

大西洋多年代际振荡对东亚气候影响的综述

姜大膀*、司东、缪家鹏

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要: 本文综述了近年来有关大西洋多年代际振荡 (AMO) 及其对东亚气候影响的研究进展, 主要包括 AMO 的形成机制与指数定义、AMO 对东亚夏季和冬季气候的影响、AMO 与其他大洋的协同作用。目前, 关于 AMO 的形成机制仍有不同意见, 传统观点认为 AMO 是气候系统内部过程尤其是大西洋经向翻转流造成的, 但近期有工作指出 AMO 是气溶胶、火山喷发等外强迫驱动产生或是海洋对大气随机强迫的一种响应。AMO 可以通过三种途径调制东亚夏季气候, 当 AMO 处于正位相时, 东亚夏季风加强、降水增多、气温升高, 反之亦然。同时, AMO 正位相有利于东亚冬季风偏强, 欧亚大陆中纬度及中国北方偏冷; 负位相时则大体相反。鉴于 AMO 的重要作用, 加深理解 AMO 形成机制及其对东亚气候影响有益于提升东亚气候的年代际预测水平。

关键词: 大西洋多年代际振荡; 年代际气候变化; 东亚夏季风; 东亚冬季风

文章编号: 2023311A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2307.23311

Impacts of Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) on the East Asian Climate: A Review

JIANG Dabang, SI Dong, and MIAO Jiapeng

收稿日期 2023-05-13 **网络预出版日期**

作者简介 姜大膀, 男, 1974 年出生, 研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail:
jiangdb@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42221004

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 42221004)

21 **Abstract:** We have reviewed recent researches associated with the Atlantic
22 Multidecadal Oscillation (AMO) and its influences on East Asian climate. Specifically,
23 we focus on the drivers, index definitions, impacts on East Asian summer and winter
24 climates of the AMO as well as the combined effects of the AMO and other Oceans.
25 Until now, the mechanisms of the AMO are still under debate. The AMO is considered
26 to be caused by the multidecadal Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)
27 variability, the external forcings (e.g., aerosols) or the stochastic atmospheric forcing.
28 The positive phase of the AMO can strengthen the East Asian summer monsoon and
29 increase the summer precipitation and temperature over East Asia through three ways,
30 and vice versa. Meanwhile, under the positive AMO phase, the East Asian winter
31 monsoon system is strong and the mid-latitude Eurasian continent and northern China
32 are cold, and vice versa. Given the importance of AMO, further understanding the
33 drivers of AMO and its climatic impacts on East Asian climate is conducive to
34 improving decadal to interdecadal predictions of East Asian climate.

35 **Keywords:** Atlantic Multidecadal Oscillation; Interdecadal climate change; East Asian
36 summer monsoon; East Asian winter monsoon

37 1. 引言

38 大西洋年代际振荡 (AMO) 是指北大西洋海表温度 65-70 年的准周期性冷
39 暖异常变化, 由 Kerr (2000) 最早正式定义。AMO 的成因一直是学界十分关注的
40 前沿科学问题 (Vecchi et al., 2017; Zhang et al., 2019)。目前为止, 关
41 于 AMO 的形成机制主要有三种观点: 其一, 认为大西洋经圈翻转环流 (AMOC) 变
42 化是 AMO 的主要驱动因子, 当 AMOC 偏强时 AMO 处于正位相, 反之亦然 (Delworth
43 and Mann, 2000; Latif et al., 2004); 其二, 人为强迫和火山喷发等外强迫
44 因子对 AMO 位相转变起主导作用 (Otterå et al., 2010; Booth et al., 2012;
45 Murphy et al., 2017); 其三, AMO 是海洋混合层对大气随机强迫的低频响应
46 (Clement et al., 2015; Clement et al., 2016)。本文将回顾有关 AMO 成因
47 的研究工作, 梳理不同观点下 AMO 的形成机制及其主要物理过程。

48 AMO 位相转变对全球和区域气候有重要影响。首先, AMO 被指出对全球尺度
49 海表温度年代际变率起主导作用, 且主要通过大气遥相关和大气-海洋耦合过
50 程实现 (Yang Y-M et al., 2019)。其次, AMO 对大西洋及其周边气候的多年
51 代际变化有显著影响, 包括大西洋飓风 (Trenberth and Shea, 2006)、撒哈拉
52 夏季降水 (Zhang and Delworth, 2006)、欧洲夏季气温和降水 (Sutton and
53 Dong, 2012)、北美夏季高温热浪 (Ruprich-Robert et al., 2018) 等。再者,
54 AMO 对太平洋年代际变率有重要调制作用, 两者之间的相互作用是当前国际前沿
55 课题 (Zhang and Delworth, 2007; Ruprich-Robert et al., 2017; Meehl et
56 al., 2021)。

57 东亚地处季风区, 夏季盛行偏南风, 夏季风变异常常会造成干旱、洪涝等气
58 象灾害; 冬季盛行偏北风, 偏强的冬季风会引起冰冻雨雪等灾害 (王会军和范可,
59 2013; 杨崧等, 2018)。观测表明, 20 世纪以来东亚夏季风有明显的年代际变化
60 (Wang, 2001; Yu et al., 2004; Jiang and Wang, 2005; Zhu et al., 2011)。
61 与夏季风相似, 东亚冬季风的年代际变化显著 (贺圣平和王会军, 2012; Wang and
62 Chen, 2014; 丁一汇等, 2014; Miao and Wang, 2020)。大量工作显示, AMO 作
63 为主要的年代际海表温度模态, 是东亚冬、夏季气候年代际变化的重要驱动因

子（如：李双林等，2009）。本文将回顾 AMO 对东亚气候，尤其是东亚夏季风及降水、东亚冬季风及气温的影响及相关物理过程。

2. AMO 的指数定义和形成机制

2.1 AMO 指数的定义

AMO 指数常被定义为北大西洋区域平均的海表温度距平 (Enfield et al., 2001)。为了凸显 AMO 多年代际变率的性质，AMO 指数需要去除长期趋势和高频分量。在去除长期趋势时，一些学者选择去除线性趋势（如：Enfield et al., 2001）；但是也有工作指出长期趋势是非线性的，应该去除以全球变暖为主要特征的外强迫信号（即全球平均的海表温度）（Trenberth and Shea, 2006）。根据以上两种方法得到的观测的 AMO 指数在年代至多年代尺度变化上是比较一致的，尤其是位相转折的时间点。另外，有学者将低通滤波后的北大西洋副极地海表温度标准化值与北大西洋中低纬海平面气压标准化值的差值定义为 AMO 指数（Klotzbach and Gray, 2008）。Zhang (2017) 将低通滤波并去除线性趋势的北大西洋副极地海表盐度的标准化值定义为 AMO 指数。Yan et al. (2019) 对北大西洋地区去除线性趋势的海表温度、海表盐度、上层海洋热含量和盐含量共四个变量进行多变量的经验正交函数分解 (EOF)，将第一模态时间系数定义为 AMO 指数。

另一类方法是依托模式的历史气候模拟试验，计算出 AMO 指数中的外强迫信号，再将其从观测的 AMO 指数中剔除，进而得到 AMO 指数的内部变率分量。例如，Ting et al. (2009) 采用信噪比最大化 EOF 方法，提取出多模式模拟的北大西洋海表温度的外强迫信号。Deser and Phillips (2023) 提出，全球平均海表温度序列的外强迫分量（通过模式样本集合平均获得）对观测中北大西洋海表温度各个格点的线性回归场，可以刻画出各个格点海表温度的外强迫信号。

2.2 AMO 的形成机制

AMO 形成受到多种物理过程的影响，然而具体是其中的哪种占主导学界还存在不同意见 (Vecchi et al., 2017)。传统观点认为，AMO 是由气候系统内部过程尤其是 AMOC 主导的多年代际尺度的海洋模态 (Delworth et al., 1993；

