

# IPO、AMO 和全球变暖对北美地区降水的相对贡献

徐川<sup>1</sup> 张昊<sup>2</sup> 陶丽<sup>\*1, 3</sup>

1. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
2. 浙江省台州市三门县气象局, 台州 317100
3. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

**摘要** 本文研究了 1934-2018 年期间太平洋年代际振荡(Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)、大西洋年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)以及全球变暖(Global Warming, GW)对北美地区陆地降水年代际变化的相对贡献。首先通过对冬(12-2月)、夏季(6-8月)北美地区的陆地降水与中低纬地区的海表面温度进行奇异值分解分析,得到对北美陆地冬季降水相对贡献较大的主要海温模态为 IPO (42.33%) 和 AMO (23.21%), 夏季则为 AMO (32.66%) 和 IPO (21.60%)。其次利用线性回归模型,分析三种信号分别对北美冬、夏季陆地降水的相对贡献及对北美陆地不同区域降水的相对重要性,结果表明 AMO 对夏季北美陆地降水变化的贡献最大, IPO 次之, 冬季则相反, GW 对冬夏季北美陆地降水都有一定的贡献。夏季期间阿拉斯加地区 AMO 的贡献最大, 约占 65.8%, 加拿大地区 GW 的贡献最大, 约占 44.5%, 美国本土及墨西哥地区三者贡献基本一致; 冬季期间阿拉斯加和加拿大地区 GW 的贡献最大, 分别为 62.3%和 44.7%, 美国本土和墨西哥地区 IPO 的贡献最大, 分别为 47.9%和 71.5%。进一步利用信息流方法,验证了 IPO、AMO、GW 对降水的敏感性区域。最后运用全球大气环流模式 ECHAM 4.6 进一步确定了太平洋和大西洋海温异常对北美地区陆地降水变化的影响途径,结果表明印度洋海表面温度异常在 AMO 和 IPO 对北美陆地降水变化的作用中至关重要。

**关键词** 北美降水; IPO; AMO; 全球变暖; 相对贡献

文章编号 2020228C

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20228

收稿日期 2021-03-29; 网络预出版日期

作者简介 徐川, 男, 1993 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化研究。Email: xuchuan1993@126.com

通讯作者 陶丽, Email: taoli@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划 2016YFA0600402

Funded by National Key Research and Development Program (Grant 2016YFA0600402)

---

# Relative Contributions of IPO, AMO and Global Warming to the Land Precipitation in North America

Chuan Xu<sup>1</sup> Hao Zhang<sup>1</sup> Li Tao<sup>1,2\*</sup>

1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China
2. Fenghua District Meteorological Bureau, Ningbo, Zhejiang 315500
3. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China

**Abstract:** In this study, we investigate the relative contributions of interdecadal Pacific oscillation (IPO), Atlantic interdecadal oscillation (AMO) and global warming (GW) to decadal variation of land precipitation in North America from 1934 to 2018. Firstly, through the singular value decomposition (SVD) analysis for North American land precipitation and sea surface temperature (SST) in middle and low latitudes, it is found that IPO (42.33%) and AMO (23.21%) are the main SST modes in winter, and AMO (32.66%) and IPO (21.60%) in summer, to affect the interdecadal variation of the land precipitation. Secondly, the linear regression model is used to analyze the relative contribution of the three signals. The results show that AMO contribute dominantly of North America in summer. IPO plays a role only secondary to IPO, and winter is the opposite. GW also plays an important role. In summer, AMO is the primary contributor to the changes of precipitation in Alaska; In Canada, GW dominates. In USA and Mexico, GW, AMO and IPO are of equal importance; In winter, GW is the primary contributor to the changes of precipitation in Alaska and Canada; IPO dominates in USA and Mexico. In terms of information flow, we have presented the regions of sensitivity to the three modes. We also apply ECHAM 4.6 model to further verify the above results, show that the Indian Ocean is pivotal in having AMO and IPO in effect in causing the precipitation variabilities.

**Key words:** North American precipitation; IPO; AMO; GW; relative contribution

## 1 引言

---

降水是指在大气中冷凝的水汽以不同方式下降到地球表面的天气现象，而降水的变化会影响世界绝大部分的人口。北美地区是世界上经济最发达的地区，然而降水的变化对该地区的社会和经济发展的影响不容小觑。自 2007 年以来，加州干旱频发，干旱导致水库水位下降、水力发电量剧减、森林火灾频发。2020 年夏美国多州又出现干旱，加州大火重燃。北美的这些持续性的天气异常，气候变化和年代际变化是否有贡献？这是我们亟待解决的问题。

许多研究表明，太平洋年代际振荡（Interdecadal Pacific Oscillation, IPO）对北美地区及全球其他区域的降水有重要贡献(朱益民和杨修群, 2003; 杨修群等, 2004; 邓伟涛等, 2009; Dai, 2013; 张朝虹等, 2018)。Meehl et al. (2006) 通过海气耦合模式(coupled general circulation model, CGCM) 发现北美西南部地区降水存在多年代际变化, Dai (2013) 研究发现北美西南地区的降水与 IPO 指数高度相关, Xu et al. (2018) 经过相关分析, 认为美国西部的降水更容易受 IPO/PDO 的影响。IPO 是一种海洋、大气现象, 发生在太平洋海盆区域, 振荡周期约为 10-30 年和 40-60 年。有研究定义 IPO 的北太平洋分量为北太平洋年代际振荡 (Pacific decadal Oscillation, PDO, Mantua et al., 1997; Zhang et al., 1997), PDO 被认为是由厄尔尼诺-南方涛动 (El Nino Southern Oscillation, ENSO) 的“红化”与随机大气强迫相结合所造成 (Newman et al., 2003)。尽管计算 IPO 和 PDO 指数的关注区域和消除年际变化的过滤方法上有所不同, 但 IPO 和 PDO 在时间上高度相关, 并且经常可互换使用 (Xu et al., 2018)。IPO 影响的北美陆地降水异常的原因可用相关的环流异常解释, 即在 IPO 负位相阶段, 热带中东太平洋海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 异常偏低, 会导致北太平洋对流层低层在冬季节产生较强的高压中心以及反气旋环流, 导致北美西部沿海地区出现寒冷干燥的西北风和偏北风, 进而导致 IPO 负位相期间 (1946-1976 年和 1999 年至今) 美国西部大部分地区 (美国西北部除外) 和美国中部大平原的年降水量减少 5-20%, 在 IPO 的正位相期间 (1924-1945 年和 1977-1998 年), 环流和降水变化大致相反, 美国西部和中部大平原的大部分地区降水量较高, 而 IPO 对美国中西部、东北部和东南部降水的影响相对较弱 (Dai, 2013; Dong et al., 2015; Meehl et al., 2006)。

另一重要的年代际信号是大西洋多年代际振荡 (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO), 也称为大西洋多年代际变率 (Atlantic Multidecadal Variability, AMV), 它是发生在北大西洋区域具有海盆尺度的、60~80 年的周期的海表面温度异常变化。AMO 是一种自然变率, 通常用 0-80°N 北大西洋区域平均的 SST 异常来表示 (Schlesinger and Ramankutty, 1994; Kerr, 2007)。诸多研究表明, AMO 在北大西洋局地气候及全球其他区域气候演变中发挥了重要作

---

用 (Knight et al., 2006; Mohino et al., 2011; Zhang and Delworth, 2006; Goly and Teegavarapu, 2014; 孙雪倩等, 2018)。欧亚大陆的地表气温, 美国大陆、巴西东北部、西非以及南亚的降水, 北大西洋飓风等都与之密切相关 (李双林等, 2009; Knight et al., 2006)。Sutton et al. (2005) 发现 AMO 造成了美国、墨西哥南部以及西欧地区大气环流的明显变化, 降水和地表温度也出现了相关异常。相关研究表明, 北美季风与 AMO 密切相关。北美季风开始于 6 月初到 6 月中旬, 首先在墨西哥西南部上空出现, 然后迅速向北移动, 直到 7 月初到达美国西南部 (Douglas et al., 1993)。北美夏季风的爆发是由于大气热力学不稳定和邻近海域水汽输送增加的结果, 往往会导致天气从炎热干燥迅速转变为相对凉爽阴雨。Higgins et al. (1997) 指出, 北美季风有两个主要的水汽来源: 加利福尼亚湾北部提供了 850 hPa 以下的大部分水汽, 而墨西哥湾则提供了 850 hPa 及以上的水汽。1948-2009 年期间, 北美季风系统在墨西哥西北部的强度表现出多年代际变化, 在 AMO 正位相期间, 美国东南部和墨西哥湾异常气旋环流和降水增强 (Arias et al., 2012), 有研究表明这是由于 AMO 正位相期间, 夏季北大西洋副热带高压系统减弱, 而从墨西哥湾附近地区到美国中部水汽输送增强, 导致美国东南部和北美季风区的夏季降水量增多, 而北美其他大部分地区 (尤其是美国中部地区) 的降水减少 (Hu et al., 2008; 2011; Douglas et al., 1993)。

全球变暖使得全球大气平均水汽含量上升, 但在过去几十年, 全球平均陆地降水的变化幅度却很少 (施能等, 2004; Held and Soden, 2006; Gu et al., 2007; Gu and Adler, 2013), 一方面可能是由于地球能量平衡收支, 另一方面可能是由于不同区域的降水变化相互抵消 (Held and Soden, 2006; Dai and Fung, 1997; Emori and Brown, 2005; Smith et al., 2006)。同时全球变暖对于北美地区极端降水以及水汽输送有一定的贡献: 极端降水的增加幅度大于全球范围内的平均降水增加幅度, 气候模式在北美区域降水研究中也体现为强降水或者极端降水增加幅度相对于其他降水类型幅度要大 (Hennessy et al., 1997; Wilby et al., 2002)。而北美地区气温上升的时段 (从 1980 年开始) 与全球平均气温的快速上升时段大致吻合, 所以全球变暖是导致北美极端降水事件发生频率增加的一个原因 (Kunkel et al., 2003)。历史气候情景和 RCP8.5 情景研究发现在北美北部沿海地区, 随增暖加强降水强度和单体风暴的总降水都有变得更加强烈的趋势 (Ma et al., 2019)。

综上所述, IPO、AMO、GW 对北美陆地降水均有一定贡献, 也有诸多研究, 但较少有人研究 IPO、AMO、GW 对于北美地区降水的相对贡献。为了进一步探究 IPO、AMO、GW 对北美范围内不同区域陆地降水的相对重要性, 本文首先利用 SVD 方法分析北美地区冬、夏季降水年代际变化时空分布及耦合的海温模态, 然后利用多元线性回归模型来分析 IPO、

---

AMO、全球变暖对北美地区陆地降水的相对贡献，并进一步利用信息流方法确认其因果关系，最后利用全球大气环流模式确定太平洋和大西洋海温异常对北美地区陆地降水变化的影响途径。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

