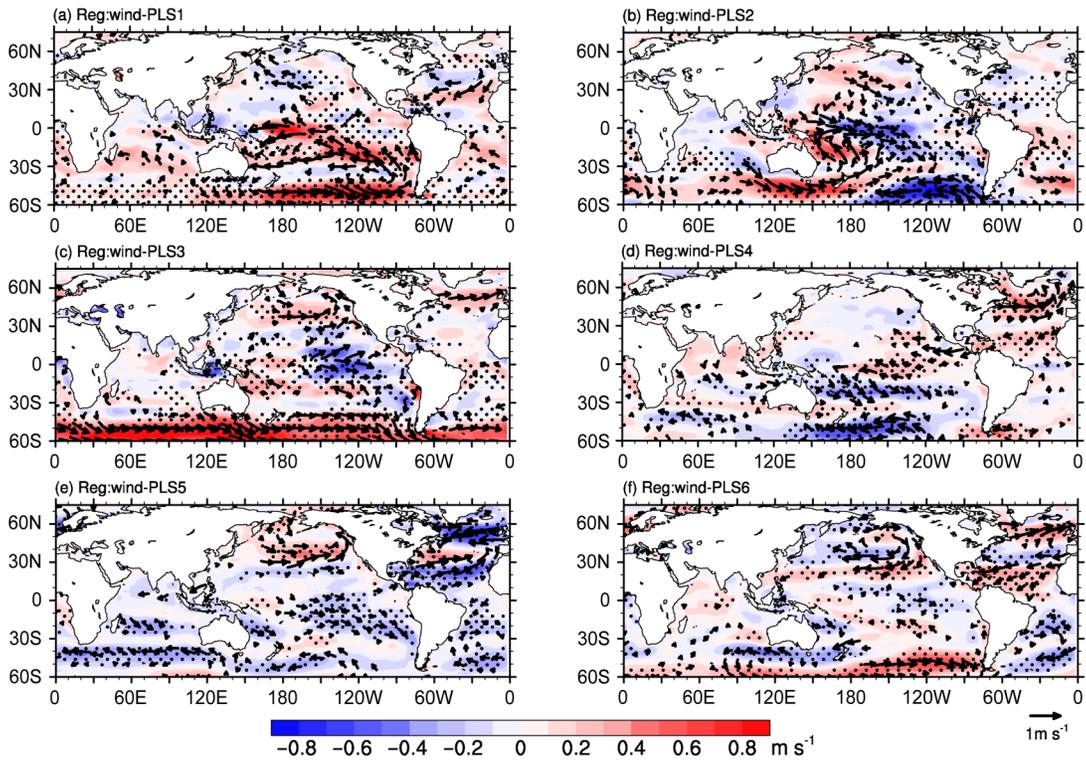


图7 同图4, 但为PLS1-PLS6对海表风场 (单位: $m s^{-1}$) 的线性回归。阴影区代表海表风速的线性回归, 打点区和矢量风场均通过95%信度水平检验
Fig. 7 As in Fig. 4, but for linear regression of ocean surface winds (units: $m s^{-1}$). Shaded areas indicate the regression of sea surface wind speed. Stippled areas and vectors indicate regression at the 95% confidence level

常偏多。此时北太平洋中部存在 SST 异常冷中心，PDO 整体上处于暖位相，而其他海域 SST 基本以正异常为主（图 5c）。印度洋、副热带西北太平洋和澳大利亚以东蒸发异常偏多均对应于 SST 异常偏暖，对应这些地区 SLP 均为正异常。阿留申一带及冰岛在内的高纬区域均为 SLP 负异常（图 6c），整体来看 PLS3 对应于北极涛动（AO）和南极涛动（AAO）正位相。在此配置下 AL 与冰岛低压偏强，导致其南侧西风加强（图 7c），而 U850 在副热带北太平洋中部和中纬北大西洋存在异常辐散（图 8c），从而导致北太平洋中部、副热带西北大西洋和中纬北大西洋蒸发异常偏多。整体上，PLS3 主要与 AL 与冰岛低压偏强、PDO、AO 和 AAO 正位相有关。

PLS4 对应热带印度洋、西北太平洋和北大西洋蒸发异常偏多，墨西哥湾附近以及中纬南太平洋蒸发异常偏少（图 4d）。此时，NAO 处于正位相（图 6d），在此配置下，冰岛附近风速加强，而墨西哥湾附近风速减弱（图 7d），导致冰岛附近蒸发异常偏多、墨西哥湾蒸发异常偏低。由于亚速尔附近 SLP 正异常中心有利于水汽辐散，亚速尔附近