90 Delworth and Mann, 2000; Latif et al., 2004; Knight et al., 2005)。

91 AMOC 能改变北大西洋近表层暖水的北进和深层补偿流所携带冷水的南移, 引起

92 北大西洋海表温度变化。当 AMOC 偏强时, 海洋表层向北输送到北大西洋的热量

93 增多, 使得北大西洋海表温度偏高; 当 AMOC 偏弱时, 北大西洋海表温度则偏低。

94 大西洋海表温度多年代际尺度振荡信号的发现可以追溯到 20 世纪 60 年代,

95 Bjerknes (1964) 基于北大西洋观测数据推断其与 AMOC 的低频变率有关, 并指

96 出这种多年代际尺度的振荡机制与年际尺度的明显不同。后续大量的观测和模拟

97 研究证实了 Bjerknes (1964) 的猜想 (Folland et al., 1986; Delworth et al.,

98 1993; Schlesinger and Ramankutty, 1994; Delworth and Mann, 2000; Latif

99 et al., 2004; Knight et al., 2005)。例如, 在不考虑外强迫的情况下, 海

100 气耦合模式仍然能模拟出 AMOC 驱动的北大西洋海表温度多年代际变化

101 (Delworth and Mann, 2000); 依据 AMOC 可以较好预测出北大西洋海表温度的

102 变化 (Yeager et al., 2012)。

103 第二种观点认为, AMO 演变尤其是近现代的变化是由外强迫的驱动产生的

104 (Evan et al., 2009; Booth et al., 2012; Dunstone et al., 2013; Murphy

105 et al., 2017; Bellomo et al., 2018)。HadGEM2-ES 模式的模拟试验显示,

106 加入气溶胶的间接效应后, 它能模拟出观测的 AMO 变化, 人为和火山气溶胶强迫

107 可以解释 1860 - 2005 年北大西洋海表温度多年代际变率的 76% (Booth et al.,

108 2012)。其中, 火山气溶胶经由两种途径驱动 AMO, 一是通过直接辐射效应影响

109 北大西洋海表温度, 二是通过间接效应调制北大西洋涛动和 AMOC 进而改变北大

110 西洋海表温度 (Otterå et al., 2010)。CESM 模式的模拟试验表明, 人为气溶

111 胶和温室气体强迫是 20 世纪 AMO 演变的主要驱动力 (Bellomo et al., 2018)。

112 亦有学者提出, 近现代 AMO 变化同时受到气候系统内部变率和外强迫的影响 (Si

113 and Hu, 2017; Qin et al., 2020), 然而目前很难量化两者的相对作用 (Vecchi

114 et al., 2017)。

115 第三种观点认为, AMO 是北大西洋海表温度对大气随机强迫的响应

116 (Hasselmann, 1976; Clement et al., 2015)。数值试验显示, 平板海洋模式

117 (模式中海洋只有混合层深度, 不考虑海洋动力过程) 模拟得到的 AMO 分布型与

观测的非常相似,因此认为 AMO 源自大气随机强迫而不是海洋动力过程(Clement et al., 2015)。

3. AMO 对北半球和东亚气候的影响

AMO 位相转变会引起北半球多个地区气候的显著变化,例如:北半球季风(Liu and Chiang, 2012; Monerie et al., 2019)、非洲气候(Liu and Chiang, 2012; Zhang and Delworth, 2006)、欧洲和北美的气候(Sutton and Hodson, 2005; Sutton and Dong, 2012)。首先,AMO 正位相会加强北非和印度季风、减弱南美季风,当 AMO 处于负位相时则大体相反(Monerie et al., 2019)。同时,正位相的 AMO 有利于亚非季风增强,负位相则会使得亚非季风减弱(Liu and Chiang, 2012; Li et al., 2017)。AMO 和南亚夏季风在多年代际尺度上同位相变化(Zhang and Delworth, 2006),AMO 影响南亚夏季风的途径包括:热带与热带外大气相互作用(Goswami et al., 2006)、Rossby 波列(Luo et al., 2011)和海气相互作用(Luo et al., 2018)。在非洲,AMO 对 20 世纪撒哈拉降水的多年代际变化起重要作用,AMO 正位相能够增加该地区夏季降水(Zhang and Delworth, 2006)。在欧洲和北美,20 世纪 60 年代北大西洋的冷却(AMO 负位相)造成西欧和北美干冷的气候(Sutton and Hodson, 2005),1990 年代之后 AMO 转为正位相,使得欧洲出现暖湿的气候(Sutton and Dong, 2012)。AMO 位相转变还与欧洲夏季的高温热浪以及北美的干旱密切相关(McCabe et al., 2004; Zhou and Wu, 2016)。事实上,AMO 对东亚气候年代际变化亦有显著影响,以下做详细阐述。

3.1 AMO 对东亚夏季气候影响

AMO 可以经由以下几种途径影响东亚夏季风。一是通过热带西太平洋—印度洋的海气反馈机制。海气耦合模拟试验表明,AMO 正位相会引起热带西太平洋和海洋性大陆暖异常,使得局地降水增多。进一步,热带西太平洋和海洋性大陆对流活动和大气加热会激发西北太平洋对流层低层反气旋式环流异常,造成西太平洋副热带高压西伸,增强东亚夏季风和东亚夏季降水(Lu et al., 2006)。相反,大西洋温盐环流减弱会冷却北大西洋的海表温度,进而经由海气反馈机制减

弱东亚夏季风 (Lu and Dong, 2008)。另外, AMO正位相会增强沃克环流, 使得热带西北太平洋对流活动增强, 然后通过经向的东亚—太平洋型 (EAP)/太平洋—日本型 (PJ) 波列增强东亚夏季风 (Jin and Huo, 2018; Monerie et al., 2021)。

二是改变欧亚对流层的大气温度。AMO正位相会引起欧亚大陆对流层温度升高, 从而加大亚洲大陆与周边大洋之间的海陆热力差异, 使得东亚夏季风加强、东亚夏季降水增多 (Goswami et al., 2006; Wang et al., 2009)。经由这一途径, AMO还可以影响印度夏季风, 具体表现为在AMO正位相时, 青藏高原温度升高、热源加强, 青藏高原与热带印度洋之间温度梯度增大, 导致印度夏季风增强 (Feng and Hu, 2008)。

三是调制中高纬度大气波列的传播。在年际尺度上, 当北大西洋海表温度偏高时, 会影响欧亚型波列或激发从北大西洋向下游传播的Rossby波列, 使得东亚夏季风增强、降水增多 (杨修群等, 1992; 曲金华等, 2006; Monerie et al., 2021)。在年代际尺度上, 北大西洋海表温度与东亚夏季风的关系依然成立, AMO正位相能激发由北大西洋向下游传播的Rossby波列, 使得东亚北部出现异常低压、东亚南部为异常高压, 加强了东亚地区低层偏南风 and 向北的水汽输送, 加强东亚夏季风 (图1a, Si and Ding, 2016; Si et al., 2023)。事实上, 受该Rossby波列影响, AMO不但调制东亚降水, 还可以影响从北大西洋、欧亚直至北美的降水的年代际变化。例如, 凭借该遥相关型, AMO可以显著影响欧洲气候 (Qasmi et al., 2021)。1960–1980年期间, 负位相的AMO使得欧洲北部夏季降水减少而在南部增加 (Sutton and Hodson, 2005)。同时, 理想化的北大西洋海表温度模拟试验显示, AMO激发的该遥相关型可以显著影响欧洲的高温热浪 (Qasmi et al., 2021) 以及欧亚大陆北部夏季的水分循环 (Nicolì et al., 2020)。此外, 该波列被认为是Rossby波沿着副热带西风急流向下游传播而形成的, 波源位于北大西洋, 与AMO变化所引起的北大西洋海表温度异常显著相关, 非绝热加热和瞬变涡度强迫是维持该波列的主要机制 (Zuo et al., 2013; Monerie et al., 2018)。

