arXiv:2302.11465v1 [physics.data-an] 22 Feb 2023

利用机器学习理解澳大利亚西南部气候变化的复杂动态

Alka Ya dav[1,], SourishDas[2,*], KShuvoBakar[3]和 Anirban Chakraborti[1,4,*]

[1]贾瓦哈拉尔·尼赫鲁大学，计算与综合科学学院，新德里-110067，印度[2]金奈数学研究所，金奈-603103，印度[3]悉尼大学公共卫生学院，澳大利亚新南威尔士州 2006[4]BML Munjal大学，工程与技术学院，古鲁格拉姆-122413，印度[*]sourish@cmi.ac.in[*]anirban.chakraborti@bmu.edu.in

摘要

标准化降水指数（SPI）用于表征气象干旱状况——在一段时间内，某地区的 SPI 值为负（或正）意味着该地区处于干旱（或湿润）状态。气候系统是“复杂系统”的典型例子，因为多个气候变量之间存在相互作用和相互关联。识别可能影响 SPI 的因素及其相互关系（包括反馈回路）并非易事。本文旨在采用机器学习方法，研究 SPI 与海表温度（SST）、厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）（又称 NINO 3.4）以及印度洋偶极子（IOD）之间的复杂动态关系。我们的研究结果如下：（i）截至 2008 年，IOD 与 SPI 呈负相关；（ii）截至 2004 年，SST 与 SPI 呈负相关；（iii）从 2005 年到 2014 年，SST 与 SPI 的相关性在负相关和正相关之间变化；（iv）自 2014 年以来，我们观察到 SST 对应的回归系数（δ）始终为正；（v）SST 呈上升趋势，δ 的正向上升趋势表明，近年来 SPI 与 SST 呈正相关；最后，（vi）当前 SPI 值与约 7.5 年周期之前的 SPI 值呈显著正相关。为考察复杂动态关系，我们采用统计机器学习方法构建了这些气候变量的推断网络。结果显示，SST 和 NINO 3.4 与 SPI 直接耦合，而 IOD 则通过 SST 和 NINO 3.4 与 SPI 间接耦合。该系统还表明，尼诺 3.4 对 SPI 有显著的负面影响。有趣的是，NINO 3.4、IOD、SST 和 SPI 这四个气候变量的复杂动态关系似乎在 2008 年前后发生了结构变化。尽管 SPI 的简单 12个月移动平均呈现出趋向干旱的负趋势，但 SPI 与其他气候变量之间的复杂动态关系表明，澳大利亚西部将迎来一个湿润季节。

引言

全球气候变化影响大尺度大气环流异常，导致包括澳大利亚在内的世界许多地区出现气象干旱[1,2]。农业系统极易受到气候变量极端波动的影响。特别是在西澳大利亚，小麦[3] 和大田畜牧业[4] 生产受到关注。农业用水供应大幅减少，2010—2018年较2001—2009[5]年约减少了44%。根据气象局（BoM）的数据，千年之初和末期的年平均温度异常呈波动上升趋势[6]。同期降雨异常也呈现出类似模式[7]。鉴于干旱对农业、水资源和公共卫生具有严重影响，了解气候变化背景下干旱的复杂动态及其对生态系统的影响至关重要[8–11]。本文采用基于机器学习（ML）的方法，研究海表温度（SST）、厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）NINO 3.4、印度洋偶极子（IOD）等气候变量之间的复杂动态，以及它们对澳大利亚西南部标准化降水指数（SPI）的影响。西澳大利亚的农业总产值约占澳大利亚农业总产值的18%（约107亿澳元）[12],，粮食出口额约为40亿澳元[13]。干旱分为四种类型：气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱[14]。其中，气象干旱的特征是降水低于正常水平，并通过标准化降水指数进行测量。该指数用于说明干燥程度和干旱期的持续时间。通常，较低的标准化降水指数容易引发其他类型的干旱。