U850 以辐散为主（图 8d），同时低纬北大西洋附近风速异常加强（图 7d），从而导致低纬北大西洋蒸发异常偏多。热带印度洋蒸发异常偏多可能与弱 ENSO 冷位相有关（图 5d），西北太平洋对应 500 hPa 上存在明显波列特征（图 9d），同时西伯利亚高压明显减弱（图 6d）从而影响冷暖气团的相对活动导致海表比湿差加大进而产生蒸发异常增加（Ren et al., 2017）。而 PLS5 对应北太平洋中部、副热带南太平洋和赤道东太平洋蒸发异常偏多，北大西洋上由南向北蒸发异常呈现“负正负”三极子结构（图 4e），这正好与北大西洋上风速异常相匹配（图 7e）。赤道东太平洋的蒸发异常偏多明显对应于 SST 偏暖（图 5e）；北太平洋中部和副热带南太平洋蒸发异常偏多对应于海表风速偏强（图 7e）；北大西洋上呈现 NAO 负位相（图 6e），冰岛附近海表风速偏弱而墨西哥湾附近风速偏强导致冰岛附近蒸发异常偏少，墨西哥湾蒸发异常偏多。此外，PLS6 对应北美西海岸和南太平洋中部蒸发异常偏多，北大西洋上类似于 PLS4，蒸发异常也呈现明显的三极子结构（图 4f）；南太平洋中部蒸发

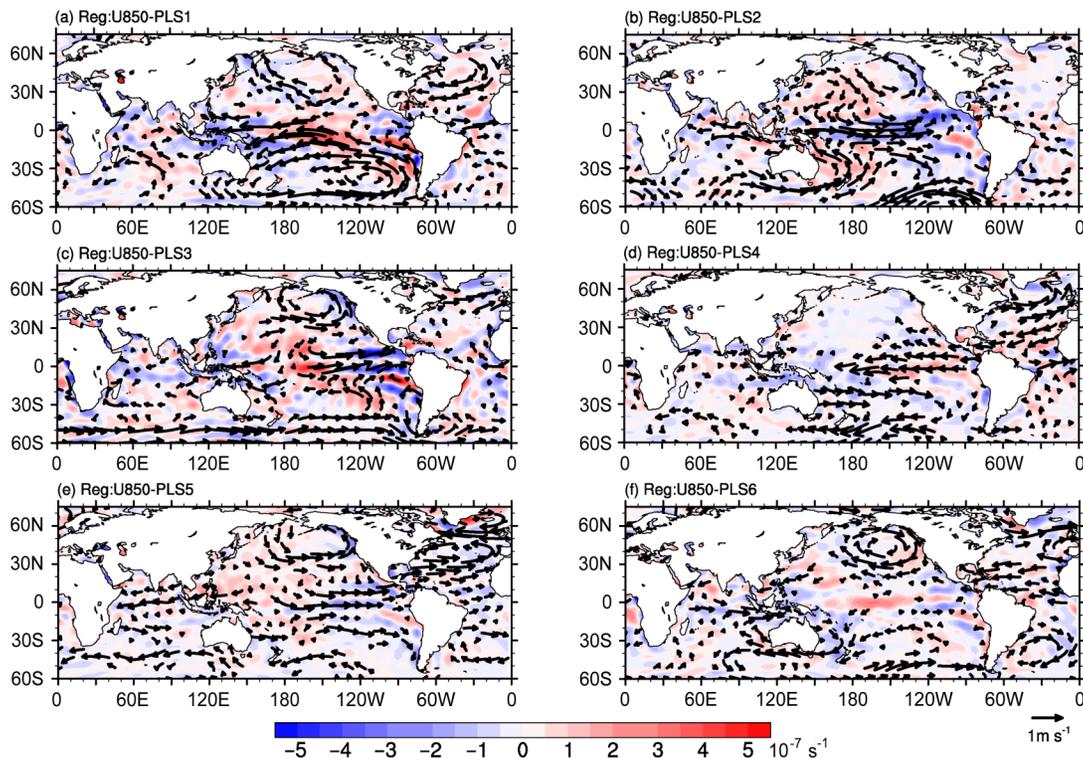


图 8 同图 4，但为 PLS1-PLS6 对 U850（单位： m s^{-1} ）的线性回归。阴影区表示风场辐散（红色）、辐合（蓝色）的线性回归（单位： 10^{-7} s^{-1} ），矢量风场通过 95% 信度水平检验

Fig. 8 As in Fig. 4, but for linear regression of U850 (850-hPa wind, units: m s^{-1}). Shaded areas indicate the regression (units: 10^{-7} s^{-1}) of divergence (red) and convergence (blue) of wind field at 850 hPa. The vectors indicate regression at the 95% confidence level