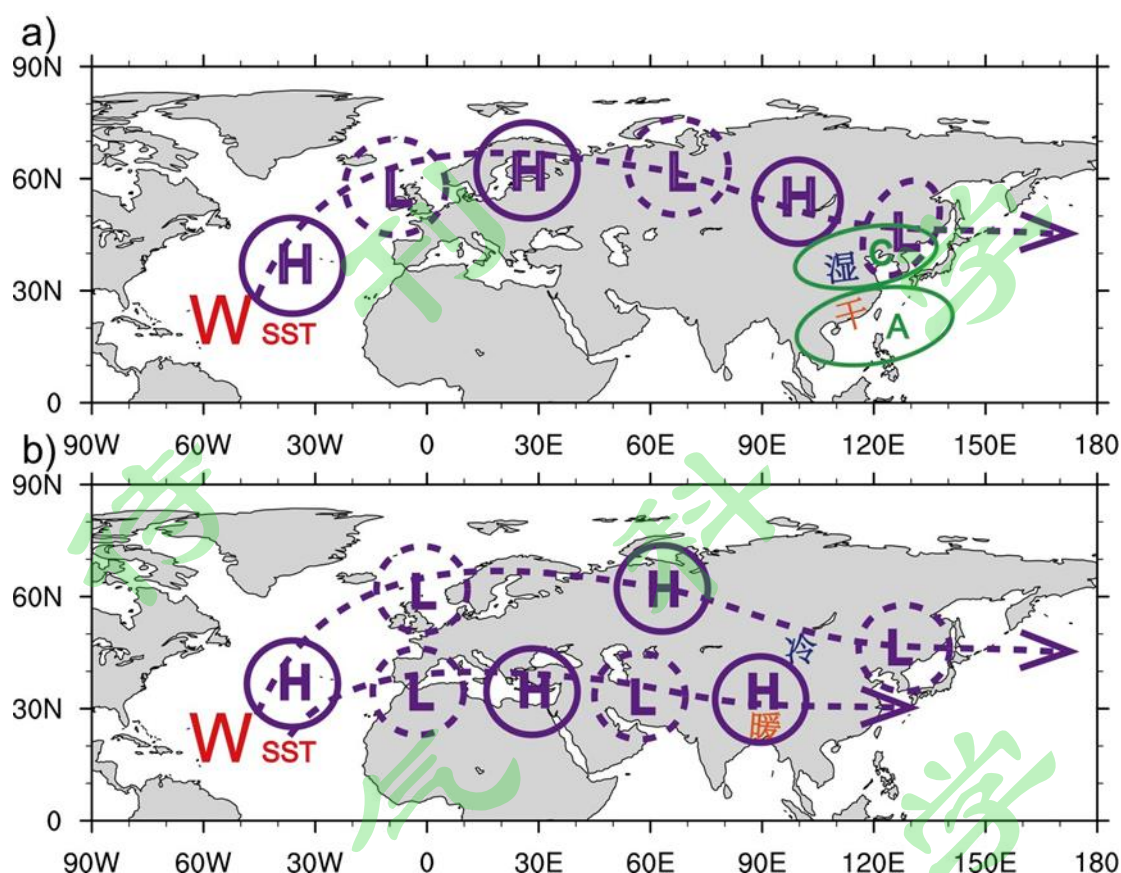


图1 AMO影响东亚夏季(a)和冬季(b)气候年代际变化的机制示意图。红色字符Wsst代表暖海温, 字符A和C分别代表异常反气旋和气旋式环流, 字符H和L分别代表异常高压和低压, 箭头代表波列传播的方向。

Figure 1 Schematic diagram of the synergistic impacts of the AMO and PDO on the interdecadal variability of summer (a) and winter (b) climate over East Asia. The red letters Wsst indicate warm sea surface temperatures (SSTs). The green letters A and C denote anomalous anticyclone and cyclone, respectively. The purple letters H and L denote anomalous high and low geopotential heights, respectively. The dashed curve with an arrow denotes the propagation direction of the teleconnection wave train.

北大西洋海表温度异常还能影响江淮梅雨(徐海明等, 2001)。当前期冬季北大西洋海表温度偏高时, 北大西洋涛动偏强, 东亚大槽偏弱, 江淮流域入梅早; 反之, 当前期冬季北大西洋海表温度偏低时, 江淮流域入梅晚(徐海明等, 2001)。

再者, AMO位相变化与中国西北气候密切相关, AMO在20世纪90年代之后进入正位相, 导致东亚西风减弱、亚洲季风增强, 使得印度洋和西太平洋水汽向北输送增多, 有利于西北变湿 (Guo et al., 2022)。AMO变化还与青藏高原上空的夏季水汽输送的年代际变化密切相关, 在AMO正位相时, 其激发的东传Rossby波列引起贝加尔湖附近出现反气旋式环流异常, 使得青藏高原水汽增加 (Gao et al., 2013; Zhou et al., 2019; Sun et al., 2020)。同时, AMO能显著调制青藏高原大气热源的年代际变化, AMO正位相时会通过激发Rossby波列的下游传播, 增强青藏高原上空的斜压性和亚洲夏季风气流, 高原潜热加热相应增大, 青藏高原大气热源加强 (Yu et al., 2023)。

AMO 不但对东亚夏季的季风和降水有重要作用, 亦能显著影响气温。当 AMO 正位相时, 中国大部分地区气温偏高, 而且这种对应关系在一年四季都存在 (Wang et al., 2009)。偏暖的北大西洋海表温度会激发东传的 Rossby 波列, 引起中国北方出现正位势高度和反气旋环流异常, 下沉运动加强, 造成中国北方夏季变暖 (Ding et al., 2020; Jiang et al., 2020)。经由该波列, AMO 还可以影响中国极端高温, AMO 正位相时有利于中国北方极端高温以及高温热浪频率增加 (Zhou and Wu, 2016; Gao et al., 2019)。20 世纪 90 年代之后, AMO 由负位相转为正位相, 使得东亚北部的增暖幅度加大 (Jin et al., 2013; Sun et al., 2019; Zhang et al., 2020; Hu et al., 2021)。

3.2 AMO 与其他大洋对东亚夏季气候的协同影响

北大西洋和北太平洋海表温度年代际模态作为全球海洋最强的两个年代际信号, 是东亚气候年代际变化的重要原因。当AMO和太平洋年代际振荡 (PDO) 处于反位相时, 两者的作用一致、相互叠加, 导致显著偏强或偏弱的东亚夏季风 (图 2); 相反, 当AMO和PDO处于同位相时, 两者的作用相反、相互抵消, 对应略微偏强或者偏弱的东亚夏季风 (Si et al., 2021)。AMO和PDO协同作用亦是造成东亚夏季风30~40年周期的主要原因 (丁一汇等, 2018)。此外, PDO和AMO是引起东亚夏季降水年代际变化的关键海洋因子, 其中东亚夏季降水年代际变化的第一模态与PDO有关, 第二模态则与AMO有关, PDO和AMO会调制东亚地区经向和纬向