由于北美冬夏季降水差异较大，本文将冬夏季分别进行分析，6-8月定义为夏季，12月至次年2月定义为冬季。本文所用陆地降水逐月资料分别是东英吉利大学气候研究中心（University of East Anglia Climatic Research Unit）的CRU TS4.02（[http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru\\_ts](http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts)）降水资料，空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 和全球降水气候中心（Global Precipitation Climatology Centre, GPCC）的降水资料（[https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/GPCC/html](https://opendata.dwd.de/climate_environment/GPCC/html)），空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。海表面温度资料由英国Hadley中心提供（Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature dataset, HadISST, <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>），空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

IPO指数和AMO指数均来自于美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）的物理科学实验室（Physical Sciences Laboratory, PSL）（<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>）。其中IPO指数基于赤道中部太平洋的区域平均海温异常与西北太平洋和西南太平洋的区域平均海温异常的差值进行构建。AMO指数是根据北大西洋区域（ $0-70^{\circ}\text{N}$ ）SST去趋势后进行加权平均所构建。GW指数定义为（ $45^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{N}$ ）范围内全球SST平均，然后采用集合经验模态分解（Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD）滤波后得到的趋势时间序列，以消除年际及IPO、AMO信号影响。

本文资料均去除了季节循环，除信息流分析外还对所有资料进行了Lanczos九年低通滤波，以消除数据中的年际变化信号。本文资料所取时间长度均为1934-2018年。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 SVD方法

利用SVD方法分析北美地区冬、夏季降水年代际变化时空分布及耦合的海温模态。本文将北美大陆地区（ $167^{\circ}\text{W} \sim 55^{\circ}\text{W}, 13^{\circ}\text{N} \sim 70^{\circ}\text{N}$ ）冬夏季降水作为SVD左场，由于 $20^{\circ}\text{S} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 海温区域能较好地覆盖IPO、AMO、全球变暖的海温范围，所以选取该区域冬夏季海温作为SVD右场，进行SVD分析。

## 2.2.2 多元线性回归

为了评估 IPO、AMO、全球变暖的相对重要性，利用多元线性回归预测模型定量计算了 IPO、AMO、GW 三个指数对北美大陆地区（167°W~55°W,13°N~70°N）不同区域冬夏季降水的相对贡献大小。构造的多元线性回归模型如下：

$$PRE_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot GW_i + \beta_2 \cdot AMO_i + \beta_3 \cdot IPO_i + e_i \quad (1)$$

该多元线性回归模型中*i*代表降水、IPO、AMO、GW 的年份， $\beta_0$ 为常数项， $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 和 $\beta_3$ 为回归系数项， $e_i$ 为模型不能解释的残差部分，模型能被 IPO+AMO+GW 解释的相对贡献表示为：

$$R^2 = \frac{Modelvar}{Totalvar} = \frac{\sum_{i=1}^t (\widehat{PRE}_i - \overline{PRE})^2}{\sum_{i=1}^t (PRE_i - \overline{PRE})^2} \quad (2)$$

其中，

$$\widehat{PRE}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot GW_i + \hat{\beta}_2 \cdot IPO_i + \hat{\beta}_3 \cdot IPO_i \quad (3)$$

(2) (3) 式中带“ $\widehat{\quad}$ ”量表示气候平均值，“ $\hat{\quad}$ ”量表示多元线性回归模型估计值，设 $Q$ 为上述多元线性回归方程的剩余方差，如果去除一个自变量（例如 GW），利用剩余的两个自变量（AMO 和 IPO）与因变量降水构造新的多元线性回归方程，并将新方程的剩余方差记为 $Q'_{GW}$ 。显然，考虑的因子越多，残差平方和就越小。因此，IPO 的方差贡献表示为：

$$Q_{IPO} = Q'_{IPO} - Q \quad (4)$$

同理，AMO 和 GW 的方差贡献可分别表示为：

$$Q_{AMO} = Q'_{AMO} - Q \quad (5)$$

$$Q_{GW} = Q'_{GW} - Q \quad (6)$$

因此，IPO、AMO 和 GW 的方差贡献占比（R）分别表示为：

$$R_{IPO} = \frac{Q_{IPO}}{Q_{GW} + Q_{AMO} + Q_{IPO}} \quad (7)$$

$$R_{AMO} = \frac{Q_{AMO}}{Q_{GW} + Q_{AMO} + Q_{IPO}} \quad (8)$$

$$R_{GW} = \frac{Q_{GW}}{Q_{GW} + Q_{AMO} + Q_{IPO}} \quad (9)$$

## 2.2.3 信息流方法

通常，我们使用超前滞后相关分析来识别两个时间序列之间的因果关系。然而，众所周知，相关性不具有所需的定向性或不称性，因此并不一定意味着因果关系。但分析事件间的因果关系是科学的核心问题。信息流是指信息的传递运动，Liang（2014）基于“信息流”物理概念，给出两个物理量的时间序列在单位时间内传递的信息流的严谨表达式，而不

必如传统方法那样以半经验的形式出现。信息流不仅提供因果关系的方向，而且提供因果关系的大小。

考虑两个物理量的时间序列：

$$\frac{dx_1}{dt} = F_1(X_1, X_2, t) + b_{11}\dot{W}_1 + b_{12}\dot{W}_2 \quad (10)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = F_2(X_1, X_2, t) + b_{21}\dot{W}_1 + b_{22}\dot{W}_2 \quad (11)$$

这里 $W_1$ 和 $W_2$ 是白噪声， $F_1, F_2$ 是偏微分函数，Liang (2014)证明 $X_2$ 至 $X_1$ 的信息流可以写为：

$$T_{2 \rightarrow 1} = -E \left[ \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial(F_1 \rho_1)}{\partial x_1} \right] + \frac{1}{2} E \left[ \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial^2 (b_{11}^2 + b_{12}^2) \rho_1}{\partial x_1^2} \right] \quad (12)$$

(12)式是因果性的定量描述。这里 $E$ 代表数学期望值， $\rho_1 = \rho_1(x_1)$ 是 $X_1$ 的概率密度函数。如果 $T_{2 \rightarrow 1} = 0$ ，则 $X_2$ 不是 $X_1$ 的因，反之 $X_2$ 是 $X_1$ 的因，实际应用过程中需做信度检验。对于线性系统，信息流公式可以简化如下：

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11}C_{12}C_{2,d1} - C_{12}^2C_{1,d1}}{C_{11}^2C_{22} - C_{11}C_{12}^2} \quad (13)$$

公式(13)表示时间序列 $X_2$ 到 $X_1$ 的单位时间的信息流，其中：

$$C_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^N (X_i - \bar{X}_{i,n})(X_j - \bar{X}_{j,n})}{N} \quad (14)$$

$C_{i,j}$ 为 $X_i$ 和 $X_j$ 的样本协方差， $C_{i,dj}$ 为 $X_i$ 与 $\dot{X}_j$ 的样本协方差， $\dot{X}_j$ 为使用欧拉前差格式的 $\frac{dX_j}{dt}$ 差分近似

$$\dot{X}_j = \frac{X_{j,N+1} - X_{j,N}}{\Delta t} \quad (15)$$

公式(13)从严格意义上说，它只适用于线性系统，但研究表明，它是非线性时间序列的一个很好的近似值 (Stips et al., 2015)。信息流的信度检验见 (Liang, 2014)。利用公式(13)我们可以定量给出 IPO, AMO, GW 对北美陆地降水信息流的显著区域。

#### 2.2.4 AGCM 数值试验

本文采用 ECHAM4 大气环流模式 (AGCM) 进行一系列 SST 敏感性试验，进一步深入研究 IPO、AMO 和 GW 对陆地降水的影响。ECHAM4 大气环流模式是由德国马普气象研究所开发的第四代大气环流模式。

该模型基于原始大气动力方程式，可预报变量由截断的球谐函数序列表示，截断序列在 42 波数 (T42) 处呈三角形截断。非线性项和大多数参数化物理过程是在高斯网格上计算的，该网格的水平空间分辨率约为  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ ，经纬度网格点数分别为 128 和 64。在垂直方向上

---

采用 19 层的混合  $\sigma$  气压坐标、垂直积分区域可延伸到 10hPa，相当于大约 30km 的高度。除辐射变量的积分步长为 2 小时，热力和动力学变量的积分步长为 24 分钟，详细的 ECHAM4 模式介绍可参考 Roeckner (1996) 等工作。每一个试验积分 30 年，取后 20 年模拟结果，相当于 20 个统计样本的一个集合平均。

### 3 结果与分析

#### 3.1 影响北美地区夏、冬季陆地降水的趋势和年代际变化的主要 SST 模态

##### a. 夏季

为探究北美地区冬、夏季降水年代际变化时空分布及耦合的海温模态，本节将北美大陆地区(167°W~55°W,13°N~70°N)冬夏季降水作为 SVD 左场，(20°S~45°N)区域冬夏季 SST 作为 SVD 右场，分季节进行 SVD 分析。数据预处理阶段，降水和 SST 数据均经过了 Lanczos 9 年低通滤波，以滤除高频信号的影响，并去除缺测值。图 1、2、3 为夏季海温与降水的 SVD 分析结果，图 4、5、6 为冬季海温与降水的 SVD 分析结果。

图 1(a)、(b)分别为夏季第一模态异类场，解释方差为 32.7%，图 1(c)为对应的时间序列。分析时间序列，其中降水和 SST 时间序列相关系数达到了 0.91，SST 时间序列与 AMO 指数相关系数达到了 0.84，均通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验，且北大西洋 SST 呈现为一致增暖趋势，因此确定夏季 SVD 分析的第一模态 SST 场为 AMO 模态。由图 1(b)可知，在 AMO 正位相期间，阿拉斯加地区、密西西比河流域、大西洋沿岸平原、佛罗里达半岛、加拿大北部降水为正异常，美国西部地区降水为负异常。

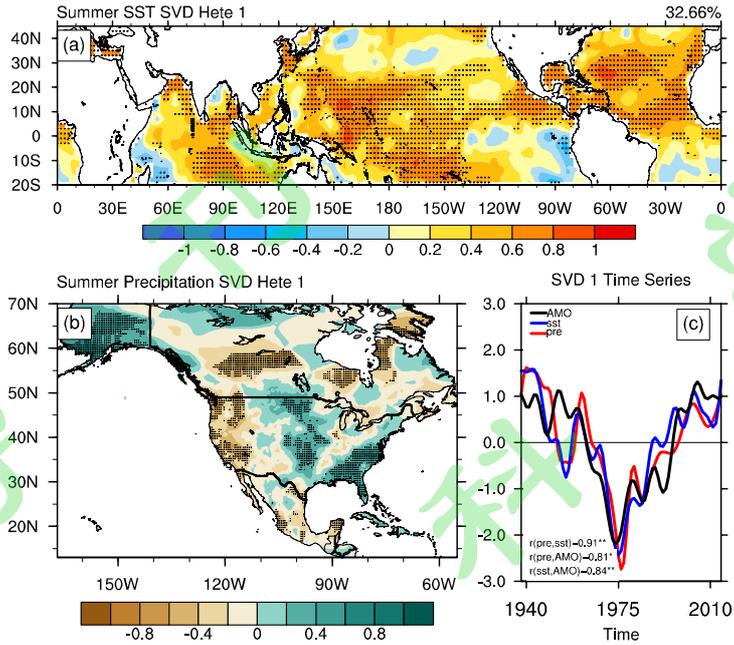


图 1 1934-2018 年 6-8 月海温与 CRU 陆地降水 SVD 分析第一模态。(a)、(b)分别为 SVD 第一模态海温、降水异类场,打点区域表示通过 $\alpha=0.10$  t 检验; (c)为异类场时间系数和 AMO 指数,其中蓝线表示 SST 时间序列,红线表示降水时间序列,黑线表示 AMO 指数。\*, \*\*, \*\*\*分别代表通过 $\alpha=0.10$ ,  $\alpha=0.05$  和 $\alpha=0.01$  信度检验。

Fig.1 The first SVD modes between SST and land precipitation from CRU during JJA season of 1934-2018. (a) is the spatial pattern of SST. (b) is the spatial pattern of land precipitation. Normalized SVD time series of SST (blue lines) and precipitation (red lines) are shown in (c).The black line is AMO index. The correlation coefficients (r) with \*, \*\*, \*\*\* are statistically significant at the 0.10, 0.05 and 0.01 level, respectively. The areas with dots are statistically significant at the  $\alpha=0.10$  level for (a) and (b).