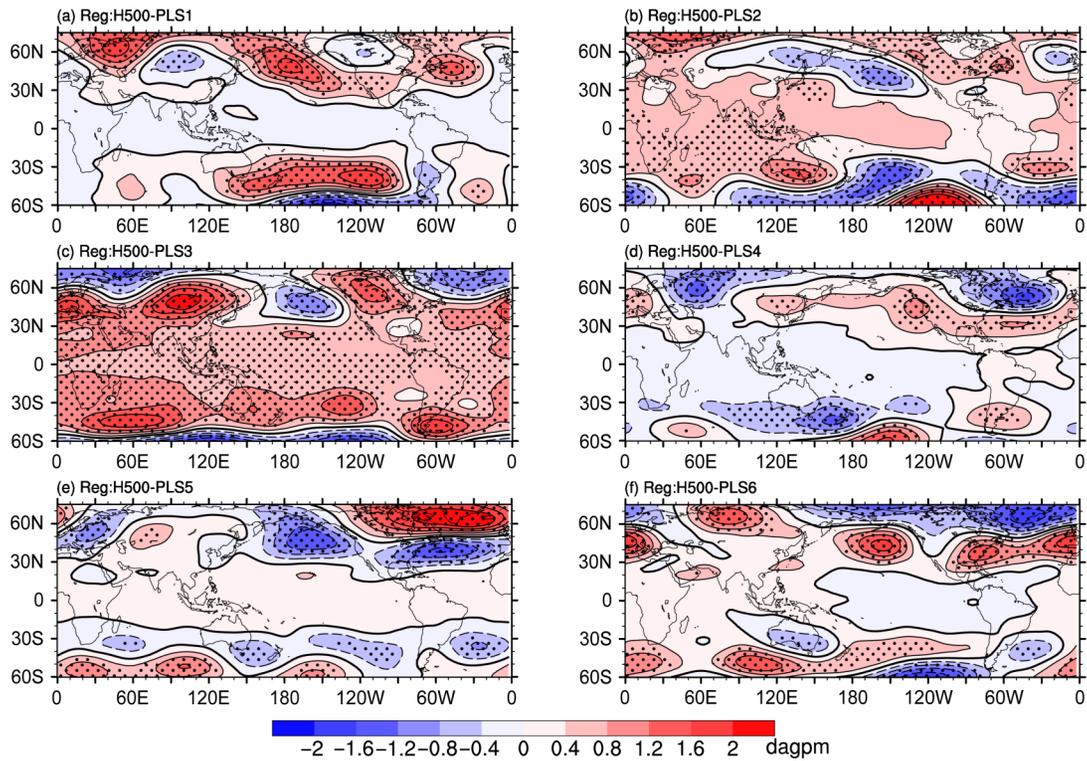


图9 同图4, 但为PLS1-PLS6对H500(单位: dagpm)的线性回归。黑色加粗线为零线

Fig. 9 As in Fig. 4, but for linear regression of H500 (500-hPa geopotential height, units: dagpm). The black bold lines are the zero lines

异常偏多明显对应于海表风场加强(图7f);北大西洋NAO正位相对应于蒸发异常的三极子结构,同时与海表风速异常相匹配(图7f)。北美西海岸蒸发异常偏多则是对应于U850辐散和海表风速异常加强(图8f)。

图9为PLS各模态对H500的线性回归,从中可以发现PLS1对应有PNA负位相,PLS2和PLS3对应有PNA正位相,因此海洋蒸发量异常也受到PNA的重要影响。前人的研究结果已经指出PNA型遥相关与海平面上AL型大气环流密切相关(邓新林和李春,2016),同时20世纪70年代末期前后北半球冬季PNA遥相关型的空间分布发生了显著变化(曹杰等,2012)。因此,PNA可能通过影响AL从而对北太平洋蒸发量产生影响。其次,从图6中还能发现北太平洋中部蒸发异常偏高必然对应着中纬度北太平洋SLP负异常,图5中印度洋蒸发异常偏高基本对应于SST变暖,说明蒸发异常与SLP和SST有着密切关系。

结合第三部分对于PLS模态的分析,可以初步认为20世纪70年代末期海洋蒸发的转折与AL、PNA、PDO和ENSO变化相关,而90年代末期转折还与NAO有关,特别是AL与NAO中冰岛低压

的关系在PLS各模态中均有体现。相关研究也表明,AL与冰岛低压在1980年前显著不相关而之后变得显著相关(董啸等,2014)。综上所述,低纬北太平洋和印度洋蒸发异常主要与SST引起的环流异常有关,南太平洋、中纬北太平洋和北大西洋蒸发异常也与环流异常直接相关。整体而言,AL偏强和PNA正位相大气环流配置能导致北太平洋中部蒸发异常偏多,SO负位相能导致澳大利亚以东蒸发异常偏多,赤道西太平洋至南美西海岸海域蒸发异常偏少,北大西洋蒸发异常的经向三极子结构与NAO型大气环流有关。此外,从PLS1和PLS2来看太平洋地区蒸发还受到ENSO与PDO的重要影响(韩子轩等,2017)。从PLS模态的解释方差大小上看(图3),ENSO与PDO在全球海洋蒸发量上的影响要大于NAO的影响。