213 大气遥相关波列，进而影响东亚夏季降水的年代际变化 (Si and Ding, 2016)。

214 除了夏季风和降水，AMO与PDO协同作用还可以影响东亚急流的位置，20世纪90年

215 代后，正位相的AMO和负位相的PDO增强了东亚经向温度梯度和斜压增长率，造成

216 东亚温带急流南移和副热带急流北移 (Huang et al., 2019)。需要指出的是，

217 AMO和PDO之间亦有显著联系 (Mcgregor et al., 2014; Ruprich-Robert et al.,

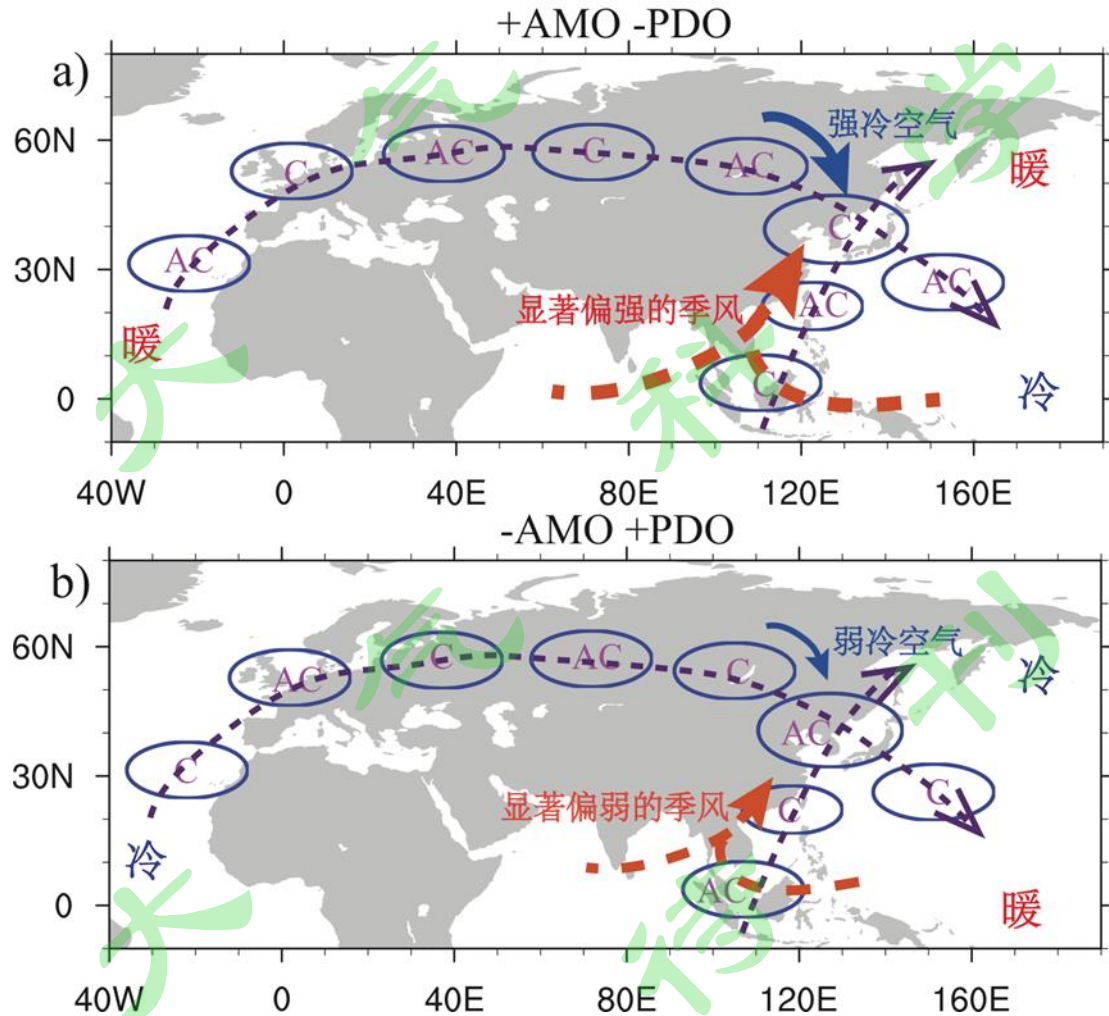
218 2017; Cai et al., 2019; Meehl et al., 2021)。数值模拟试验显示，AMO正

219 (负) 位相会引起热带太平洋海表温度的负 (正) 异常，即PDO负 (正) 位相，

220 而PDO正 (负) 位相则会导致热带大西洋海表温度的正 (负) 异常，即AMO正 (负)

221 位相，沃克环流在其中起重要桥梁作用 (Meehl et al., 2021)。

222



223

224 图2 AMO和PDO协同影响东亚夏季气候的机制示意图。a) AMO正位相而PDO负位相

225 的影响；b) AMO负位相而PDO正位相的影响。字符AC和C分别代表异常反气旋和气

226 旋环流，蓝色和红色箭头分别代表冷空气和季风气流，紫色箭头代表波列传播的
227 方向。

228 Figure 2 Schematic diagram of the synergistic impacts of the AMO and
229 PDO on the summer climate over East Asia, a) positive phase AMO and
230 negative phase PDO; b) negative phase AMO and positive phase PDO. The
231 letters AC and C indicate anomalous anticyclone and cyclone,
232 respectively. The blue curves with arrows denote the cold flow. The
233 red curves with arrows indicate the monsoon flow. The purple curves
234 with an arrow denote the propagation direction of the teleconnection
235 wave train.

236 东亚夏季气候亦受到北大西洋和印度洋的协同影响。例如，北大西洋海表温
237 度两类三极子模态（南模态和北模态）与印度洋海盆一致模态（IOBM）的不同位
238 相组合下，中国长江流域的极端降水日数明显不同（Zhu et al., 2023）。正位
239 相的北大西洋海表温度三极子南模态激发的Rossby波列会引起东北亚异常气旋
240 环流，正位相的IOBM激发的Kelvin波列会增强西北太平洋反气旋，气旋输送的干
241 冷空气与反气旋输送的暖湿空气在长江流域辐合导致极端降水日数增加。热带北
242 大西洋和印度洋同时增暖会激发东传的大气Kelvin波，使得孟加拉湾出现反气旋
243 式环流异常，增加青藏高原上空的夏季降水（Zhang et al., 2022）。大西洋、
244 太平洋和印度洋对东亚夏季降水年代际变化存在协同影响，AMO、PDO以及IOBM的
245 不同位相组合可以影响东亚对流层高层Rossby波列以及对流层低层Kelvin波的
246 传播，进而改变东北亚和西北太平洋的大气环流，最终导致东亚夏季降水的年代
247 际变化（Zhang et al., 2018）。

248 AMO对太平洋海表温度与东亚夏季气候的关系亦有重要影响。例如，AMO会改
249 变PDO与中国华北降水年代际变化的联系，当AMO与PDO反位相时，AMO正位相（负
250 位相）激发的东传的Rossby波列会增强PDO负位相（正位相），使得北太平洋北
251 部出现反气旋（气旋）式环流异常，因此PDO与华北降水的联系会加强；反之，
252 当AMO与PDO同位相时，二者间的关系会减弱（Yang Q et al., 2019）。厄尔尼

诺一南方涛动 (ENSO) 对南海夏季风的影响会受到AMO的调制, 当AMO处于负位相时, 太平洋温跃层变浅, 海气相互作用增强, ENSO强度加大, 对南海夏季风强度造成显著影响; 当AMO处于正位相时, ENSO对南海夏季风的影响较弱 (Fan et al., 2018)。

3.3 AMO 对东亚冬季气候影响

观测表明, AMO正位相时, 东亚冬季风系统成员 (西伯利亚高压、东亚沿岸低层北风、东亚大槽和东亚急流) 显著增强, 反之亦然 (Geng et al., 2017; Miao and Jiang, 2021)。当AMO正位相时, 欧亚大陆中纬度气温降低, 中国北方偏冷且暴雪增多 (Luo et al., 2017; Jin et al., 2020; Miao and Jiang, 2021; Zhou et al., 2021)。在机制上, AMO位相转变会激发一支从北大西洋副热带区域传播至东北亚的Rossby波列, 其包含四个交替出现的正负异常中心, 分别位于撒哈拉以西、地中海、乌拉尔山北部和东北亚。当AMO处于正位相时, 东北亚有位势高度负异常和气旋式环流异常, 有利于加强东亚冬季风并引导高纬度冷空气南下; AMO冷位相则大体相反 (图1b, Miao and Jiang, 2021, 2022)。评估显示, 气候模式可以再现观测中AMO位相转变所激发的大气遥相关波列, 但模拟的波列位置比观测的偏北 (Zhou et al., 2021)。观测和模拟表明, AMO正位相 (负位相) 时中国40°N以南大部分地区气温升高 (降低), 并且这与一支从非洲西北海岸东传至东亚的Rossby波列密切相关 (Li and Bates, 2007; Wang et al., 2009; Zhou et al., 2015; Han et al., 2016; Sun et al., 2017)。AMO正位相时, 该波列引起中国南方出现位势高度正异常, 造成该地区气温上升; AMO冷位相则与之大体相反 (Sun et al., 2017)。

ENSO对东亚冬季风年际变化的影响一直受到学界关注, 早期工作显示ENSO正位相有利于东亚冬季风减弱, 负位相则会使之加强 (如: Zhang et al., 1996; Wang et al., 2000)。然而, 一些学者指出ENSO与东亚冬季风之间的联系存在年代际变化, 在1900 - 1926年和1952 - 1976年期间显著负相关, 在1927 - 1951年和1977 - 1998年期间则关系不显著, 而AMO和PDO对这种年代际变化起重要作用 (Zhou et al., 2007; Wang et al., 2008; Wang and He, 2012; He and Wang, 2013; Geng et al., 2017; Chen et al., 2018)。首先, PDO正位相 (负位相)