图 2(a)、(b)分别为夏季 SVD 第二模态的 SST 和降水异类场,解释方差为 21.6%,图 2(c)为对应的时间序列。分析时间序列,降水和 SST 时间序列相关系数达到了 0.95, SST 时间序列与 IPO 指数相关系数达到了 0.94, 均通过 $\alpha=0.01$  的信度检验。且太平洋 SST 的空间模态呈现为经典 ENSO 的模态,因此确定夏季 SVD 分析的第二模态 SST 场为 IPO 模态。由图 2(b)可知,在 IPO 正位相期间,阿拉斯加南部沿海地区、北美洲中部大部分地区以及加拿大中东部降水偏多,加拿大西部地区、墨西哥南部地区降水偏少。

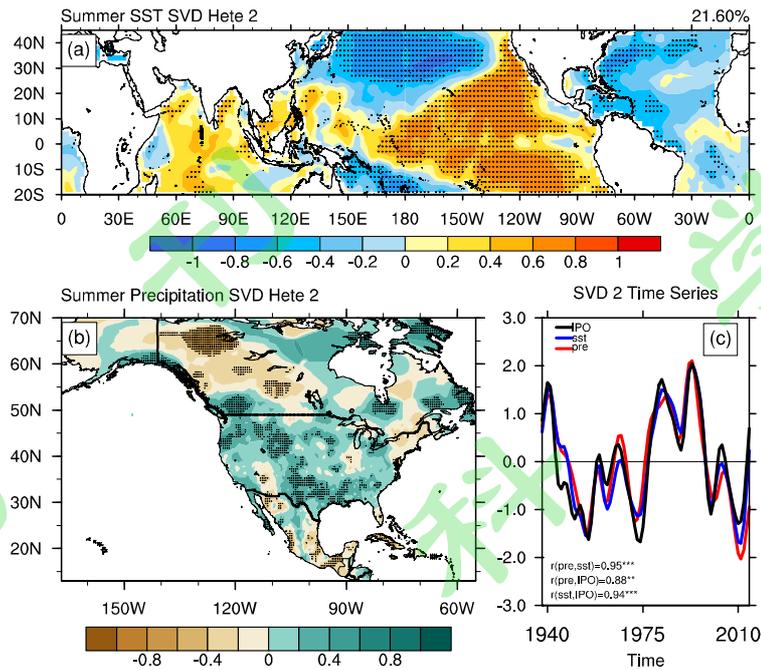


图 2 1934-2018 年 6-8 月海温与 CRU 陆地降水 SVD 分析第二模态。(a)、(b)分别为 SVD 第二模态海温、降水异类场，打点区域表示通过 $\alpha=0.10$  t 检验；(c)为异类场时间系数和 IPO 指数,其中蓝线表示 SST 时间序列，红线表示降水时间序列，黑线表示 IPO 指数。\*, \*\*, \*\*\* 分别代表通过 $\alpha=0.10$ ,  $\alpha=0.05$  和 $\alpha=0.01$  信度检验。

Fig.2 The second SVD modes between SST and land precipitation from during JJA season of 1934-2018. (a) is the spatial pattern of SST. (b) is the spatial pattern of land precipitation. Normalized SVD time series of SST (blue lines) and precipitation (red lines) are shown in (c), The black line is IPO index. The correlation coefficients (r) with \*, \*\*, \*\*\* are statistically significant at the 0.10, 0.05 and 0.01 level, respectively. The areas with dots are statistically significant at the 0.10 level for (a) and (b).

图 3(a)、(b)分别为夏季 SVD 第三模态的 SST 和降水异类场，解释方差为 15.7%，图 3(c)为对应的时间序列。分析时间序列，其中降水和 SST 时间序列相关系数达到了 0.81，但 SST 时间序列与 GW 指数相关系数只有 0.36，北美陆地降水时间序列与 GW 指数相关系数只有 0.64，同时考虑 SST 的空间分布，认为 SVD 第三模态的 SST 场与 GW 没有相似性，有可能是印度洋 SST 模态或者南大西洋 SST 模态。

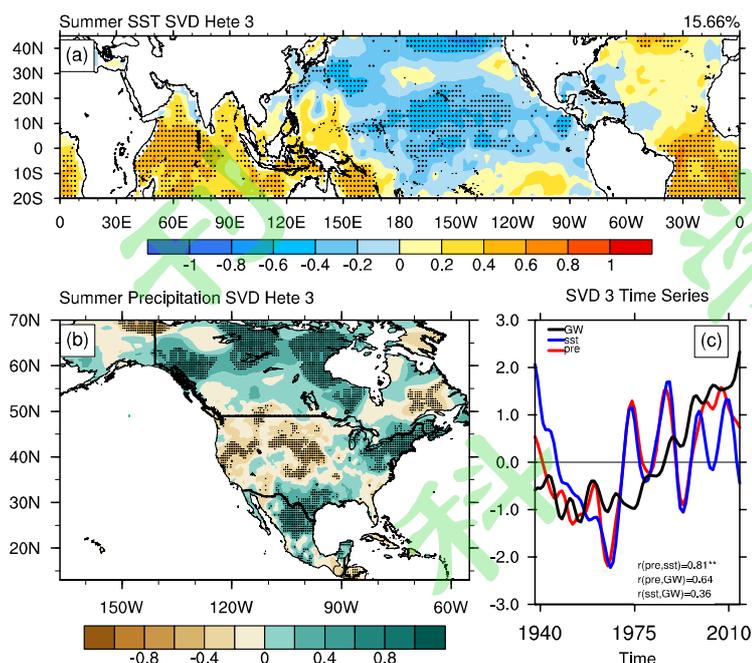


图 3 1934-2018 年 6-8 月海温与 CRU 陆地降水 SVD 分析第三模态。(a)、(b)分别为 SVD 第三模态海温、降水异类场，打点区域表示通过 $\alpha=0.10$  t 检验；(c)为异类场时间系数和 GW 指数，其中蓝线表示 SST 时间序列，红线表示降水时间序列，黑线表示 GW 指数。\*，\*\*，\*\*\*分别代表通过 $\alpha=0.10$ ， $\alpha=0.05$  和 $\alpha=0.01$  信度检验。

Fig.3 The third SVD modes between SST and land precipitation from CRU during JJA season of 1934-2018. (a) is the spatial pattern of SST. (b) is the spatial pattern of land precipitation. Normalized SVD time series of SST (blue lines) and precipitation (red lines) are shown in (c), The black line is GW index. The correlation coefficients (r) with \*, \*\*, \*\*\* are statistically significant at the 0.10, 0.05 and 0.01 level, respectively. The areas with dots are statistically significant at the 0.10 level for (a) and (b).

## b. 冬季

图 4(a)、(b)分别为冬季 SVD 第一模态的 SST 和降水异类场，解释方差为 42.3%。图 4(c)为对应的时间序列。分析时间序列，其中降水和 SST 时间序列相关系数达到了 0.88，SST 时间序列与 IPO 指数相关系数达到了 0.86，均通过了 $\alpha=0.05$  信度检验，且太平洋 SST 的空间模态呈现为经典 ENSO 的模式，因此确定冬季 SVD 分析的第一模态 SST 场为 IPO 模式。由图 4(b)可见，在 IPO 正位相期间，北美洲降水整体自北向南大致呈现“正-负-正”的三极分布形态，北美洲南部（特别是美国、墨西哥交界处）降水显著偏多，北美洲中部地区降水显著偏少。

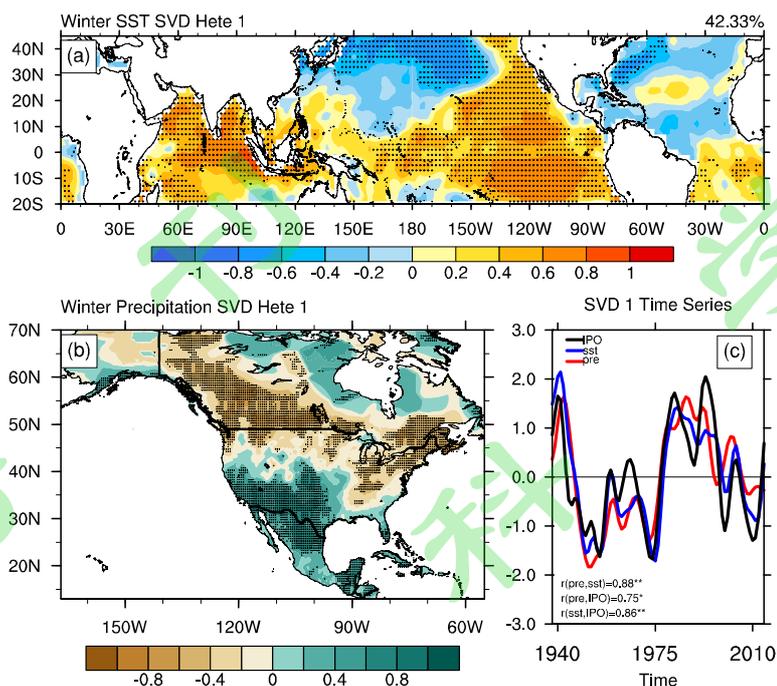


图 4 1934-2018 年 12-2 月海温与 CRU 陆地降水 SVD 分析第一模态。(a)、(b)分别为 SVD 第一模态海温、降水异类场，打点区域表示通过 $\alpha=0.10$  t 检验；(c)为异类场时间系数和 IPO 指数，其中蓝线表示 SST 时间序列，红线表示降水时间序列，黑线表示 IPO 指数。\*，\*\*，\*\*\*分别代表通过 $\alpha=0.10$ ， $\alpha=0.05$  和 $\alpha=0.01$  信度检验。

Fig.4 The first SVD modes between SST and land precipitation from CRU during DJF season of 1934-2018. (a) is the spatial pattern of SST. (b) is the spatial pattern of land precipitation. Normalized SVD time series of SST (blue lines) and precipitation (red lines) are shown in (c), The black line is IPO index. The correlation coefficients (r) with \*, \*\*, \*\*\* are statistically significant at the 0.10, 0.05 and 0.01 level, respectively. The areas with dots are statistically significant at the 0.10 level for (a) and (b).