5 主要动力因子对海洋蒸发的驱动作用

相关研究表明各动力因子之间会产生相互影响,其中杨丹宁和罗德海(2014)研究指出在ENSO冷位相年份冬季有利于PNA正位相波列结构

的维持，而冬季 ENSO 暖位相有利于维持 PNA 负位相波列结构。孙建奇和王会军（2005）指出 AL 可能是联系 AO 与 PDO 的纽带。曹杰等（2012）也提出 PDO 变化是造成北半球冬季 PNA 遥相关型变化的主要原因。Guan et al.（2015a）研究指出 AMO 与 NAO 存在相互调制作用。为了进一步解释主要动力因素对海洋蒸发变化的影响，本节分析了各环流因子与海洋蒸发量异常的直接关系。

就各个指数时间序列（图 10）而言，在 20 世纪 70 年代及 90 年代末期 SOI、NAO 及 PDO 均有明显的位相转变，与全球蒸发量平均的年代际变化较为匹配，说明这几个因子的年代际转变对全球蒸发量的变化十分重要；PNA 则表现在 20 世纪 70 年代末期有明显位相转变；AO、AMO 则表现在 20 世纪 90 年代末期有明显位相转变；而 AL 中心位置发生在 20 世纪 70 年代中后期由偏西为主转为偏东为主的年代际变化，强度上而是从偏弱转为偏强，近年来又出现偏弱形势（孙晓娟等，2011），说明 AL 变化对于蒸发年代际转折也有一定影响。Niño3.4 指数主要呈现的是年际变化特征，但是在 20 世纪

70 年代末期存在明显由负位相向正位相转变，同时 90 年代末期存在明显由正位相向负位相的转折。邓新林和李春（2016）指出 20 世纪 70 年代以前和 90 年代以后 El Niño 事件以中部型为主；钱诚和符淙斌（2006）发现 Niño3 区冬季 SST 在 20 世纪 70 年代末发生了明显的转折。说明 ENSO 位相变化对于海洋蒸发年代际转折也有重大影响。

在 SOI 与海洋蒸发的动力作用分量相关图上（图 11a）可以看出赤道太平洋东部及澳大利亚东海岸呈现显著负相关，低纬南太平洋中部为显著正相关，甚至与低纬大西洋也呈现显著正相关，说明 SOI 对蒸发量变化的作用有很强的区域性差异；NAO 指数与蒸发在副热带北大西洋有负相关关系（图 11b），但是在高纬和低纬北大西洋及部分北太平洋呈现正相关，与之前分析相同呈现明显经向三极子结构，表明 NAO 主要影响北大西洋及北太平洋部分海域的蒸发量变化；PDO 指数与蒸发量在副热带太平洋中部、澳大利亚东海岸及赤道东太平洋正相关，在北美西海岸及赤道西太平洋负相关（图 11c），PDO 主要是影响副热带北太平洋及赤道