时, ENSO与东亚冬季风关系不显著(显著), PDO通过改变低纬度太平洋—东亚遥相关和中纬度西北太平洋位势高度对ENSO的响应起调制作用(Wang et al., 2008; Kim et al., 2014; Shi, 2021)。其次, ENSO冷事件(拉尼娜)与东亚冬季风的关系在AMO正位相时稳定,在AMO冷位相时不稳定; ENSO暖事件(厄尔尼诺)与东亚冬季风的关系则与AMO位相无关(Geng et al., 2017; Geng et al., 2018)。在机制上,一方面,当拉尼娜与AMO正位相同时发生,西北太平洋海表温度暖异常的幅度和范围增大,进而加强西北太平洋气旋式环流异常和东亚冬季风;当拉尼娜与AMO冷位相同时发生,暖海表温度和气旋式环流异常幅度变弱,对东亚冬季风的影响减小(Geng et al., 2017)。另一方面,AMO正位相会激发横跨欧亚中高纬度的Rossby波列,引起西伯利亚高压和东亚冬季风增强,与拉尼娜的影响一致;AMO冷位相则会导致西伯利亚高压和东亚冬季风减弱,与拉尼娜的作用相反(Geng et al., 2017)。

4. 结论

本文回顾了近年来关于AMO对东亚气候影响的研究工作。主要结论如下:

(1)AMO指数通常被定义为去除趋势后的北大西洋区域平均的海表温度距平。在去除趋势时一般有三种做法:一是去掉线性趋势,二是去除以全球变暖为主要特征的外强迫信号(即全球平均海表温度),三是去除多模式集合平均的北大西洋海表温度。

(2)AMO的形成机制目前还存在不同意见。传统的观点认为AMO是受气候系统内部过程尤其是AMOC所主导的多年代际尺度的海洋模态,第二种观点认为AMO的演变受到外强迫的驱动,第三种观点认为AMO是北大西洋海表温度对大气随机强迫的响应。

(3)AMO经由三种途径影响东亚夏季气候。首先,AMO正位相会引起热带西太平洋和海洋性大陆降水增多、对流活动增强,进而激发西北太平洋反气旋式环流异常,导致西太平洋副热带高压西伸、东亚夏季风增强;其次,AMO正位相时,欧亚大陆对流层温度升高,亚洲与周边大洋的热力差异增大,使得东亚夏季风加强;再者,AMO正位相会激发由北大西洋向下游传播的Rossby波列,引起东亚北

部（南部）异常低压（高压），导致东亚低层出现偏南风和向北的水汽输送，进而加强东亚夏季风。另外，AMO与太平洋和印度洋协同作用可以显著影响东亚气候的年代际变化以及东亚极端降水。

（4）AMO可以通过激发两支波列调制东亚冬季气候。一方面，AMO位相转变会激发一支从北大西洋途径乌拉尔山北部传至东北亚的波列，AMO正位相时东北亚呈现位势高度负异常，东亚冬季风系统成员显著增强，欧亚大陆中纬度和中国北方气温降低；反之亦然。另一方面，AMO会产生一支从非洲西北海岸东传至东亚的波列，AMO正位相时东亚呈现位势高度正异常，导致中国40°N以南大部分地区偏暖；AMO负位相则大体相反。

综上所述，AMO的形成机制复杂，其位相转变对东亚气候年代际变化有显著影响。今后，以下几方面的工作值得重视：（1）加深对AMOC等关键气候内部变率和气溶胶等外强迫的气候效应的理解，提升模式对其的模拟能力，进而量化各因子对AMO形成的相对作用；（2）探究AMO位相转变对东亚极端气候年代际变化的影响及机理，明确其与AMO调制东亚平均气候年代际变化的过程的异同；（3）当前气候模式对AMO的年代际预测有一定的能力，但对东亚气候的年代际预测水平较低，需要评估是否可以通过动力与统计相结合的方法提升东亚气候年代际预测水平；（4）在未来增暖背景下，AMO及其与东亚气候的联系是否会改变需要关注；与此有关，剖析过去暖期AMO及其影响如何变化对未来气候预估亦有重要参考价值。

参考文献：

- Bellomo K, Murphy L N, Cane M A, et al. 2018. Historical forcings as main drivers of the Atlantic multidecadal variability in the CESM large ensemble [J]. *Climate Dyn.*, 50(9–10): 3687–3698. doi:10.1007/s00382-017-3834-3
- Bjerknes J. 1964. Atlantic air–sea interaction [M]. *Advances in Geophysics*. New York, USA: Academic Press, 1–82pp.
- Booth B B B, Dunstone N J, Halloran P R, et al. 2012. Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability [J]. *Nature*, 484(7393): 228–232. doi:10.1038/nature10946

- 336 Cai W, Wu L, Lengaigne M, et al. 2019. Pantropical climate interactions [J]. *Science*,
337 363(6430): eaav4236. doi:10.1126/science.aav4236
- 338 Chen X, Li C Y, Li X, et al. 2018. The northern and southern modes of East Asian
339 winter monsoon and their relationships with El Niño-Southern Oscillation [J]. *Int.*
340 *J. Climatol.*, 38(12): 4509–4517. doi:10.1002/joc.5683
- 341 Clement A, Bellomo K, Murphy L N, et al. 2015. The Atlantic Multidecadal Oscillation
342 without a role for ocean circulation [J]. *Science*, 350(6258): 320–324.
343 doi:10.1126/science.aab3980
- 344 Clement A, Cane M A, Murphy L N, et al. 2016. Response to comment on “The Atlantic
345 Multidecadal Oscillation without a role for ocean circulation” [J]. *Science*,
346 352(6293): 1527–1527. doi:10.1126/science.aaf2575
- 347 Delworth T L, Mann M E. 2000. Observed and simulated multidecadal variability in
348 the Northern Hemisphere [J]. *Climate Dyn.*, 16(9): 661–676. doi:
349 10.1007/s00382000007
- 350 Delworth T L, Manabe S, Stouffer R J. 1993. Interdecadal variations of the
351 thermohaline circulation in a coupled ocean–atmosphere model [J]. *J. Climate*,
352 6(11): 1993–2011. doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1993:IVOTTC>2.0.CO;2
- 353 Deser C, Phillips A S. 2023. Spurious Indo-Pacific connections to internal Atlantic
354 multidecadal variability introduced by the global temperature residual method [J].
355 *Geophys. Res. Lett.*, 50(3): e2022GL100574. doi:10.1029/2022GL100574
- 356 Ding T, Yuan Y, Gao H, et al. 2020. Impact of the North Atlantic sea surface
357 temperature on the summer high temperature in northern China [J]. *Int. J.*
358 *Climatol.*, 40(4): 2296–2309. doi:10.1002/joc.6333
- 359 Dunstone N, Smith D, Booth B, et al. 2013. Anthropogenic aerosol forcing of Atlantic
360 tropical storms [J]. *Nat. Geosci.*, 6(7): 534–539. doi: 10.1038/ngeo1854
- 361 Enfield D B, Mestas-Nuñez A M, Trimble P J. 2001. The Atlantic Multidecadal
362 Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S [J].
363 *Geophys. Res. Lett.*, 28(10): 2077–2080. doi:10.1029/2000GL012745