图 5(a)、(b)分别为冬季 SVD 第二模态的 SST 和降水异类场，解释方差为 23.2%，图 5(c)为对应的时间序列。分析时间序列，其中降水和 SST 时间序列相关系数达到了 0.94，通过了 $\alpha=0.05$  信度检验，SST 时间序列与 AMO 指数相关系数达到了 0.87，通过了 $\alpha=0.10$  信度检验。且北大西洋 SST 呈现为一致增暖趋势，因此确定冬季 SVD 第二模态的 SST 场为 AMO 模态。由图 5(b) 可见在 AMO 正位相期间，北美洲中偏东部地区降水偏多，北美洲东南部沿岸地区降水偏少。

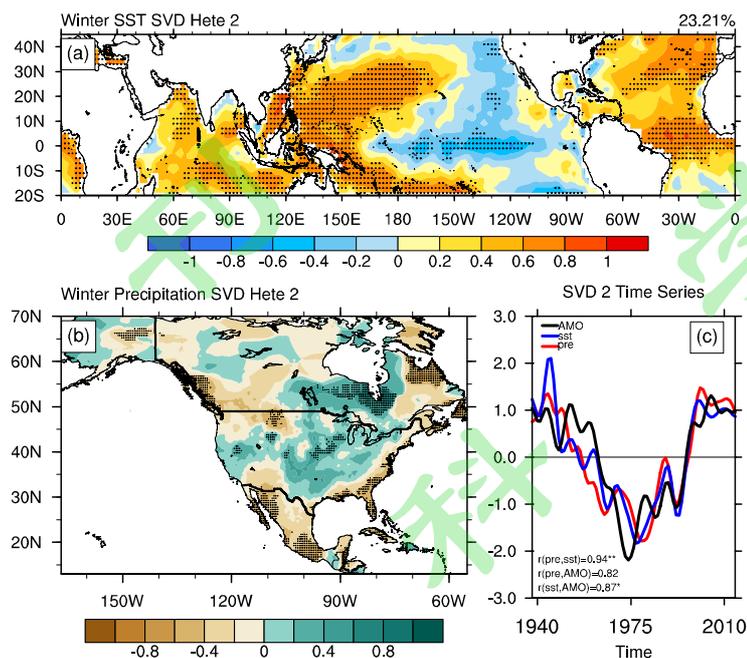


图 5 1934-2018 年 12-2 月海温与 CRU 陆地降水 SVD 分析第二模态。(a)、(b) 分别为 SVD 第二模态海温、降水异类场，打点区域表示通过 90% t 检验；(c) 为异类场时间系数和 AMO 指数,其中蓝线表示 SST 时间序列，红线表示降水时间序列，黑线表示 AMO 指数。\*，\*\*，\*\*\*分别代表通过 $\alpha=0.10$ ， $\alpha=0.05$  和 $\alpha=0.01$  信度检验。

Fig.5 The second SVD modes between SST and land precipitation of CRU during DJF season of 1934-2018. (a) is the spatial pattern of SST. (b) is the spatial pattern of land precipitation. Normalized SVD time series of SST (blue lines) and precipitation (red lines) are shown in (c), The black line is AMO index. The correlation coefficients (r) with \*, \*\*, \*\*\* are statistically significant at the 0.10, 0.05 and 0.01 level, respectively. The areas with dots are statistically significant at the 90% level for (a) and (b).

图 6(a)、(b)分别为冬季第三模态的 SST 和降水异类场，解释方差为 12.2%，图 6(c)为对应的时间序列。分析时间序列，其中降水和 SST 时间序列相关系数达到了 0.82，但 SST 与 GW 指数相关系数只有 0.11，北美陆地降水与 GW 指数相关系数只有 0.35，未通过 $\alpha=0.10$  的信度检验，且 SST 分布与 IPO、AMO、GW 模态均不是特别吻合，说明 GW 对北美陆地降水影响较小。

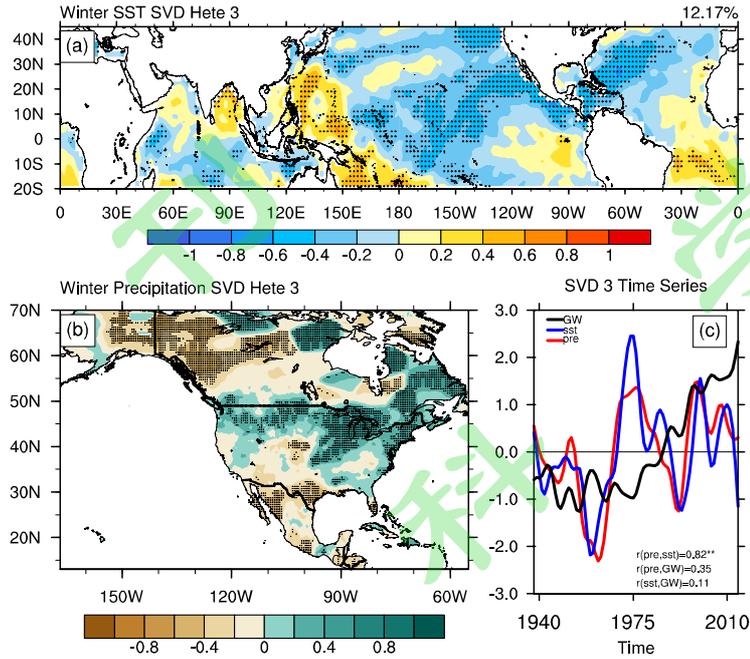


图 6 1934-2018 年 12-2 月海温与 CRU 陆地降水 SVD 分析第三模态。(a)、(b)分别为 SVD 第三模态海温、降水异类场，打点区域表示通过 90% t 检验；(c)为异类场时间系数和 GW 指数，其中蓝线表示 SST 时间序列，红线表示降水时间序列，黑线表示 GW 指数。\*，\*\*，\*\*\* 分别代表通过  $\alpha=0.10$ ,  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$  信度检验。

Fig.6 The third SVD modes between SST and land precipitation from CRU during DJF season of 1934-2018. (a) is the spatial pattern of SST. (b) is the spatial pattern of land precipitation. Normalized SVD time series of SST (blue lines) and precipitation (red lines) are shown in (c), The black line is GW index. The correlation coefficients (r) with \*, \*\*, \*\*\* are statistically significant at the 0.10, 0.05 and 0.01 level, respectively. The areas with dots are statistically significant at the 90% level for (a) and (b).

综上，通过 SVD 分析可见，对北美陆地降水相对贡献较大的主要 SST 模态夏季为 AMO (32.7%) 和 IPO (21.6%) 冬季则为 IPO (42.3%) 和 AMO (23.2%)，GW 对北美陆地降水影响较小。利用 GPCC 降水资料进行 SVD 分析，也得到类似的结果（图略），这里不再赘述。

### 3.2 回归分析

影响北美地区陆地降水变化的 SST 模态主要为 IPO 和 AMO，而 GW 在 SVD 的前三个主要模态中没有得到体现。为了进一步探究 IPO、AMO 以及 GW 对北美地区陆地降水的影响，利用一元线性回归模型，分别将夏、冬季的陆地降水与 IPO、AMO 和 GW 指数进行回归。IPO、AMO 指数以及降水数据经过 Lanczos 九年底通滤波，GW 指数经过 EEMD 滤波。IPO、AMO、GW 指数的时间序列及相关系数如图 7 所示，三个指数之间相关系数较

小，没有通过经过自相关计算得到的较低自由度的 $\alpha=0.10$  信度检验，可以认为三者相互独立。

图 8 为 1934-2018 年 CRU 北美陆地降水对 IPO、AMO 和 GW 指数的线性回归系数分布图。打点区域的相关系数通过了 $\alpha=0.10$  的 t 检验。

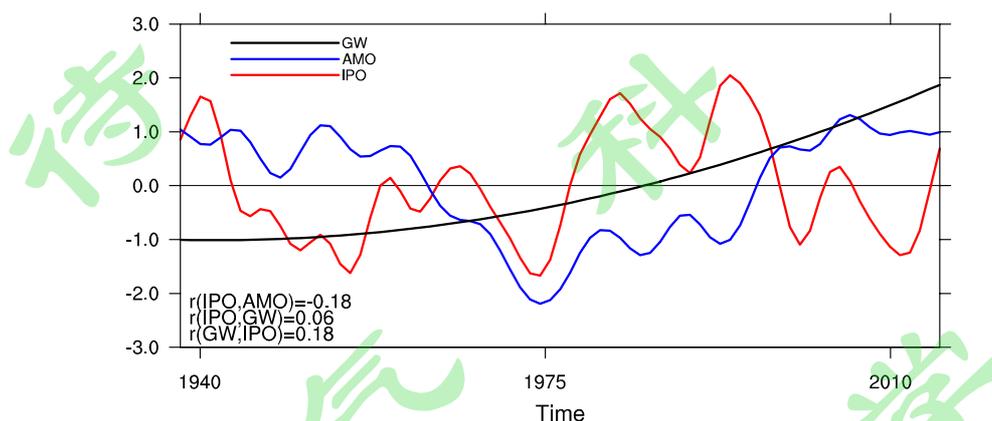


图 7 1934-2018 年 IPO（红线）、AMO（蓝线）、GW 指数（黑线）时间序列图。IPO、AMO 指数进行 Lanczos 9 年低通滤波。r 表示三个指数间的相关系数。

Fig.7 Time series of the 9-yr low-passed IPO (red line) and AMO (blue line) and GW (black line) indices from 1934-2018. r is the correlation coefficient between the three indices.