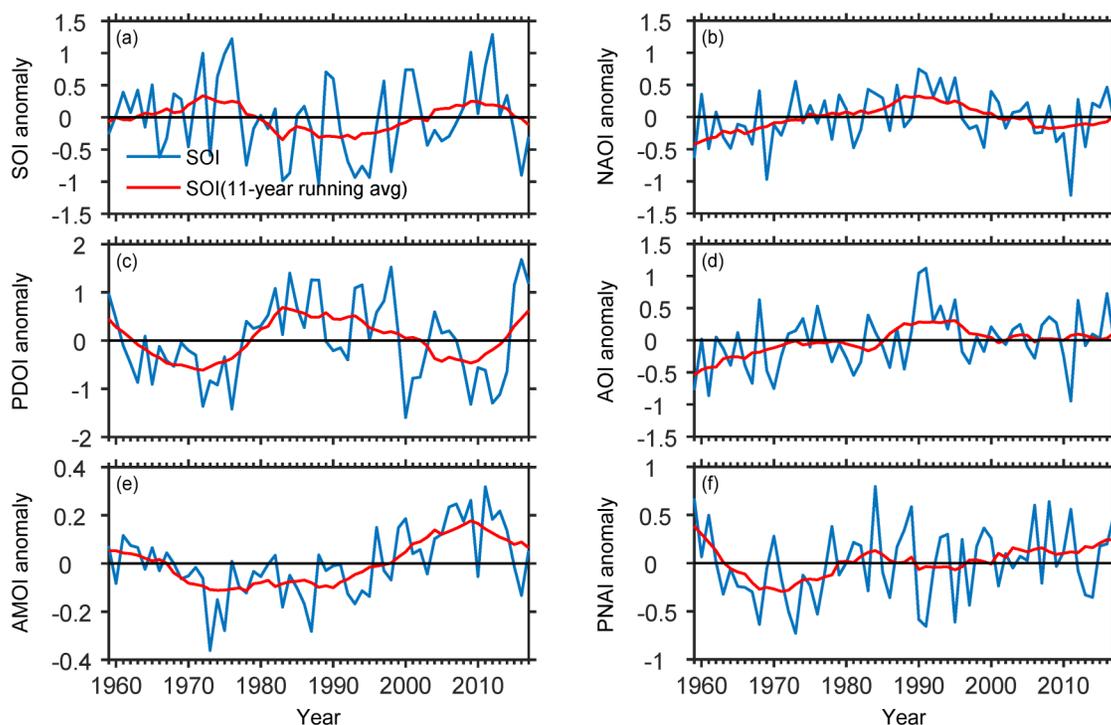


图 10 (a) SOI 距年平均时间序列（蓝线）及其 11 点滑动平均（红线）；(b-f) 同 (a)，但分别为 NAO 指数距平、PDO 指数距平、AO 指数距平、AMO 指数距平及 PNA 指数距平

Fig. 10 (a) Time series of annual mean SOI (Southern Oscillation index) anomalies (blue line) and its 11-year running average (red line). (b-f) As in (a), but for NAOI (North Atlantic Oscillation index) anomaly, PDOI (Pacific Decadal Oscillation index) anomaly, AOI (Arctic Oscillation index) anomaly, AMOI (Atlantic Multidecadal Oscillation index) anomaly, and PNAI (Pacific-North America teleconnection index) anomaly, respectively

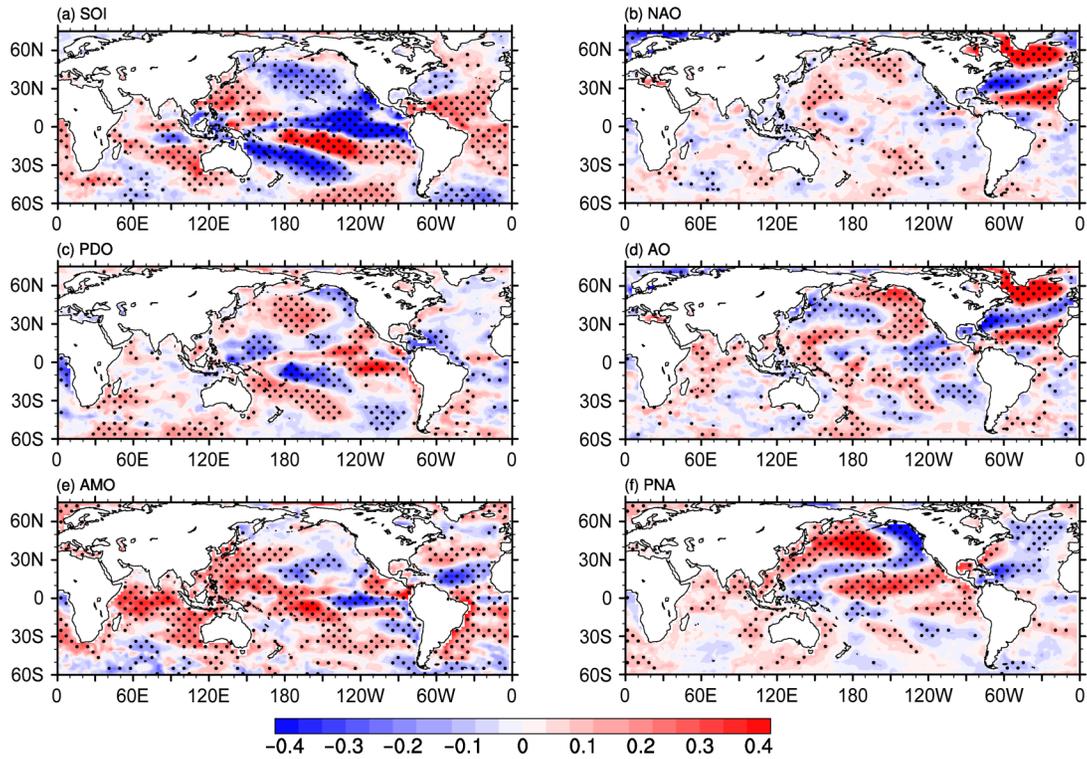


图 11 (a) SOI 与海洋蒸发距平动力作用分量相关系数的空间分布; (b-f) 同 (a), 但分别为 NAO、PDO、AO、AMO 及 PNA 指数

Fig. 11 (a) Spatial distribution of correlation coefficient between SOI and dynamically induced component of ocean evaporation anomalies. (b-f) As in (a), but for NAO, PDO, AO, AMO, and PNA indexes, respectively