- 364 Evan A T, Vimont D J, Heidinger A K, et al. 2009. The role of aerosols in the evolution
365 of tropical North Atlantic Ocean temperature anomalies [J]. *Science*, 324(5928):
366 778–781. doi:10.1126/science.1167404
- 367 Fan Y, Fan K, Xu Z Q, et. al. 2018. ENSO–South China Sea summer monsoon
368 interaction modulated by the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *J. Climate*,
369 31(8): 3061–3076. doi:10.1175/JCLI-D-17-0448.1
- 370 Feng S, Hu Q. 2008. How the North Atlantic Multidecadal Oscillation may have
371 influenced the Indian summer monsoon during the past two millennia? [J].
372 *Geophys. Res. Lett.*, 35(1): L05804. doi:10.1029/2007GL032484
- 373 Folland C K, Palmer T N, Parker D E. 1986. Sahel rainfall and worldwide sea
374 temperatures, 1901–85 [J]. *Nature*, 320(6063): 602–607. doi:10.1038/320602a0
- 375 Gao M N, Yang J, Gong D, et al. 2019. Footprints of Atlantic Multidecadal Oscillation
376 in the low-frequency variation of extreme high temperature in the Northern
377 Hemisphere [J]. *J. Climate*, 32(3): 791–802. doi:10.1175/JCLI-D-18-0446.1
- 378 Gao Y, Wang H J, Li S L. 2013. Influences of the Atlantic Ocean on the summer
379 precipitation of the southeastern Tibetan Plateau [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*,
380 118(9): 3534–3544. doi:10.1002/jgrd.50290
- 381 Geng X, Zhang W, Jin F, et al. 2018. A new method for interpreting nonstationary
382 running correlations and its application to the ENSO–EAWM relationship [J].
383 *Geophys. Res. Lett.*, 45(1): 327–334. doi:10.1002/2017GL076564
- 384 Geng X, Zhang W, Stuecker M F, et al. 2017. Decadal modulation of the ENSO–East
385 Asian winter monsoon relationship by the Atlantic Multidecadal Oscillation [J].
386 *Climate Dyn.*, 49(7): 2531–2544. doi:10.1007/s00382-016-3465-0
- 387 Goswami B N, Madhusoodanan M S, Neema C P, et al. 2006. A physical mechanism
388 for North Atlantic SST influence on the Indian summer monsoon [J]. *Geophys.*
389 *Res. Lett.*, 33(2): L02706. doi:10.1029/2005gl024803

390 Guo S Y, Guan X D, Gao L L, et al. 2022. Opposite Atlantic Multidecadal Oscillation
 391 effects on dry/wet changes over Central and East Asian drylands [J]. *Atmos. Res.*,
 392 271: 106102. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106102
 393 Han Z, Luo F, Li S, et al. 2016. Simulation by CMIP5 models of the Atlantic
 394 Multidecadal Oscillation and its climate impacts [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(12):
 395 1329–1342. doi:10.1007/s00376-016-5270-4
 396 Hasselmann K. 1976. Stochastic climate models Part I. Theory [J]. *Tellus*, 28(6):
 397 473–485. doi:10.3402/tellusa.v28i6.11316
 398 He S P, Wang H J. 2013. Oscillating relationship between the East Asian winter
 399 monsoon and ENSO [J]. *J. Climate*, 26(24): 9819–9838. doi:10.1175/Jcli-D-13-
 400 00174.1
 401 Hu Y P, Zhou B T, Han T T, et al. 2021. Out-of-phase decadal change in drought over
 402 Northeast China between early spring and late summer around 2000 and its linkage
 403 to the Atlantic sea surface temperature [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 126(9):
 404 e2020JD034048. doi:10.1029/2020JD034048
 405 Huang D Q, Dai A G, Yang B, et al. 2019. Contributions of different combinations of
 406 the IPO and AMO to recent changes in winter East Asian jets [J]. *J. Climate*, 32(5):
 407 1607–1626. doi:10.1175/JCLI-D-18-0218.1
 408 Jiang D B, Si D, Lang X M. 2020. Evaluation of East Asian summer climate prediction
 409 from the CESM large-ensemble initialized decadal prediction project [J]. *J.*
 410 *Meteor. Res.*, 34(2): 252–263. doi:10.1007/s13351-020-9151-5
 411 Jiang D B, Wang H J. 2005. Natural interdecadal weakening of East Asian summer
 412 monsoon in the late 20th century [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 50(17): 1923–1929.
 413 doi:10.1360/982005-36
 414 Jin C, Wang B, Yang Y-M, et al. 2020. “Warm Arctic–cold Siberia” as an internal mode
 415 instigated by North Atlantic warming [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47(9):
 416 e2019GL086248. doi:10.1029/2019GL086248

- 417 Jin D C, Guan Z Y, Tang W Y. 2013. The extreme drought event during winter–spring
418 of 2011 in East China: Combined influence of teleconnection in mid-high latitudes
419 and thermal forcing in maritime continent region [J]. *J. Climate*, 26(20):
420 8210–8222. doi:10.1175/JCLI-D-12-00652.1
- 421 Jin D C, Huo L W. 2018. Influence of tropical Atlantic sea surface temperature
422 anomalies on the East Asian summer monsoon [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*,
423 144(714): 1490–1500. doi:10.1002/qj.3296
- 424 Kerr R A. 2000. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries [J]. *Science*,
425 288(5473): 1984–1985. doi:10.1126/science.288.5473.1984
- 426 Kim J W, Yeh S W, Chang E C. 2014. Combined effect of El Nino-Southern Oscillation
427 and Pacific Decadal Oscillation on the East Asian winter monsoon [J]. *Climate*
428 *Dyn.*, 42(3–4): 957–971. doi:10.1007/s00382-013-1730-z
- 429 Klotzbach P J, Gray W M. 2008. Multidecadal variability in North Atlantic tropical
430 cyclone activity [J]. *J. Climate*, 21(15): 3929–3935. doi:10.1175/2008JCLI2162.1
- 431 Knight J R, Allan R J, Folland C K, et al. 2005. A signature of persistent natural
432 thermohaline circulation cycles in observed climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*,
433 32(20): L20708. doi:10.1029/2005GL024233
- 434 Latif M, Roeckner E, Botzet M, et al. 2004. Reconstructing, monitoring, and predicting
435 multidecadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea
436 surface temperature [J]. *J. Climate*, 17(7): 1605–1614. doi:10.1175/1520-
437 0442(2004)017<1605:RMAPMC>2.0.CO;2
- 438 Li S, Bates G T. 2007. Influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the winter
439 climate of East China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24(1): 126–135. doi:10.1007/s00376-
440 007-0126-6
- 441 Li Y, Ding Y H, Li W J. 2017. Interdecadal variability of the Afro–Asian summer
442 monsoon system [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 34: 833–846. doi:10.1007/s00376-017-
443 6247-7

- 444 Liu Y, Chiang J C H. 2012. Coordinated abrupt weakening of the Eurasian and North
445 African monsoons in the 1960s and links to extratropical North Atlantic cooling
446 [J]. *J. Climate*, 25(10): 3532–3548. doi:10.1175/JCLI-D-11-00219.1
- 447 Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on
448 the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(24): L24701.
449 doi:10.1029/2006GL027655
- 450 Lu R Y, Dong B W 2008. Response of the Asian summer monsoon to weakening of
451 Atlantic thermohaline circulation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25(5): 723–736.
452 doi:10.1007/s00376-008-0723-z
- 453 Luo D, Chen Y, Dai A, et al. 2017. Winter Eurasian cooling linked with the Atlantic
454 Multidecadal Oscillation [J]. *Environ. Res. Lett.*, 12(12): 125002.
455 doi:10.1088/1748-9326/aa8de8
- 456 Luo F, Li S L, Furevik T. 2011. The connection between the Atlantic Multidecadal
457 Oscillation and the Indian summer monsoon in Bergen Climate Model version 2.0
458 [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 116(D19): D19117. doi:10.1029/2011jd015848
- 459 Luo F, Li S L, Gao Y Q, et al. 2018. The connection between the Atlantic Multidecadal
460 Oscillation and the Indian summer monsoon in CMIP5 models [J]. *Climate Dyn.*,
461 51(7–8): 3023–3039. doi:10.1007/s00382-017-4062-6
- 462 McCabe G J, Palecki M A, Betancourt J L. 2004. Pacific and Atlantic Ocean influences
463 on multidecadal drought frequency in the United States [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*
464 *USA*, 101(12): 4136–4141. doi:10.1073/pnas.0306738101
- 465 McGregor S, Timmermann A, Stuecker M F, et al. 2014. Recent Walker circulation
466 strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming [J]. *Nature*
467 *Climate Change*, 4(10): 888–892. doi:10.1038/NCLIMATE2330
- 468 Meehl G A, Hu A X, Castruccio F, et al. 2021. Atlantic and Pacific tropics connected
469 by mutually interactive decadal-timescale processes [J]. *Nat. Geosci.*, 14(1):
470 36–42. doi:10.1038/s41561-020-00669-x