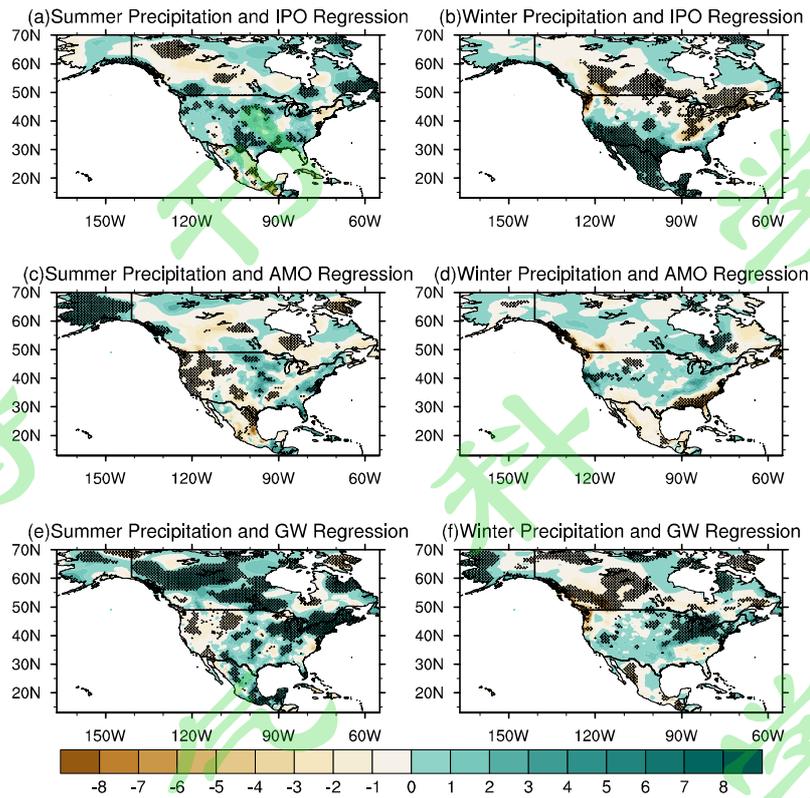


图 8 1934-2018 年 6-8 月和 12-2 月 CRU 降水对 IPO、AMO 和全球变暖趋势指数的线性回归分布 (单位:  $\text{mm mon}^{-1}$ )。 (a)、(b)为 IPO 与 6-8 月、12-2 月降水回归场, (c)、(d)为 AMO 与 6-8 月、12-2 月降水回归图, (e)、(f) 为全球变暖趋势与 6-8 月、12-2 月降水回归场。打点区域为通过  $\alpha=0.10$  信度检验区域。

Fig. 8 Regressed land precipitation from CRU ( $\text{mm mon}^{-1}$ ) in JJA (left column) and DJF seasons (right column) onto to the normalized indices of IPO (a, b), AMO (c, d) and GW (e, f). The areas with dots are statistically significant at the 0.10 level.

图 8(a)、(b)为 CRU 夏、冬降水对 IPO 指数的回归结果, 通过显著性检验区域的趋势与 SVD 结果(图 2(b)、图 4(b))基本一致, 进一步验证了 IPO 对北美地区降水变化的影响。相对夏季而言, IPO 对北美冬季年代际降水更有显著的影响。在冬季, IPO 正位相期间, 北美洲南部降水显著增多, 北美洲中部地区降水显著减少。夏季, IPO 指数与美国大部分地区降水以及五大湖地区降水为正相关, 与加拿大西部地区、墨西哥南部地区降水为负相关。

图 8(c)、(d)为 CRU 降水对 AMO 指数的回归结果, 通过显著性检验的区域的趋势与 SVD 结果(图 1(b)、图 5(b))基本一致。相对冬季而言, AMO 对北美夏季年代际降水更有显著的影响。在夏季, AMO 正位相期间, 北美洲中西部地区、墨西哥降水显著减少, 而阿拉斯加地区、密西西比河流域、大西洋沿岸平原、佛罗里达半岛降水显著增加; 冬季, AMO

指数与美国东部沿岸地区为显著正相关。

图 8(e)、(f)为 CRU 降水对 GW 指数的回归结果。夏季,随着全球变暖,加拿大中西部及东南部沿海地区、五大湖东部地区、密西西比河南部流域、墨西哥东部降水增加,而美国西部降水减少;冬季,随着全球变暖,五大湖区域降水增加,加拿大中西部地区降水减少。

一元线性回归分析的结果进一步验证了夏季对北美陆地降水产生影响的主要 SST 模态为 AMO、IPO,而冬季则主要为 IPO、AMO。也能看到 GW 对加拿大中西部和五大湖地区的降水也有重要影响,无论冬夏,随着全球变暖,五大湖地区的降水均增加,而加拿大中西部在夏季有变湿的趋势,冬季有变干的趋势。考虑到部分区域的降水受到多个模态的共同影响,且冬季第三主要海温模态尚未确定,下一节将重点分析 IPO、AMO、GW 对北美陆地不同区域降水的相对贡献。

### 3.3 IPO、AMO、GW 对北美陆地降水的方差贡献

本节通过多元线性回归模型,给出 IPO、AMO、GW 三者对北美陆地降水趋势和年代际变化的相对方差贡献分布图(图 9、10)。选取阿拉斯加地区(167°W~140°W,60°N~70°N)、美国本土(130°W~70°W,30°N~49°N)、加拿大(140°W~55°W,49°N~70°N)、墨西哥(117°W~93°W,15°N~30°N),分别计算冬夏季四个区域的相对方差贡献占比(表 1、2),定量评估 IPO、AMO、GW 对这四个区域陆地降水的趋势和年代际变化的相对方差贡献大小。

#### a. 夏季

图 9(a)为 1934-2015 年 AMO、IPO、GW 对夏季北美陆地降水的总方差贡献分布及三者的相对贡献,阿拉斯加西南部、加拿大中部、哈德森海峡北部、五大湖东部地区,IPO、AMO、GW 三者可以解释 80%以上夏季降水的年代际方差,阿拉斯加东北部、加拿大西部、哈德森海峡南部、美国西部、墨西哥南部,三者可以解释 60%以上夏季降水的年代际方差。结合表 1,可以得出,三者对阿拉斯加地区夏季降水总方差贡献最大,大约 34.7%,而美国本土只有 22.9%。

由表 1 和图 9 可见, IPO、AMO、GW 三者可以解释阿拉斯加地区 34.1%夏季降水的年代际方差,AMO 贡献最大,达到了 65.8%,GW 次之其贡献为 20.0%。加拿大地区,三者可以解释其 30.0%夏季降水的年代际方差,GW 贡献最大,达到了 44.5%, IPO 和 AMO 的贡献分别为 30.6%和 24.9%。美国本土,三者可以解释其 22.9%夏季降水的年代际方差,GW、AMO 和 IPO 的贡献分别为 36.8%、35.6%和 27.6%。墨西哥,三者可以解释其 24.0%夏季降水的年代际方差,AMO、GW 和 IPO 的贡献分别为 37.2%、32.2%和 30.6%。

夏季, IPO 对加拿大和墨西哥地区方差贡献较大,AMO 对阿拉斯加方差贡献最大,GW

对加拿大方差贡献最大。

## b. 冬季

图 10 为 1934-2018 年 IPO、AMO、GW 对冬季北美陆地降水的总方差贡献分布及三者的相对贡献,阿拉斯加西北部、加拿大南部、哈德森湾东部及南部、美国和墨西哥交界处 IPO、AMO、GW 三者可以解释 80%以上冬季降水的年代际方差。结合表 2,可以得出三者对墨西哥总方差贡献最大,达到 41.3%。

由表 2 和图 10 可见, IPO、AMO、GW 三者可以解释阿拉斯加地区 27.0%冬季降水的年代际方差,比夏季解释方差小。冬季 GW 贡献最大,达到了 62.3%,AMO 和 IPO 贡献分别 19.5%和 18.2%。加拿大地区,三者可以解释其 29.3%冬季降水的年代际方差,GW 贡献最大,达到了 44.7%,AMO 和 IPO 的贡献分别为 28.8%和 26.5%,与夏季类似。美国本土,三者可以解释其 24.7%冬季降水的年代际方差,IPO 的贡献最大,占 47.9%,GW 和 AMO 的贡献分别为 26.2%、和 25.9%。墨西哥,三者可以解释其 41.3%冬季降水的年代际方差,IPO 的贡献占绝对优势,占 71.5%,AMO 和 GW 的贡献只有 16.5%和 12.0%。

冬季,IPO 对墨西哥地区方差贡献最大,AMO 对加拿大、美国本土方差贡献最大,GW 对阿拉斯加地区方差贡献最大。

表 1 IPO、AMO、GW 对四个区域夏季陆地降水的总方差贡献和每个因子的相对方差贡献比例

Table 1 total variance contributions of IPO, AMO and GW to the low-frequency variability of land precipitation in JJA and the relative contributions of IPO, AMO and GW, respectively

	IPO+AMO+GW	IPO	AMO	GW
阿拉斯加	34.1%	14.2%	65.8%	20.0%
加拿大	30.0%	30.6%	24.9%	44.5%
美国本土	22.9%	27.6%	35.6%	36.8%
墨西哥	24.0%	30.6%	37.2%	32.2%

表 2 IPO、AMO、GW 对四个区域冬季陆地降水的总方差贡献和每个因子的相对方差贡献比例

Table 2 total variance contributions of IPO, AMO and GW to the low-frequency variability of land precipitation in DJF and the relative contributions of IPO, AMO and GW, respectively

	IPO+AMO+GW	IPO	AMO	GW
阿拉斯加	27.0%	18.2%	19.5%	62.3%
加拿大	29.3%	26.5%	28.8%	44.7%
美国本土	24.7%	47.9%	25.9%	26.2%
墨西哥	41.3%	71.5%	16.5%	12.0%

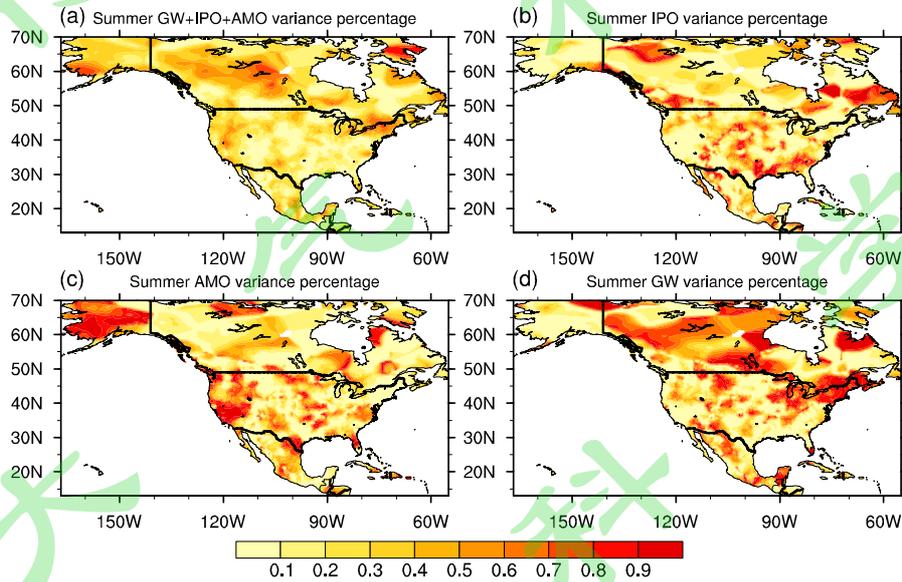


图9 1934-2018年IPO、AMO、GW指数对夏季CRU陆地降水的方差贡献分布图。(a) 为三者对降水可以解释的方差总贡献，(b)、(c)、(d) 分别为IPO、AMO和GW的相对方差贡献比例。

Fig.9 (a) Total variance contributions of IPO, AMO and GW to land precipitation from CRU in JJA season of 1934-2018, and relative contributions of (b) IPO, (c) AMO and (d) GW.