太平洋蒸发量变化; 除此之外, 结合 NAO 和 PDO 相关图, AO 对蒸发量的影响在北大西洋与 NAO 类似, 而在北太平洋则与 PDO 影响基本相反 (图 11d); 从 AMO 指数相关图 (图 11e) 上, AMO 的影响范围相对更广, 显著高相关区域主要集中在赤道附近海域; PNA 与中纬北太平洋西部及赤道东太平洋蒸发量有显著正相关关系 (图 11f), 而在北美西海岸及北大西洋呈现负相关, 主要影响区域集中在北太平洋, 这与北太平洋上 PDO 的影响范围一致。结合 20 世纪 70 年代末期前后全球海洋蒸发量差值场的空间分布 (图略), 赤道附近蒸发有所减少其他海域均以增加为主, 这明显与 SOI 和 PDO 在热带太平洋和中纬度大洋影响显著相对应, 其次 90 年代末期前后则出现了北大西洋三极子型蒸发异常, 这明显与 NAO 和 AO 的影响有关。

通过以上分析说明, SOI 正位相时, 赤道东太平洋、北太平洋中部及澳大利亚东海岸蒸发偏少; NAO 会引起北大西洋上经向三极子型蒸发异常, 而这也与 AO 在大西洋上的影响范围基本一致; PDO 负位相时, 赤道东太平洋、北太平洋西部及澳大利亚东海岸蒸发偏少, 与 SOI 在太平洋上的影

响范围基本一致, 说明太平洋蒸发量变化受到 ENSO 和 PDO 的共同影响。研究结果表明单个动力因子在海洋蒸发的年代际变化上有重要影响, 特别是 ENSO、NAO 及 PDO 的影响至关重要。

6 结果与讨论

本文使用 OAFlux 资料分析了 1958~2016 年全球海洋蒸发量的时空变化特征, 并利用动力调整方法提取了全球海洋蒸发量变化的动力作用分量和辐射强迫分量, 然后重点分析了动力作用分量的前 6 个 PLS 模态, 以揭示影响海洋蒸发量变化的主要环流系统和外强迫信号。主要结论概括如下:

(1) 全球海洋蒸发量在 1958~2016 年存在明显的年代际变化, 其中在 1978 年之前整体呈现下降趋势, 之后转为明显上升趋势, 而在 2000 年左右又出现下降趋势; 海洋蒸发量的年代际变化与全球变暖联系密切。

(2) 海洋蒸发的年代际变化主要与动力作用有关。但是不同动力因子在不同时段的作用存在差别。其中 20 世纪 70 年代末期海洋蒸发的转折与

AL、PNA、PDO 和 ENSO 变化相关，而 90 年代末期转折还与 NAO 有关。

(3) 从整体上看低纬北太平洋和印度洋蒸发异常主要与 SST 及其引起的环流异常有关，南太平洋、中纬北太平洋和北大西洋蒸发异常与环流异常直接相关。具体来说，AL 与 PNA 型大气环流可以影响北太平洋中部蒸发，NAO 与北大西洋上经向三极子型蒸发异常相关，SO 与南太平洋澳大利亚至南美西海岸的纬向蒸发异常有关，而太平洋蒸发还受到 ENSO 和 PDO 的影响。ENSO 与 PDO 在全球海洋蒸发量上的影响要大于 NAO。

(4) ENSO、NAO 及 PDO 在海洋蒸发的年代际变化上有重要影响，其中 SOI 正位相时，赤道东太平洋、北太平洋中部及澳大利亚东海岸蒸发偏少；NAO 会引起北大西洋上经向三极子型蒸发异常，而这与 AO 在大西洋上的影响范围基本一致；PDO 负位相时，赤道东太平洋、北太平洋中部及澳大利亚东海岸蒸发偏少，这与 SOI 在太平洋上的影响范围基本一致。

蒸发是水分循环和状态变化过程中关键的环节，因此研究海洋蒸发过程的时空分布特征不仅能增进我们对大尺度海气相互作用过程的了解，还将为对天气气候异常的预测提供有用的科学背景。需要指出的是，本文虽然从动力作用的角度给出了海洋蒸发量年代际变化的主要原因，但是海洋蒸发量与各环流系统的相互作用机制还没有深入研究。除此之外，海洋蒸发量还受到热力因素的重要影响，这也需要下一步工作系统分析。

参考文献 (References)

曹杰, 李湘瑞, 应俊. 2012. 20 世纪 70 年代末前后北半球冬季对流层遥相关的时空演变研究 [J]. 大气科学, 36(2): 283–296. Cao Jie, Li Xiangrui, Ying Jun. 2012. Temporal and spatial evolution of teleconnection in the troposphere during the Northern Hemisphere winter at the end of the 1970s [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(2): 283–296. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11044