为了解气象干旱，McKee等(1993年)根据降雨量测量数据开发了标准化降水指数[15–17]。Wenhong等(2008年)指出，1970年至1999年间，亚马孙南部地区的标准化降水指数每十年下降0.32，表明干旱状况有所加剧[18]。Rengung等(2008年)基于标准化降水指数开展研究，并分析了

美国夏季干旱之间的关系[19]。气候因素也会影响气象干旱，例如，关于厄尔尼诺—南方涛动变率与澳大利亚干旱风险的简要综述便探讨了这一点[20]。研究报告了厄尔尼诺—南方涛动和印度洋偶极子循环的动态与气象干旱发生模式之间的关系[21]。Wen报告了厄尔尼诺—南方涛动对降水的直接影响等(2015年)[22]。

Loughran 等人 (2018)研究了厄尔尼诺—南方涛动如何耦合澳大利亚热浪的形成机制[23]。他们利用厄尔尼诺和拉尼娜条件下给定的海表温度特征，考察了影响澳大利亚热浪的厄尔尼诺—南方涛动大尺度变率模态[23]。Lee 等人(2009)指出，当时间滞后为0或1个月时，11月至次年2月的厄尔尼诺—南方涛动海表温度能够解释澳大利亚东部的大部分干旱信号[24]。Taschetto 等人(2009)利用峰值海表温度异常研究了厄尔尼诺—南方涛动对澳大利亚降雨的季节间影响[25]，，并发现1月至6月期间厄尔尼诺—南方涛动与印度洋偶极子东部的相关性为正，随后在7月至12月转为负相关[26]。Takeshi 等人(2014)指出，除已知的赤道太平洋暖水体积预调节作用外，印度洋偶极子也会影响厄尔尼诺—南方涛动的状态[27]。该研究还探讨了这一结果在1872年至 2008[27]期间的年代际稳健性。海表温度测量是影响澳大利亚降雨格局的重要因素[28]。Nicholls 等人 (1989)提出了一种基于机器学习的方法，对澳大利亚冬季（6月至8月）降雨进行旋转主成分分析，揭示了降水与印度洋及太平洋海表温度之间的相关性[28]。同样，其他研究也分析了海表温度、标准化降水指数和全球植被之间的联系[2,24,29,30]。

文献中用于理解干旱复杂动态的多变量方法较为有限。大多数研究分别关注 NINO 3.4 与海表温度之间、NINO 3.4 与印度洋偶极子之间的两两关系，或它们对标准化降水指数[23,24]的两两影响。本文采用基于机器学习的方法，探讨海表温度、NINO 3.4 和印度洋偶极子对标准化降水指数的综合遥相关作用。我们建立了格兰杰因果模型，以考察海表温度、印度洋偶极子和 NINO 3.4 与标准化降水指数之间的因果关系，并分析它们在澳大利亚西南部对标准化降水指数的综合影响。

Data

本研究使用了四个变量：澳大利亚区域的标准化降水指数、海表温度、NINO 3.4 和印度洋偶极子指数。NINO 3.4 和印度洋偶极子数据可从美国国家海洋和大气管理局网站获取[31]。月标准化降水指数根据澳大利亚西南部 194 个站点观测到的日降水量计算得出，相关数据从气象局（BOM）网站下载[32]。我们从美国国家海洋和大气管理局获取了澳大利亚区域的海表温度数据[33]。本研究所考虑区域的范围为经度 113.72 至 137.12、纬度 -26.70 至 -35.73。图（1）在澳大利亚地图上标出了 194 个雨量测站位置。本研究使用了覆盖 58 年（1961年至2018年）的标准化降水指数月度时间序列。由于海表温度数据从 1982年起才有，因此我们使用了 1982年至2018年期间海表温度、印度洋偶极子和尼诺 3.4 的月平均数据，并在这一时期开展了所有模型分析。