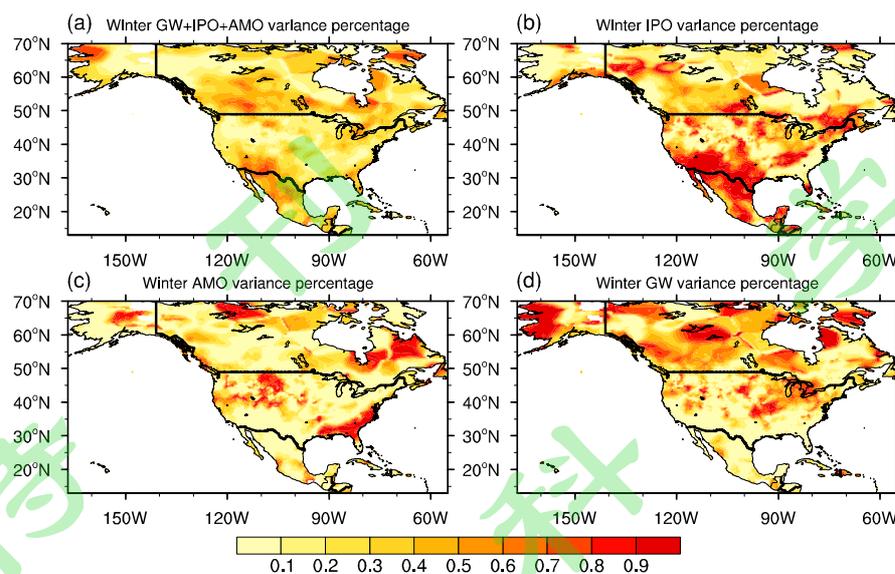


图10 1934-2018年IPO、AMO、GW指数对冬季CRU陆地降水的方差贡献分布图。(a)为三者对降水可以解释的方差总贡献，(b)、(c)、(d)分别为IPO、AMO和GW的相对方差贡献比例。

Fig.10 (a) Total variance contributions of IPO, AMO and GW to land precipitation from CRU in DJF of 1934-2018, and relative contributions of (b) IPO, (c) AMO and (d) GW.

### 3.4 IPO、AMO、GW 与北美陆地降水的因果分析

为了进一步确定 IPO、AMO、GW 的变化是否是北美陆地降水的原因，我们分别计算了 IPO、AMO、GW 对北美陆地夏半年（5-10月）和冬半年（11-4月）降水的信息流（为了保留更多的信息，这里取了夏半年和冬半年来做信息流分析）。由于信息流方法计算过程中的特殊性，未对 IPO、AMO 和 GW 指数以及月降水进行低通滤波，仅做去季节循环处理，并对结果进行显著性检验。

#### a. 夏季

图 11(a)、(c)、(e)表示 IPO、AMO 和 GW 对北美夏半年陆地降水的信息流分布。由图 11(a)可知，IPO 对美国中西部、加拿大中西部、哈德森海湾东部和墨西哥南部有一定的因果联系，也就是说 IPO 可以引起这些区域的降水变化，这与图 8 (a)、图 9 (b)中 IPO 对夏季降水的回归分布和方差相对贡献较大区域基本一致但也有一定的差别，这可能与我们为了消除误差取了更长的夏半年时间序列（冬半年的时间序列取为零）来做信息流有关。图 11(c)表示 AMO 对北美陆地夏半年降水的信息流分布，AMO 与阿拉斯加、加拿大萨斯喀彻温省北部、美国南部、墨西哥南部降水存在一定的因果联系。与图 8(c) 图 9(c) AMO 对夏季降水的回归分布和方差相对贡献较大区域基本一致。图 11(e) 为 GW 对北美陆地夏半年降水的信息流分布，GW 与阿拉斯加至五大湖地区西北东南向地域降水存在显著的因果联系，与

美国中东部，墨西哥降水也有一定的因果关系，GW 对北美陆地降水全年降水的方差贡献较大区域主要在阿拉斯加、加拿大、美国东北地区，和信息流的结果基本一致（图 9(c)），也基本对应了图 8(e)中与 GW 回归的北美夏季降水变化的显著区域。

## b. 冬季

图 11(b)、(d)、(f)表示 IPO、AMO 和 GW 对北美冬半年陆地降水的信息流分布。由图 11(b)可知，IPO 对美国南部、东部沿海及佛罗里达地区、墨西哥中北部降水有非常显著的因果联系，也就是说 IPO 可以引起这些区域的显著的降水变化，IPO 对加拿大和阿拉斯加地区的降水也有一定的因果联系，这与图 8 (b)、图 10 (b)中 IPO 对夏季降水的回归分布和方差相对贡献较大区域一致。图 11(d) 表示 AMO 对北美陆地冬半年降水的信息流分布，AMO 与哈德森湾附近、美国中东部和墨西哥中北部降水存在一定的因果联系。但相对于 IPO 的信息流，AMO 对降水的影响要弱很多，且与图 8(c) 图 10(c) 中 AMO 的回归系数分布和方差贡献较大分布也有一定的差异。图 11(f) 为 GW 对北美陆地冬半年降水的信息流分布，GW 与阿拉斯加北部至五大湖地区西北东南向地域降水存在一定的因果联系，且与图 8(f) 图 10(d) 中 GW 对冬季降水的回归分布和方差相对贡献较大区域一致。

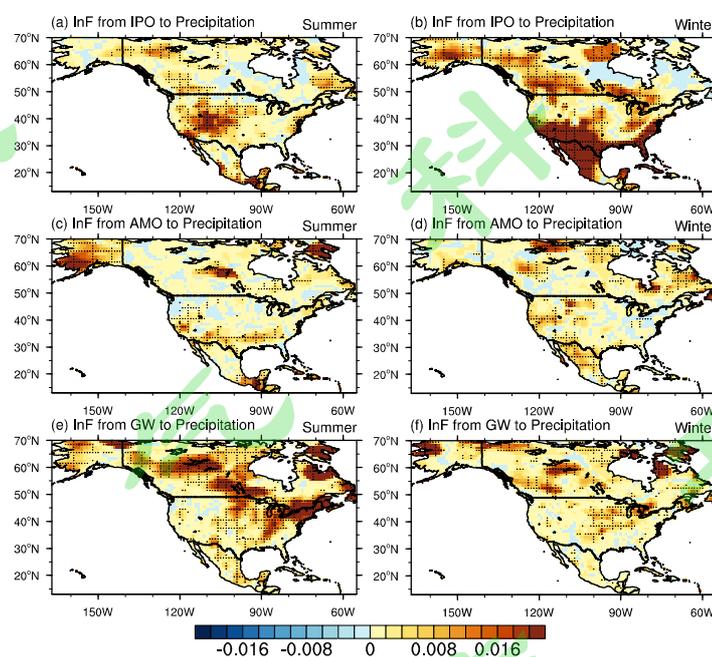


图11 (a) IPO、(c) AMO、(e) GW对北美夏半年（5-10月）陆地降水信息流分布；(b) IPO、(d) AMO、(f) GW对北美冬半年（11-4月）陆地降水信息流分布。

Fig.11 Information flow from (a) IPO, (c) AMO and (e) GW to CRU land precipitation in May-October. Information flow from (d) IPO, (e) AMO and (f) GW to CRU land precipitation in November-April.

信息流结果与 SVD、回归结果的一致性进一步验证了 IPO、AMO、GW 的变化是北美陆地降水的原因。且这三个因子在不同季节，作用的范围和强度是不同的。

### 3.5 AMO 与 IPO 对降水变化影响的敏感性试验分析

为了进一步研究 AMO 和 IPO 对陆地降水年代际变化的影响，我们使用 ECHAM 4.6 版 AGCM 进行了五组 SST 敏感性对照试验。如表 3 所示。控制试验 (CTL 试验) 利用观测 SST 气候场驱动 ECHAM4.6 大气环流模式。图 12 给出了经过 Lanczos 低通滤波 IPO 和 AMO 对全球 SST 的回归分布。由图可见，与 IPO 相关的 SST 模态在太平洋上表现经典的类 ElNino 型。印度洋区域的海温也表现出显著的正异常模态，许多研究中都表明印度洋的年代际/年代际变化与 IPO 高度相关 (Cole et al., 2000; Han et al., 2014; Dong et al., 2016)。AMO 的正位相表现为与北大西洋上空的整个海盆海温相关。在热带印度洋和整个太平洋上也有正相关。Mohino et al. (2011) 研究表明，AMO 的正相对应着热带印度洋上的较冷 SST。但是，他通过加入北大西洋上的正 SST 异常强迫和热带印度洋上的负 SST 异常强迫未能获得萨赫勒地区降水的增加。Zhang and Delworth (2006) 用 hybrid 耦合模式得到了萨赫勒地区的湿/干旱模态。在我们的研究中，除非在热带印度洋上同样加入正 (负) SST 强迫，否则无法通过仅对北大西洋施加正 (负) SST 异常强迫来得到萨赫勒地区的湿 (干旱) 模式。

表 3 ECHAME4 试验的设计方案

Table 3 Summary of the ECHAM4 model experiments

试验名称		SST 异常区域
控制试验		观测 SST 气候态
AMO 试验	warm AMO_NA	加上或者减去北大西洋 SST 正异常
	cold AMO_NA	
	warm AMO_NAI	加上或者减去北大西洋和印度洋 SST 正异常
	cold AMO_NAI	
IPO 试验	warm IPO_TP	加上或者减去热带太平洋 SST 正异常
	cold IPO_TP	
	warm IPO_TPI	加上或者减去热带太平洋和印度洋 SST 正异常
	cold IPO_TPI	

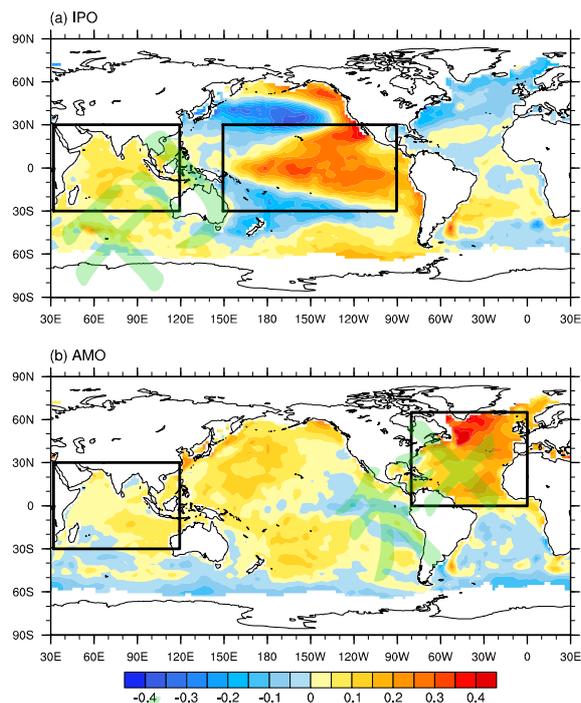


图12 SST对 (a) IPO和 (b) AMO指数的回归场 (单位: °C)。图中矩形区域表示敏感性试验中所加SST异常的范围.

Fig.12 Regressed SST (°C) onto (a) IPO and (b) AMO index. The rectangular boxes are the specified SSTA domains.