邓新林, 李春. 2016. 北太平洋涛动与 El Niño 的关系及其年代际变化 [J]. 中国海洋大学学报, 46(6): 42–51. Deng Xinlin, Li Chun. 2016. The relationship between North Pacific Oscillation with El Niño and its decadal variability [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 46(6): 42–51. doi:10.16441/j.cnki.hdx.20150327

Dolman A J, de Jeu R A M. 2010. Evaporation in focus [J]. Nature Geoscience, 3(5): 296. doi:10.1038/ngeo849

董啸, 薛峰, 曾庆存. 2014. 北半球冬季阿留申低压—冰岛低压相关

关系的年代际变化及其模拟 [J]. 气候与环境研究, 19(5): 523–535. Dong Xiao, Xue Feng, Zeng Qingcun. 2014. Observational analysis and numerical simulation of the decadal variation in the relationship between the Aleutian Low and the Icelandic Low during boreal winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19(5): 523–535. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13021

Du Y, Xie S P. 2008. Role of atmospheric adjustments in the tropical Indian Ocean warming during the 20th century in climate models [J]. Geophys. Res. Lett., 35(8): L08712. doi:10.1029/2008GL033631

Jimeno L, Stohl A, Trigo R M, et al. 2012. Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation [J]. Rev. Geophys., 50(4): RG4003. doi:10.1029/2012RG000389

Guan X, Huang J, Guo R, et al. 2015b. Role of radiatively forced temperature changes in enhanced semi-arid warming in the cold season over East Asia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15 (23): 13777–13786. doi:10.5194/acp-15-13777-2015

Guan X D, Huang J P, Guo R X, et al. 2015a. The role of dynamically induced variability in the recent warming trend slowdown over the Northern Hemisphere [J]. Scientific Reports, 5: 12669

Guo R X, Guan X D, He Y L, et al. 2018. Different roles of dynamic and thermodynamic effects in enhanced semi-arid warming [J]. International Journal of Climatology, 38(1): 13–22. doi:10.1002/joc.5155

韩子轩, 苏涛, 支蓉, 等. 2017. 不同太平洋年代际振荡和 ENSO 位相下大气水分收支变化对北半球冬季太平洋蒸发量的影响 [J]. 大气科学, 41(6): 1316–1331. Han Zixuan, Su Tao, Zhi Rong, et al. 2017. Effects of moisture budget changes on Pacific evaporation associated with Pacific Decadal Oscillation and ENSO in boreal winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1316–1331. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16257

Honda M, Yamane S, Nakamura H. 2005. Impacts of the Aleutian–Icelandic Low seesaw on surface climate during the twentieth century [J]. J. Climate, 18(14): 2793–2802. doi:10.1175/JCLI3419.1

江志红, 李建平, 屠其璞, 等. 2004. 20 世纪全球温度年代和年代际变化的区域特征 [J]. 大气科学, 28(4): 545–558. Jiang Zhihong, Li Jianping, Tu Qipu, et al. 2004. Regional characteristics of the decadal and interdecadal variations for global temperature field during the last century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(4): 545–558. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.04.07

Josey S A, Somot S, Tsimplis M. 2011. Impacts of atmospheric modes of variability on Mediterranean Sea surface heat exchange [J]. J. Geophys. Res., 116(C2): C02032. doi:10.1029/2010JC006685

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Kosaka Y, Xie S P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. Nature, 501(7467): 403–407. doi:10.1038/nature12534

Liu C L, Allan R P. 2018. Unrealistic increases in wind speed explain reduced eastern Pacific heat flux in reanalyses [J]. J. Climate, 31(8): 2981–2993. doi:10.1175/JCLI-D-17-0642.1