471 Miao J P, Wang T. 2020. Decadal variations of the East Asian winter monsoon in recent
472 decades [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 21(4): e960. doi:10.1002/asl.960

473 Miao J P, Jiang D B. 2021. Multidecadal variations in the East Asian winter monsoon
474 and their relationship with the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1850 [J]. *J.*
475 *Climate*, 34(18): 7525–7539. doi:10.1175/jcli-d-21-0073.1

476 Miao J P, Jiang D B. 2022. Multidecadal variations in East Asian winter temperature
477 since 1880: Internal variability versus external forcing [J]. *Geophys. Res. Lett.*,
478 49(20): e2022GL099597. doi:10.1029/2022GL099597

479 Monerie P-A, Robson J, Dong B, et al. 2018. A role of the Atlantic Ocean in predicting
480 summer surface air temperature over North East Asia? [J]. *Climate Dyn.*, 51(1–2):
481 473–491. doi:10.1007/s00382-017-3935-z

482 Monerie P-A, Robson J, Dong B, et al. 2019. Effect of the Atlantic multidecadal
483 variability on the global monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 46(1): 1765–1775.
484 doi:10.1029/2018GL080903

485 Monerie P-A, Robson J, Dong B, et al. 2021. Role of the Atlantic multidecadal
486 variability in modulating East Asian climate [J]. *Climate Dyn.*, 56(1–2): 381–398.
487 doi:10.1007/s00382-020-05477-y

488 Murphy L N, Bellomo K, Cane M, et al. 2017. The role of historical forcings in
489 simulating the observed Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*,
490 44(5): 2472–2480. doi:10.1002/2016GL071337

491 Nicolì D, Bellucci A, Iovino D, et al. 2020. The impact of the AMV on Eurasian
492 summer hydrological cycle [J]. *Sci. Rep.*, 10(1): 14444. doi:10.1038/s41598-020-
493 71464-2

494 Otterå O H, Bentsen M, Drange H, et al. 2010. External forcing as a metronome for
495 Atlantic multidecadal variability [J]. *Nat. Geosci.*, 3(10): 688–694.
496 doi:10.1038/NGEO955

497 Qasmi S, Sanchez-Gomez E, Ruprich-Robert Y, et al. 2021. Modulation of the
498 occurrence of heatwaves over the Euro-Mediterranean region by the intensity of

499 the Atlantic multidecadal variability [J]. *J. Climate*, 34(3): 1099–1114.
 500 doi:10.1175/JCLI-D-19-0982.1
 501 Qin M H, Dai A G, Hua W J. 2020. Quantifying contributions of internal variability
 502 and external forcing to Atlantic multidecadal variability since 1870 [J]. *Geophys.*
 503 *Res. Lett.*, 47(22): e2020GL089504. doi:10.1029/2020GL089504
 504 Ruprich-Robert Y, Delworth T, Msadek R, et al. 2018. Impacts of the Atlantic
 505 multidecadal variability on North American summer climate and heat waves [J].
 506 *J. Climate*, 31(9): 3679–3700. doi:10.1175/JCLI-D-17-0270.1
 507 Ruprich-Robert Y, Msadek R, Castruccio F, et al. 2017. Assessing the climate impacts
 508 of the observed Atlantic multidecadal variability using the GFDL CM2.1 and
 509 NCAR CESM1 global coupled models [J]. *J. Climate*, 30(8): 2785–2810.
 510 doi:10.1175/JCLI-D-16-0127.1
 511 Schlesinger M E, Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of
 512 period 65–70 years [J]. *Nature*, 367(6465): 723–726. doi:10.1038/367723a0
 513 Shi J. 2021. Reexamining the decadal variation in the ENSO–East Asian winter
 514 monsoon relationship [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(19): e2021GL094208.
 515 doi:10.1029/2021GL094208
 516 Si D, Ding Y H. 2016. Oceanic forcings of the interdecadal variability in East Asian
 517 summer rainfall [J]. *J. Climate*, 29(21): 7633–7649. doi:10.1175/JCLI-D-15-
 518 0792.1
 519 Si D, Hu A. 2017. Internally generated and externally forced multidecadal oceanic
 520 modes and their influence on the summer rainfall over East Asia [J]. *J. Climate*,
 521 30(20): 8299–8316. doi:10.1175/JCLI-D-17-0065.1
 522 Si D, Jiang D B, Ding Y H. 2021. Synergistic impacts of the Atlantic and Pacific Oceans
 523 on the interdecadal variations of summer rainfall in Northeast Asia [J]. *J. Meteor.*
 524 *Res.*, 35(5): 844–856. doi:10.1007/s13351-021-0191-2
 525 Si D, Hu A, Jiang D B, Lang X M. 2023. Atmospheric teleconnection associated with
 526 the Atlantic multidecadal variability in summer: Assessment of the CESM1 model.

527 Climate Dynamics, 60(3-4), 1043–1060. <https://doi.org/10.1007/s00382-022->
528 06331-z.

529 Sun C, Li J P, Ding R Q, et al. 2017. Cold season Africa–Asia multidecadal
530 teleconnection pattern and its relation to the Atlantic multidecadal variability [J].
531 Climate Dyn., 48(11): 3903–3918. doi:10.1007/s00382-016-3309-y

532 Sun J, Yang K, Guo W D, et al. 2020. Why has the inner Tibetan Plateau become wetter
533 since the mid-1990s? [J]. J. Climate, 33(19): 8507–8522. doi:10.1175/jcli-d-19-
534 0471

535 Sun X Q, Li S L, Hong X W, et al. 2019. Simulated influence of the Atlantic
536 Multidecadal Oscillation on summer Eurasian nonuniform warming since the mid-
537 1990s [J]. Adv. Atmos. Sci., 36: 811–822. doi:10.1007/s00376-019-8169-z

538 Sutton R T, Dong B. 2012. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in
539 the 1990s [J]. Nat. Geosci., 5(11): 788–792. doi:10.1038/ngeo1595

540 Sutton R T, Hodson D L R. 2005. Atlantic Ocean forcing of North American and
541 European summer climate [J]. Science, 309(5731): 115–118.
542 doi:10.1126/science.1109496

543 Ting M F, Kushnir Y, Seager R, et al. 2009. Forced and internal twentieth-century SST
544 trends in the North Atlantic [J]. J. Climate, 22(6): 1469–1481.
545 doi:10.1175/2008JCLI2561.1

546 Trenberth K E, Shea D J. 2006. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005 [J].
547 Geophys. Res. Lett., 33(12): L12704. doi:10.1029/2006GL026894

548 Vecchi G A, Delworth T L, Booth B. 2017. Climate science: Origins of Atlantic decadal
549 swings [J]. Nature, 548(7667): 284–285. doi:10.1038/nature23538

550 Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect
551 East Asian climate? [J]. J. Climate, 13(9): 1517–1536. doi:10.1175/1520-
552 0442(2000)013<1517:Peatdh>2.0.Co;2

553 Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of
554 1970's [J]. Adv. Atmos. Sci., 18(3): 376–386. doi:10.1007/bf02919316

555 Wang H J, He S P. 2012. Weakening relationship between East Asian winter monsoon
556 and ENSO after mid-1970s [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 57(27): 3535–3540.
557 doi:10.1007/s11434-012-5285-x

558 Wang L, Chen W. 2014. The East Asian winter monsoon: Re-amplification in the mid-
559 2000s [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 59(4): 430–436. doi:10.1007/s11434-013-0029-0

560 Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact
561 of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35(20):
562 L20702. doi:10.1029/2008GL035287

563 Wang Y M, Li S L, Luo D H. 2009. Seasonal response of Asian monsoonal climate to
564 the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 114(D2): D02112.
565 doi:10.1029/2008JD010929

566 Yan X Q, Zhang R, Knutson T R. 2019. A multivariate AMV index and associated
567 discrepancies between observed and CMIP5 externally forced AMV [J]. *Geophys.*
568 *Res. Lett.*, 46(8): 4421–4431. doi:10.1029/2019GL082787