澳大利亚西南部的标准化降水指数

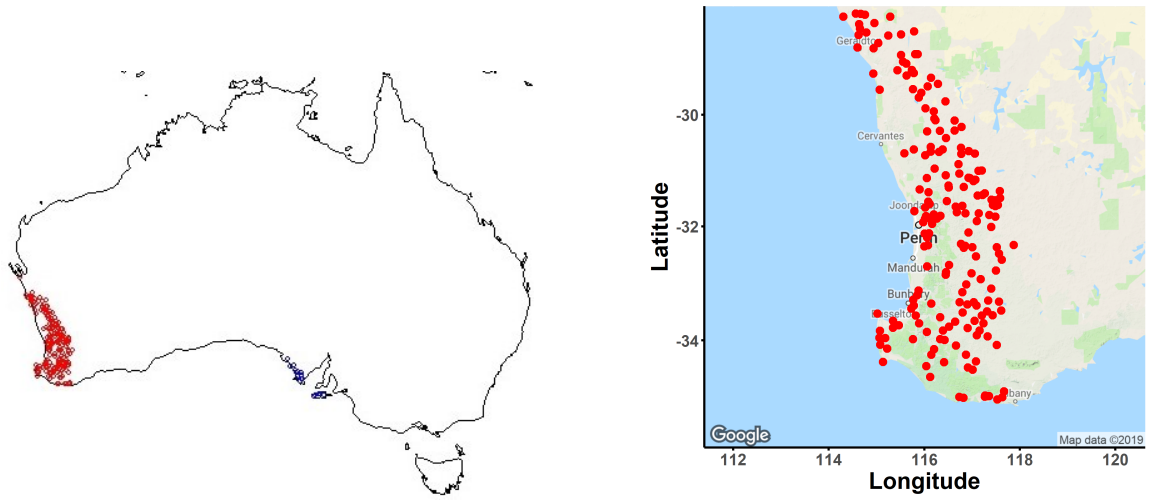
标准化降水指数是监测干旱的常用指数。1993年，McKee 等人提出了标准化降水指数的分类等级[15,34]。对于任何给定地点，标准化降水指数值都分为七种不同的等级（从湿润到干旱），如表（1）所示。标准化降水指数是一个无量纲指数，负值表示干旱，其中 -1 通常用作阈值；正值表示湿润状况。

图（2a）展示了澳大利亚西南部194个地点在58年间（1961年至2018年）的1个月标准化降水指数时间序列。图（2b）展示了该地点按12个月时段计算并采用年度移动平均的月标准化降水指数，该地点位于经度113。72、纬度 -26.70。从图中可以看出，12个月标准化降水指数序列的信噪比远高于1个月标准化降水指数序列。我们对全部194个监测站进行了检验，发现12个月序列的信噪比同样较高。因此，后续分析基于12个月标准化降水指数序列展开。较高的信噪比有助于降低分析的标准误[35]。

在澳大利亚西南部，10月至3月是季风期。因此，与其他月份相比，我们观察到标准化降水指数的变异性更高。图（3a）展示了所有194个站点在58年（1961年至2018年）间各月份的标准化降水指数平均值。图（3b）是所有194个站点在这58年间的相关矩阵。标准化降水指数相关矩阵的可视化结果表明，所有地点均存在空间相关。

结果

我们探究了1982年至2018年期间标准化降水指数与海表温度、NINO 3.4和印度洋偶极子的动态关系。图（4）分别展示了海表温度、NINO 3.4和印度洋偶极子的时间序列。我们发现，这些序列均为均值回复过程，即序列值在一段时间后会回归其均值。为检验这些序列是否具有长记忆，我们估算了赫斯特指数，该指数与时间序列的自相关有关。表（[36] 2）中的赫斯特指数系数表明，包括标准化降水指数在内的各变量均具有长记忆，因为其数值均高于0.5。



(a) (b)

图 1. (a) 澳大利亚地图上叠加显示了研究区域内的降雨测站位置。(b) 澳大利亚西南部 194 个测站位置的局部放大图。所考虑区域的范围为经度 113.72 至 137.12，纬度 -26.70 至 -35.73。