Liu W T, Katsaros K B, Businger J A. 1979. Bulk parameterization of

- air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36(9): 1722-1735. doi: 10.1175/1520-0469(1979)036<1722:BPOASE>2.0.CO;2
- Mahajan S, Saravanan R, Chang P. 2010. Free and forced variability of the tropical Atlantic Ocean: Role of the wind-evaporation-sea surface temperature feedback [J]. *J. Climate*, 23(22): 5958-5977. doi: 10.1175/2010JCLI3304.1
- Mestas-Nuñez A M, Bentamy A, Katsaros K B. 2006. Seasonal and El Niño variability in weekly satellite evaporation over the global ocean during 1996-98 [J]. *J. Climate*, 19(10): 2025-2035. doi: 10.1175/JCLI3721.1
- Pokhrel S, Rahaman H, Parekh A, et al. 2012. Evaporation-precipitation variability over Indian Ocean and its assessment in NCEP Climate Forecast System (CFSv2) [J]. *Climate Dyn.*, 39(9-10): 2585-2608. doi:10.1007/s00382-012-1542-6
- 钱诚, 符凉斌. 2006. 近 50 年阿留申低压地区凝结加热的变化 [J]. *气候与环境研究*, 11(3): 340-346. Qian Cheng, Fu Congbin. 2006. Variation of the condensation heating in the region of the Aleutian Low during the last 50 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11(3): 340-346. doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2006.03.010
- Ren X J, Yang X Q, Hu H B. 2017. Subseasonal variations of wintertime North Pacific evaporation, cold air surges, and water vapor transport [J]. *J. Climate*, 30(23): 9475-9491. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0140.1
- Richter I, Xie S P. 2008. On the origin of equatorial Atlantic biases in coupled general circulation models [J]. *Climate Dyn.*, 31(5): 587-598. doi:10.1007/s00382-008-0364-z
- Schmitt R W, Wijffels S E. 1993. The role of the oceans in the global water cycle [M]//McBean G A. *Interactions between Global Climate Subsystems: The Legacy of Hann*. Washington, D. C: American Geophysical Union, 75: 77-84. doi:10.1029/GM075p0077
- Schott F A, Xie S P, McCreary J P Jr. 2009. Indian Ocean circulation and climate variability [J]. *Rev. Geophys.*, 47(1): RG1002. doi: 10.1029/2007RG000245
- Smoliak B V, Wallace J M, Stoelinga M T, et al. 2010. Application of partial least squares regression to the diagnosis of year-to-year variations in Pacific northwest snowpack and Atlantic hurricanes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37(3): L03801. doi:10.1029/2009GL041478
- Smoliak B V, Wallace J M, Lin P, et al. 2015. Dynamical adjustment of the Northern Hemisphere surface air temperature field: Methodology and application to observations [J]. *J. Climate*, 28(4): 1613-1629. doi:10.1175/JCLI-D-14-00111.1
- 孙建奇, 王会军. 2005. 北极涛动与太平洋年代际振荡的关系 [J]. *科学通报*, 50(15): 1648-1653. Sun Jianqi, Wang Huijun. 2006. Relationship between Arctic Oscillation and Pacific Decadal Oscillation on decadal timescale [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(1): 75-79. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2005.15.017
- 孙晓娟, 王盘兴, 智海, 等. 2011. 阿留申低压四种环流指数的分析和比较 [J]. *大气科学学报*, 34(1): 74-84. Sun Xiaojuan, Wang Panxing, Zhi Hai, et al. 2011. Analysis and comparison of four kinds of circulation indices of Aleutian Low [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(1): 74-84. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.01.010
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J. Climate*, 13(5): 1000-1016. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2
- Thompson D W J, Wallace J M, Jones P D, et al. 2009. Identifying signatures of natural climate variability in time series of global-mean surface temperature: Methodology and insights [J]. *J. Climate*, 22(22): 6120-6141. doi:10.1175/2009JCLI3089.1
- Tootle G A, Singh A K, Piechota T C, et al. 2007. Long lead-time forecasting of U.S. streamflow using partial least squares regression [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(5): 442-451. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:5(442)
- van den Dool H M, Saha S, Johansson Å. 2000. Empirical orthogonal teleconnections [J]. *J. Climate*, 13(8): 1421-1435. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1421:EOT>2.0.CO;2
- Wallace J M, Fu Q, Smoliak B V, et al. 2012. Simulated versus observed patterns of warming over the extratropical Northern Hemisphere continents during the cold season [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(36): 14337-14342. doi:10.1073/pnas.1204875109
- Wu Z W, Yu L L. 2016. Seasonal prediction of the East Asian summer monsoon with a partial-least square model [J]. *Climate Dyn.*, 46(9-10): 3067-3078. doi:10.1007/s00382-015-2753-4
- 肖栋, 李建平. 2007. 全球海表温度场中主要的年代际突变及其模式 [J]. *大气科学*, 31(5): 839-854. Xiao Dong, Li Jianping. 2007. Main decadal abrupt changes and decadal modes in global sea surface temperature field [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31(5): 839-854. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.08
- 杨丹宁, 罗德海. 2014. ENSO 循环与太平洋—北美型遥相关事件的关系 [J]. *气候与环境研究*, 19(3): 278-289. Yang Danning, Luo Dehai. 2014. Relationship between Pacific-North American teleconnection events and ENSO cycle [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19(3): 278-289. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12039
- Yao S L, Luo J J, Huang G, et al. 2017. Distinct global warming rates tied to multiple ocean surface temperature changes [J]. *Nature Climate Change*, 7(7): 486-491
- Yu L S. 2007. Global variations in oceanic evaporation (1958-2005): The role of the changing wind speed [J]. *J. Climate*, 20(21): 5376-5390. doi:10.1175/2007JCLI1714.1
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. *气象学报*, 61(6): 641-654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61(6): 641-654. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.06.001
- Zveryaev I I, Hannachi A B A. 2017. Interdecadal changes in the links between Mediterranean evaporation and regional atmospheric dynamics during extended cold season [J]. *International Journal of Climatology*, 37(3): 1322-1340. doi:10.1002/joc.4779