对于其他四组敏感性实验 (表 3), 驱动 ECHAM 4.6 模式的 SST 强迫场为观测的气候态加上或者减去 SST 回归场中不同区域的 SST 正异常。暖异常试验包括:

- IPO\_TP 试验: 将热带太平洋 (30°S-30°N, 150°E-90°W) 范围内的正 SST 异常叠加到气候态 SST 场中。
- IPO\_TPI 试验, 将热带太平洋 (30°S-30°N, 150°E-90°W) 和热带印度洋 (30°S-30°N, 30°E-120°E) 的正 SST 异常叠加到气候态 SST 场中。
- AMO\_NT 试验: 将北大西洋 (0-65°N, 80°W-0) 范围内的正 SST 异常叠加到气候态 SST 场中;
- AMO\_NTI 试验: 将北大西洋 (0-65°N, 80°W-0) 和热带印度洋 (30°S-30°N, 30°E-120°E) 上的正海温异常叠加到气候态 SST 场中;

同时, 我们还进行了冷异常试验, 即从观察 SST 气候态场中减去指定范围内的正 SST 异常。每个试验都积分了 30 年, 取后 20 年的结果进行下一步分析, 相当于 20 个统计样本的一个集合平均。下面分析结果均为暖异常试验结果减去冷异常试验结果得到。

---

由于 IPO 的方差贡献主要在 12-2 月期间, 所以我们重点分析冬季。如图 13(d)所示, 在 IPO\_TPI 试验中的冬季, 加拿大东北部、美国南部、墨西哥降水异常偏多, 加拿大与美国接壤处降水异常偏少, 这与观测资料分析得到的结果(图 8(b))基本一致, 两者空间相关系数为 0.64。而 IPO\_TP 的试验结果(图 13(b))与图 8(b)得到的分析结果差别较大, 空间相关系数仅为 0.20, 在美国中东部模拟出明显的降水正异常。在 IPO 正位相期间的夏季, IPO\_TP 试验和 IPO\_TPI 试验结果均不佳, 与图 8(a)得到的结果差别较大, 两者空间相关系数分别只有 -0.05, 0.05。分析相应的 500 hPa 环流场, 我们发现由于印度洋 SSTA 的参与, 在 IPO\_TPI 试验中冬季(图 13(d))北太平洋上空的气旋性异常与北美大陆反气旋异常较 IPO\_TP(图 13(b))偏南, 这样使得降水偏多区域偏南位于美国南部和墨西哥, 与观测较为一致(图 15(b))。

在 AMO\_NAI 试验的夏季(图 14(c)), 加拿大中部降水偏少, 阿拉斯加北岸降水偏多, 美国西海岸降水负异常, 东海岸正异常, 这与观测资料得到的分析结果(348)图 8(c))大体相同。而 AMO\_NA 的试验(图 14(a))在加拿大中北部模拟出的降水为正异常, 圣劳伦斯湾附近降水负异常, 与观测资料分析结果差别较大。分析相应的 500 hPa 环流场, 我们发现由于印度洋 SSTA 的参与, 在 AMO\_TPI 试验中夏季(图 14(c))北大西洋上空的副热带气旋性异常与 50°N 左右的反气旋异常以及北美大陆反气旋异常较 AMO\_TP(图 14(a))与观测更为一致(图 15(c))。在 AMO 正位相期间的冬季, AMO\_NA 试验和 AMO\_NAI 试验结果均不佳, 与观测差别较大, 与图 8(d)北美冬季降水回归场的空间相关系数分别为 -0.30, -0.16。由于 AMO 的方差贡献主要在夏季期间, 所以我们重点关注 AMO\_NAI 和 AMO\_NA 的夏季试验结果。

大气环流的数值试验结果表明印度洋 SST 在 AMO 和 IPO 对北美陆地降水变化的作用中不可忽视。

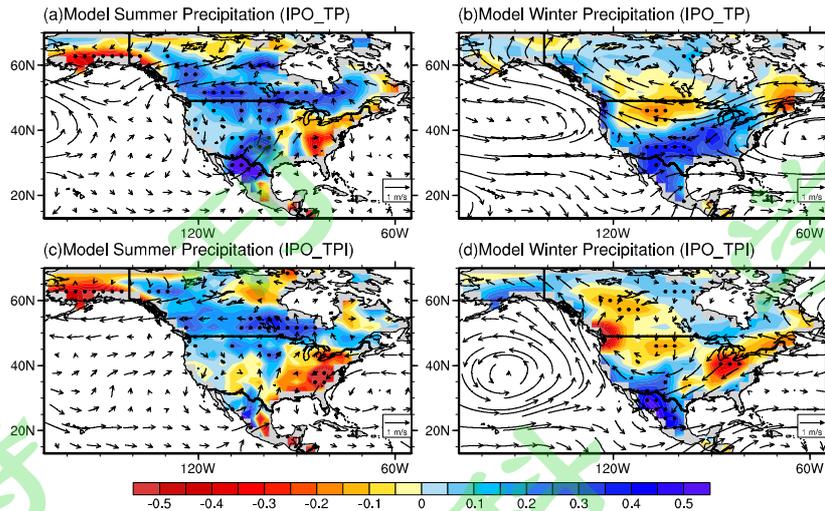


图 13 IPO\_TP (a, b) 和 IPO\_TPI (c, d) 敏感性试验 (暖试验减去冷试验) 中北美夏 (左列)、冬 (右列) 降水异常和 500 hPa 风场异常。打点区域为通过  $\alpha=0.10$  信度检验区域。

Fig.13 Simulated precipitation anomalies and 500-hPa wind anomalies in JJA (left column) and DJF (right column) seasons for the IPO\_TP experiment (a, b) and IPO\_TPI experiment (c, d). The experiment refers to the warm run minus the cold run. The areas with dots are statistically significant at the 0.10 level.

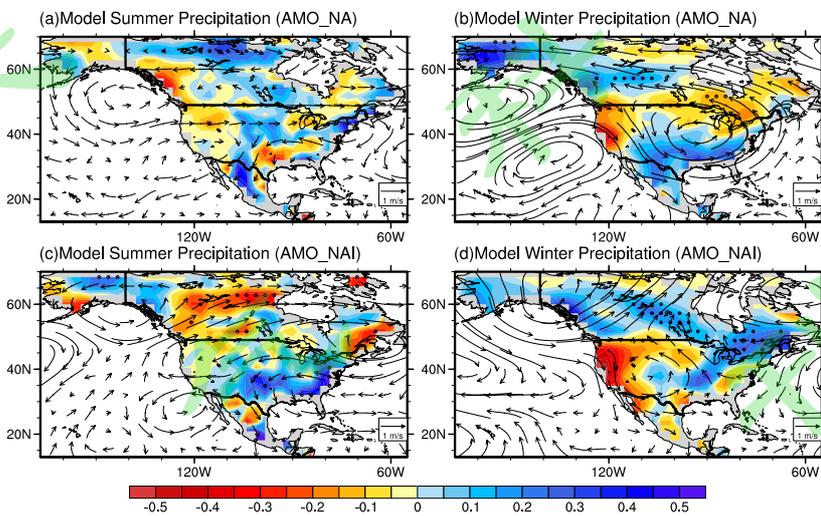


图 14 AMO\_NA(a, b) 和 AMO\_NAI(c, d) 敏感性试验 (暖试验减去冷试验) 中北美夏 (左列)、冬 (右列) 降水异常和 500 hPa 风场异常。打点区域为通过  $\alpha=0.10$  信度检验区域。

Fig.14 Simulated precipitation anomalies and 500-hPa wind anomalies in JJA (left column) and DJF (right column) seasons for the AMO\_NA experiment (a, b) and IPO\_NAI experiment (c, d). The experiment refers to the warm run minus the cold run. The areas with dots are statistically significant at the 0.10 level.

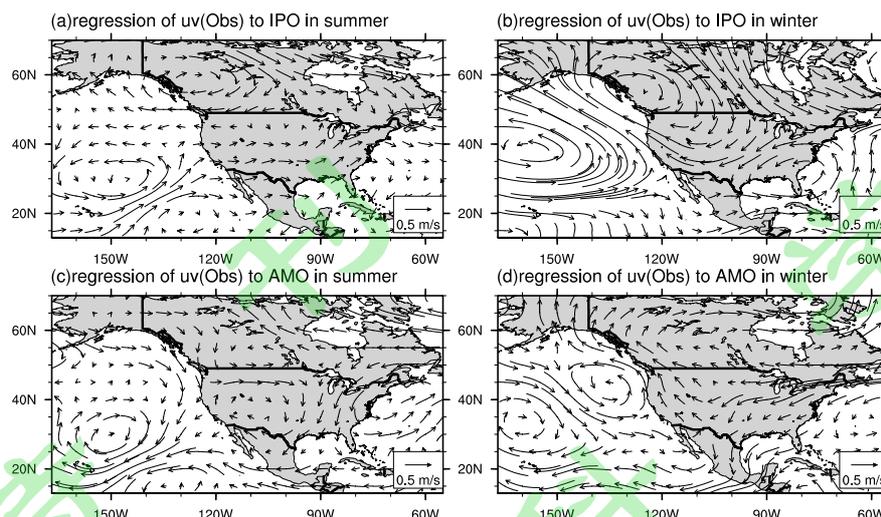


图 15 500 hPa 夏季（左列）、冬季（右列）风场对 IPO（a、b）、AMO（c、d）指数的线性回归分布。

Fig. 15 Regressed wind (500hPa) in JJA (left column) and DJF seasons (right column) onto to the normalized indices of IPO (a, b), AMO (c, d).

## 4 结论与讨论

本文探究了 IPO、AMO、全球变暖对北美地区降水的相对贡献，通过 SVD 分析，初步确认了影响夏季北美陆地降水变化的前两个海温模态为 AMO、IPO，影响冬季北美陆地降水变化的前两个海温模态为 IPO、AMO。

通过多元线性回归分析，确定了 IPO、AMO、GW 对北美陆地降水不同区域的相对重要性。在夏季，阿拉斯加地区 AMO 对方差贡献最大，达到 65.8%；加拿大地区 GW 对方差贡献最大，达到 44.5%；美国本土 GW 和 AMO 贡献相当，分别为：36.8%、35.6%；墨西哥地区 AMO 对方差贡献最大，为 37.2%。在冬季，阿拉斯加地区 GW 贡献最大，达到 62.3%；加拿大地区 GW 对方差贡献也最大，达到 44.7%；美国本土、墨西哥地区 IPO 贡献最大，分别达到了 47.9%和 71.5%。

我们进一步利用信息流方法分析 IPO、AMO、GW 对全年降水的敏感性区域，结果显示 IPO 对美国西南部降水的信息流最为显著，除此之外 IPO 对加拿大各湖流域、阿拉斯加也有一定的信息流显著区域；AMO 对北美陆地降水信息流显著范围较小，只与美国南部大范围降水存在一定的因果联系；GW 对加拿大美国中部、东北部降水信息流显著。这些 IPO、AMO、GW 对北美降水的敏感性区域与方差分析中 IPO、AMO、GW 对北美降水的贡献大的区域基本一致。