569 Yang Q, Ma Z G, Wu P L, et al. 2019. Interdecadal seesaw of precipitation variability
570 between North China and the Southwest United States [J]. *J. Climate*, 32(10):
571 2951–2968. doi:10.1175/JCLI-D-18-0082.1

572 Yang Y-M, An S-I, Wang B, et al. 2019. A global-scale multidecadal variability driven
573 by Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Nat. Sci. Rev.*, 7(7): 1190–1197.
574 doi:10.1093/nsr/nwz216

575 Yeager S, Karspeck A, Danabasoglu G, et al. 2012. A decadal prediction case study:
576 Late twentieth-century North Atlantic Ocean heat content [J]. *J. Climate*, 25(15):
577 5173–5189. doi:10.1175/JCLI-D-11-00595.1

578 Yu L W, Si D, Jiang D B, et al. 2023. Tibetan Plateau booster effect on the influence
579 of Atlantic multidecadal variability on the East Asian summer rainfall [J]. *J.*
580 *Climate*, 36(10): 3437–3452. doi:10.1175/JCLI-D-22-0472.1

581 Yu R, Wang B, Zhou T. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening
582 trend over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31(22): L22212.
583 doi:10.1029/2004GL021270

584 Zhang J, Chen Z H, Chen H S, et al. 2020. North Atlantic multidecadal variability
585 enhancing decadal extratropical extremes in boreal late summer in the early 21st
586 century [J]. *J. Climate*, 33(14): 6047–6064. doi:10.1175/JCLI-D-19-0536.1

587 Zhang P, Duan A M, Hu J. 2022. Combined effect of the tropical Indian Ocean and
588 tropical North Atlantic sea surface temperature anomaly on the Tibetan Plateau
589 precipitation anomaly in late summer [J]. *J. Climate*, 35(22): 3899–3918.
590 doi:10.1175/JCLI-D-21-0990.1

591 Zhang R, Delworth T L. 2006. Impact of Atlantic Multidecadal Oscillations on
592 India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(17):
593 L17712. doi:10.1029/2006GL026267

594 Zhang R, Delworth T L. 2007. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on North
595 Pacific climate variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(23): L23708.
596 doi:10.1029/2007GL031601

597 Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A
598 diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74(1):
599 49–62. doi:10.2151/jmsj1965.74.1_49

600 Zhang R, Sutton R, Danabasoglu G, et al. 2019. A review of the role of the Atlantic
601 meridional overturning circulation in Atlantic multidecadal variability and
602 associated climate impacts [J]. *Rev. Geophys.*, 57(2): 316–375.
603 doi:10.1029/2019RG000644

604 Zhang R. 2017. On the persistence and coherence of subpolar sea surface temperature
605 and salinity anomalies associated with the Atlantic multidecadal variability [J].
606 *Geophys. Res. Lett.*, 44(15): 7865–7875. doi:10.1002/2017GL074342

607 Zhang Z Q, Sun X G, Yang X Q. 2018. Understanding the interdecadal variability of
608 East Asian summer monsoon precipitation: Joint influence of three oceanic signals
609 [J]. *J. Climate*, 31(14): 5485–5506. doi:10.1175/JCLI-D-17-0657.1

610 Zhou B, Wang Z, Sun B, et al. 2021. Decadal change of heavy snowfall over northern
611 China in the mid-1990s and associated background circulations [J]. *J. Climate*,
612 34(2): 825–837. doi:10.1175/jcli-d-19-0815.1

613 Zhou C Y, Zhao P, Chen J M. 2019. The interdecadal change of summer water vapor
614 over the Tibetan Plateau and associated mechanisms [J]. *J. Climate*, 32(13):
615 4103–4119. doi:10.1175/JCLI-D-18-0364.1

616 Zhou W, Wang X, Zhou T J, et al. 2007. Interdecadal variability of the relationship
617 between the East Asian winter monsoon and ENSO [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*,
618 98(3–4): 283–293. doi:10.1007/s00703-007-0263-6

619 Zhou X, Li S, Luo F, et al. 2015. Air–sea coupling enhances the East Asian winter
620 climate response to the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*,
621 32(12): 1647–1659. doi:10.1007/s00376-015-5030-x

622 Zhou Y F, Wu Z W. 2016. Possible impacts of mega-El Niño/Southern Oscillation and
623 Atlantic Multidecadal Oscillation on Eurasian heatwave frequency variability [J].
624 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142(697): 1647–1661. doi:10.1002/qj.2759

625 Zhu Y, Wang H, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation
626 pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dyn.*, 36(7–8):
627 1463–1473. doi:10.1007/s00382-010-0852-9

628 Zhu Z W, Feng Y N, Jiang W, et al. 2023. The compound impacts of sea surface
629 temperature modes in the Indian and North Atlantic oceans on the extreme
630 precipitation days in the Yangtze River Basin [J]. *Climate Dyn.*,
631 doi:10.1007/s00382-023-06733-7 (online)

632 Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface
633 temperature tripole on the East Asian summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*,
634 30(4): 1173–1186. doi:10.1007/s00376-012-2125-5

- 635 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变
636 化的可能联系 [J]. 气象学报, 72(5): 835–852.
- 637 Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. 2014. Interdecadal variability of the East
638 Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. Acta
639 Meteorologica Sinica (in Chinese), 72(5): 835–852.
- 640 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化 [J].
641 大气科学, 42(3): 533–558.
- 642 Ding Yihui, Si Dong, Liu Yanju, et. al. 2018. On the characteristics, driving forces
643 and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon [J]. Chinese
644 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3): 533–558.
- 645 贺圣平, 王会军. 2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特
646 征 [J]. 大气科学, 36(3): 523–538.
- 647 He Shengping, Wang Huijun. 2012. An integrated East Asian winter monsoon
648 index and its interannual variability [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences
649 (in Chinese), 36(3): 523–538.
- 650 李双林, 王彦明, 郜永祺. 2009. 北大西洋年代际振荡 (AMO) 气候影响的研究评
651 述 [J]. 大气科学学报, 32(3): 458–465.
- 652 Li Shuanglin, Wang Yanming, Gao Yongqi. 2009. A review of the researches on
653 the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and its climate influence [J].
654 Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(3): 458–465.
- 655 曲金华, 江志红, 谭桂容, 等. 2006. 冬季北大西洋海温年际、年代际变化与中国
656 气温的关系 [J]. 地理科学, 26(5): 557–563.
- 657 Qu Jinhua, Jiang Zhihong, Tan Guirong, et al. 2006. Relation between interannual,
658 interdecadal variability of SST in North Atlantic in winter and air temperature in
659 China [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 26(5): 557–563.
- 660 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. 大气科学, 37(2):
661 313–318.

- 662 Wang Huijun, Fan Ke. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J].
663 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(2): 313–318.
- 664 徐海明, 何金海, 董敏. 2001. 江淮入梅的年际变化及其与北大西洋涛动和海温
665 异常的联系 [J]. 气象学报, 59(6): 694–706.
- 666 Xu Haiming, He Jinhai, Dong Min. 2001. Interannual variability of the Meiyu
667 onset and its association with North Atlantic Oscillation and SSTA over North
668 Atlantic [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59(6): 694–706.
- 669 杨崧, 邓开强, 段晚锁. 2018. 季风与ENSO的选择性相互作用: 年循环和春季预
670 报障碍的影响 [J]. 大气科学, 42(3): 570–589.
- 671 Yang Song, Deng Kaiqiang, Duan Wansuo, et al. 2018. Selective interaction
672 between monsoon and ENSO: Effects of annual cycle and spring predictability
673 barrier. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3): 570–589.
- 674 杨修群, 谢倩, 黄士松. 1992. 大西洋海温异常对东亚夏季大气环流影响的数值
675 试验 [J]. 气象学报, 50(3): 349–354.
- 676 Yang Xiuquan, Xie Qian, Huang Sisong. 1992. Numerical experiments of effect
677 of warm SST anomalies in Atlantic Ocean on the East Asian general circulation
678 during the northern hemisphere summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in
679 Chinese), 50(3): 349–354.