表 1. 标准化降水指数（标准化降水指数）的分类等级。

标准化降水指数范围	类别
2.00 及以上	极湿
1.50 至 1.99	很湿
1.00 至 1.49	中度湿润
- 0.99 至 0.99	接近正常
- 1.00 至 -1.49	中度干旱
- 1.50 至 -1 . 99	重度干旱
-2.00 及以下	极端干旱

表 2. 该表列出了所有指数（即标准化降水指数、印度洋偶极子、海表温度和 NINO 3.4）的赫斯特指数值。这些数值表明，该系统具有长记忆。

指数	赫斯特指数值
标准化降水指数（SPI）	0.71
厄尔尼诺-南方涛动（ENSO） NINO 3.4	0.66
印度洋偶极子（IOD）	0.69
海表温度（SST）	0.58

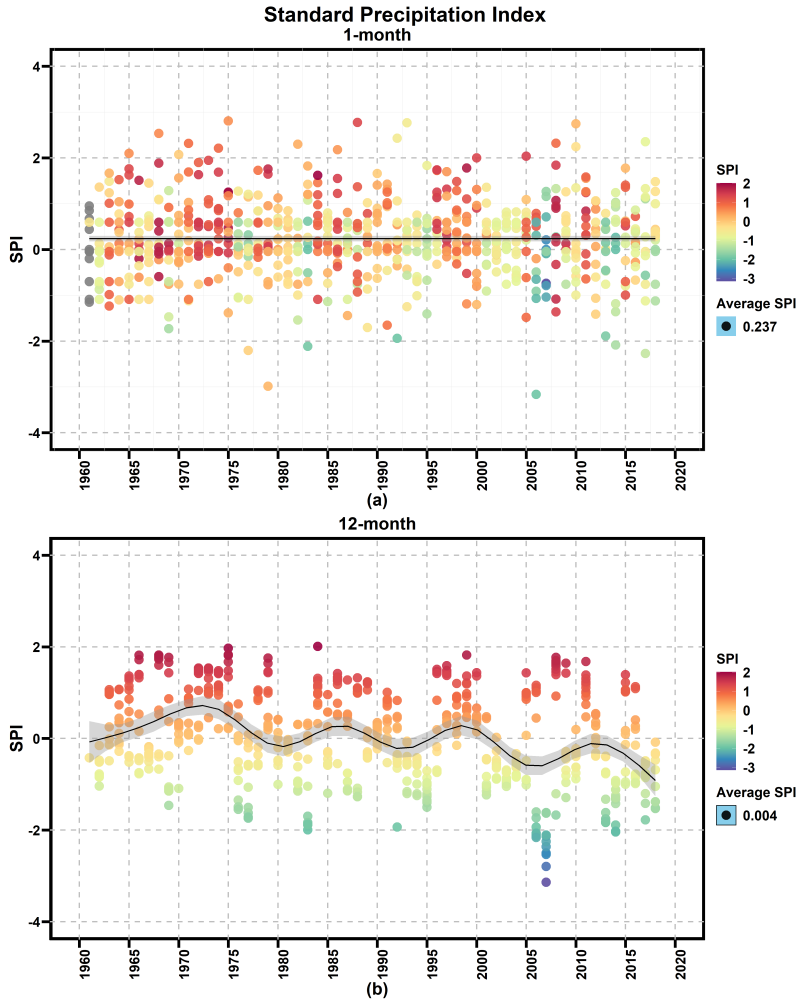


图 2. 58年（1961年—2018年）期间标准化降水指数（SPI）的 (a) 1个月和 (b) 12个月时间序列，以及12个月移动平均（黑色实线）。较高的信噪比有助于降低分析的标准误[35]。我们发现，SPI 12个月序列的信噪比远高于SPI 1个月序列。我们对全部194个监测站进行了检查，发现12个月序列的信噪比也普遍较高。因此，我们在分析中采用了SPI 12个月序列。