运用全球大气环流模式 ECHAM 4.6 分析太平洋和大西洋海温异常对北美地区陆地降水

---

变化的影响,结果表明印度洋 SST 在 AMO 和 IPO 对北美陆地降水变化的作用中至关重要。

另外,通过本文的分析说明美国本土的干旱可以用 IPO 解释,AMO 和 GW 也有一定的贡献,但是较小。2007-2013 是 IPO 负位相阶段,也是 AMO 的正位相阶段,可以造成美国本土西南部冬季夏季降水均减少,造成干旱频数增多,这与前人的研究基本一致(e.g. McCabe et al. 2004; Diffenbaugh et al., 2015; Benson et al. 2003)。而 2014-2019 年是 PDO 的正位相阶段,对于 2013-2014 的加州大旱, Wang et al. (2014) 研究认为与 250hPa 加州附近的脊、美国东北部的槽这种偶极子型有关,这种偶极子型与 ENSO 或 PDO/IPO 都没有直接联系,相反,它与 ENSO 的前兆信号有关,且 20 世纪 70 年代以来,这种偶极子型和 ENSO 前兆信号之间的联系变得更加紧密,数值试验表明这是由于温室气体增加所致。2014-2017 年的加州大旱可能与这个偶极子有关,这需要进一步继续深入分析。

## 参考文献

- Arias P A, Fu R, Mo K C. 2012. Decadal variation of rainfall seasonality in the North American monsoon region and its potential causes[J]. *J. Climate*, 25(12): 4258-4274. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00140.1.
- Benson L, Linsley B, Smoot J, et al. 2003. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on the climate of the Sierra Nevada, California and Nevada[J]. *Quaternary Res.*, 59(2): 151-159. doi: 10.1016/S0033-5894(03)00007-3.
- Cole J E, Dunbar B, Mcclanahan T R, et al. 2000. Tropical Pacific Forcing of Decadal SST Variability in the Western Indian Ocean over the Past Two Centuries[J]. *Science*, 287: 617-619. doi: 10.1126/science.287.5453.617.
- 邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系[J]. *大气科学*, 33(4): 835-846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(4): 835-846. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.16.
- Dai A. 2013. The influence of the inter-decadal Pacific oscillation on US precipitation during 1923-2010[J]. *Climate Dyn.*, 41(3-4): 633-646. doi: 10.1007/s00382-012-1446-5.
- Dai A, Fung I Y, Delgenio A D. 1997. Surface Observed Global Land Precipitation Variations during 1900-88[J]. *J. Climate*, 10(11): 2943-2962. doi: 10.1175/1520-0442(1997)0102.0.CO;2.
- Dong B, Dai A. 2015. The influence of the interdecadal Pacific oscillation on temperature and precipitation over the globe[J]. *Climate Dyn.*, 45(9-10): 2667-2681. doi: 10.1007/s00382-015-2500-x.
- Dong B, Sutton R T, Scaife A A. 2006. Multidecadal modulation of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) variance

- 
- by Atlantic Ocean sea surface temperatures[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(8): L08705. doi: 10.1029/2006gl025766.
- Douglas M W, Maddox R A, Howard K, et al. 1993. The mexican monsoon[J]. *J. Climate*, 6(8): 1665-1677. doi: 10.1175/1520-0442(1993)0062.0.CO;2.
- Diffenbaugh NS, Swain D L, Touma D. 2015. Anthropogenic warming has increased drought risk in California[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 112(13): 3931-3936. doi: 10.1073/pnas.1422385112.
- Emori S, Brown S J. 2005. Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(17): L17706. doi: 10.1029/2005GL023272.
- Goly A, Teegavarapu R S V. 2014. Individual and coupled influences of AMO and ENSO on regional precipitation characteristics and extremes[J]. *Water Resour. Res.*, 50(6): 4686–4709. doi: 10.1002/2013WR014540.
- Gu G J, Adler R F, Huffman G J, et al. 2007. Tropical Rainfall Variability on Interannual-to-Interdecadal and Longer Time Scales Derived from the GPCP Monthly Product[J]. *J. Climate*, 20(15): 4033–4046. doi: 10.1175/JCLI4227.1.
- Gu G J, Adler R F. 2015. Spatial Patterns of Global Precipitation Change and Variability during 1901–2010[J]. *J. Climate*, 28(11): 4431–4453. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00201.1.
- Han W, Vialard J, McPhaden M J, et al. 2014. Indian Ocean Decadal Variability: A Review[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95(11): 1679-1703. doi: 10.1175/BAMS-D-13-00028.1.
- Held I M, Soden B J. 2006. Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming[J]. *J. Climate*, 19(21): 5686–5699. doi: 10.1175/JCLI3990.1.
- Hu Q, Feng S, Oglesby R J. 2011. Variations in North American summer precipitation driven by the Atlantic Multidecadal Oscillation[J]. *J. Climate*, 24(21): 5555-5570. doi: 10.1175/2011JCLI4060.1.
- Hu Q, Feng S. 2008. Variation of the North American summer monsoon regimes and the Atlantic multidecadal oscillation[J]. *J. Climate*, 21(11): 2371-2383. doi: 10.1175/2007jcli2005.1.
- Hennessy K J, Gregory J M, Mitchell J F B. 1997. Changes in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions[J]. *Climate Dyn.*, 13(9): 667-680. doi: 10.1007/s003820050189.
- Higgins R W, Yao Y, Wang X L. 1997. Influence of the North American monsoon system on the US summer precipitation regime[J]. *J. Climate*, 10(10): 2600-2622. doi: 10.1175/1520-0442(1997)0102.0.CO;2 .
- Knight J R, Folland C K, Scaife A A. 2006. Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(17). doi: 10.1029/2006GL026242.
- Kerr R A. 2007. A North Atlantic Climate Pacemaker for the Centuries[J]. *Science*, 288: 1984-1985. doi: 10.1126/science.288.5473.1984.

- 
- Kunkel K E. 2003. North American trends in extreme precipitation[J]. *Nat. Hazards*, 29(2): 291-305. doi: 10.1023/A:1023694115864.
- 李双林, 王彦明, 郜永祺. 2009. 北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述[J]. *大气科学学报*, 32(3): 458-465. Li Shuanglin, Wang Yanming, Gao Yongqi. 2009. A Review of the Researches on the Atlantic Multidecadal Oscillation(AMO) and Its Climate Influence[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(3): 458-465. doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2009.03.014.
- Liang X. 2014. Unraveling the cause-effect relation between time series[J]. *Phys. Rev. E*, 90(5): 052150. doi: 10.1103/PhysRevE.90.052150.
- Ma W, Norris J, Chen G. 2019. Projected Changes to Extreme Precipitation along North American West Coast from the CESM Large Ensemble[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47. doi: 10.1029/2019GL086038.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(6): 1069-1079. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2.
- McCabe G J, Palecki M A, Betancourt J L. 2004. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 101(12): p.4136-4141. doi: 10.1073/pnas.0306738101.
- Meehl G A, Hu A. 2006. Megadroughts in the Indian monsoon region and southwest North America and a mechanism for associated multidecadal Pacific sea surface temperature anomalies[J]. *J. Climate*, 19(9): 1605-1623. doi: 10.1175/JCLI3675.1.
- Mohino E, Janicot S, Bader J. 2011. Sahel rainfall and decadal to multi-decadal sea surface temperature variability[J]. *Climate Dyn.*, 37(3-4): 419-440. doi: 10.1007/s00382-010-0867-2.
- Newman M, Compo G P, Alexander M A. 2003. ENSO-Forced Variability of the Pacific Decadal Oscillation[J]. *J. Climate*, 16(23): 3853-3857. doi: 10.1175/1520-0442(2003)0162.0.CO;2.
- Roeckner E, Arpe K, Bengtsson L, et al. 1996. The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate[M]. Max-Planck-Institut für Meteorologie Rep, 218, 94pp.
- 施能, 陈绿文, 封国林, 等. 2004. 1920-2000 年全球陆地降水气候特征与变化[J]. *高原气象*, 23(4): 435-443. Shi Neng, Chen Lvwen, Feng Gonglin. 2004. Climate Characters and Changes in Global Land Precipitation Field From 1920 to 2000[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23(4): 435-443. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2004.04.003.
- 孙雪倩, 李双林, 孙即霖, 等. 2018. 北大西洋多年年代际振荡正、负位相期间欧亚夏季副热带波列季节内活动

- 
- 特征及与印度降水的联系[J]. 大气科学, 42(5): 1067-1080. Sun Xueqian, Li Shuanglin, Sun Jilin, et al. 2018.
- Differences in intraseasonal activity of Eurasian subtropical zonal wave train and associated Indian summer rainfall in two opposite AMO phases[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(5): 1067-1080. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17177.
- Schlesinger M E, Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years[J]. Nature, 367(64665): 723-726. doi: 10.1038/367723a0.
- Smith T M, Yin X G, Gruber A. 2006. Variations in annual global precipitation (1979-2004), based on the Global Precipitation Climatology Project 2.5° analysis[J]. Geophys. Res. Lett., 33(3): L06705. doi: 10.1029/2005gl025393.
- Sutton R T, Hodson D L R. 2005. Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate[J]. Science, 309(5731): 115-118. doi: 10.1126/science.1109496.
- Wang S-Y, Hipps L, Gillies R R, and Yoon J-H. 2014. Probable causes of the abnormal ridge accompanying the 2013-2014 California drought: ENSO precursor and anthropogenic warming footprint[J]. Geophys. Res. Lett., 41(9): 3220-3226. doi:10.1002/2014GL059748.
- Warner M D, Mass C F, Salathé E P. 2015. Changes in winter atmospheric rivers along the North American west coast in CMIP5 climate models[J]. Journal of Hydrol., 16(1): 118-128. doi: 10.1175/JHM-D-14-0080.1.
- Wilby R L, Wigley T M L. 2002. Future changes in the distribution of daily precipitation totals across North America[J]. Geophys. Res. Lett., 29(7): 39-1-39-4. doi: 10.1029/2001GL013048.
- Xu Y, Hu A. 2018. How would the twenty-first-century warming influence Pacific decadal variability and its connection to North American rainfall: assessment based on a revised procedure for the IPO/PDO[J]. J. Climate, 31(4): 1547-1563. doi: 10.1175/jcli-d-17-0319.1.
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展[J]. 大气科学, 28(006): 979-992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. 2004. Advances in studies of Pacific Decadal Oscillation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(006): 979-992. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.15.
- 杨朝虹, 张镭, 苑广辉, 等. 2018. 东亚和北美地区温度和降水变化特征[J]. 高原气象, 037(003): 662-674. Yang ZhaoHong, Zhang Lei, Yuan Guanghui, et al. 2018. Characteristics of Temperature and Precipitation in East Asia and North America[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 037(003): 662-674. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00083.
- 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 Meteor. Sinica (in Chinese), 61(6): 641–654. doi:10.11676/qxxb2003.065.

Zhang, R, Delworth T L. 2006. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes[J]. Geophys. Res. Lett., 33(17): 123-154. doi: 10.1029/2006GL026267.

Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. Nature, 448(7152): 461–465. doi: 10.1038/nature06025.

Zhang Y, Wallace JM, Battisti DS. 1997. ENSO-like Interdecadal Variability: 1900–93[J]. J. Climate, 10(5):1004-1020. doi: 10.1175/1520-0442(1997)0102.0.CO;2.

第

科

风

第

十

科

风

刊

十

第