为研究其动态特征，我们考察了标准化降水指数、海表温度、印度洋偶极子和 NINO 3.4 变量时间序列之间的互相关函数（CCF），见图（5、6）。本分析将最大滞后设为 120 个月。图（5）展示了 1999—2008年期间的互相关函数，结果表明所有气候变量相互影响。因此形成了一个稠密网络，如图（7a）所示。图（6）展示了 2009—2018年期间的互相关函数，其中图（6a）表明标准化降水指数与海表温度相互影响。图（6b）展示了标准化降水指数与印度洋偶极子之间的互相关函数；结果表明，印度洋偶极子不会与标准化降水指数直接耦合。同样，从图（6c）可以看出，NINO 3.4 与标准化降水指数相互耦合。图（6d）和（6e）表明，印度洋偶极子分别与海表温度和 NINO 3.4 耦合，但反向耦合并不存在。图（6f）显示，NINO 3.4 与海表温度相互耦合。我们将 2009—2018年期间的这项分析以网络图的形式展示于图（7b）。

我们开发了一种混合模型，可捕捉标准化降水指数的长期记忆和短期记忆。该模型利用傅里叶谐波识别长期记忆。格兰杰因果模型捕捉标准化降水指数与其他变量（NINO 3.4、印度洋偶极子和海表温度）之间的短期记忆及因果关系。我们还通过高斯过程模型校正监测地点之间的空间相关性，从而对该方法进行了调整。基于所提出的模型，我们探讨了标准化降水指数的趋势，以检验研究区域是否正变得更加易旱或趋于湿润。方程（1）根据过去的数据估计每年的趋势（β_1）。例如，图（9）展示了所有194个地点在2017年12月和2018年12月的 β_1 系数。如果 $\beta_1 < 0$，某地点更可能出现干旱天气；而如果 $\beta_1 > 0$，则该地点更可能出现湿润状况。我们观察到，在这两年中，一些地点的干旱呈现轻微上升趋势，尤其是在内陆地区。我们还发现，沿海地区附近的一些地点具有 $\beta_1 \approx 0$，表明2017年12月和2018年12月不存在显著趋势。

基于历史数据[37], 的分析（见图7、8）表明，直到2008年，印度洋偶极子与标准化降水指数呈负相关。图（4b）显示，印度洋偶极子呈温和上升趋势。印度洋偶极子增强会导致标准化降水指数下降，也就是说，2008年前后，澳大利亚西南部遭遇了更严重的干旱状况。2008年之后，图（8c）显示，印度洋偶极子的回归系数在正值区域急剧上升。这意味着，在过去十年（2009—2018年），我们观察到印度洋偶极子与标准化降水指数之间的关系发生了逆转。如果图（8c）的趋势继续朝正方向发展，那么我们预计标准化降水指数将出现更多正值，这意味着澳大利亚西南部的干旱状况会减轻，湿润状况会增加。同样，从图（8b）可以看出，尼诺3.4在所有年份的贝塔值均为负值，即其与标准化降水指数呈负相关。这意味着标准化降水指数将处于正值范围，这也意味着澳大利亚西南部将更加湿润。图（8a）表明，海表温度与标准化降水指数彼此相关。由于海表温度呈上升趋势，标准化降水指数将处于正值范围，这意味着澳大利亚西南部将更加湿润。

方法论

为了了解气候变量 NINO 3.4、印度洋偶极子和海表温度与标准化降水指数之间的复杂动态，我们采用了不同的统计机器学习模型。格兰杰因果模型[38] 有助于判断一个时间序列是否能帮助估计另一个时间序列，也有助于捕捉系统的短期记忆。我们开发该模型，用于检验标准化降水指数、海表温度、NINO 3.4 和印度洋偶极子之间的因果关系。我们使用傅里叶级数模型，研究所有降雨监测地点的标准化降水指数的长期记忆。此处使用的傅里叶级数方法是函数型数据分析技术的一种特殊形式，用于捕捉长期记忆[39]。对于每个地点，我们都开发了一个混合统计模型：用傅里叶级数方法捕捉长期行为，并用格兰杰因果模型描述短期行为。我们还使用高斯过程（GP）模型校正了各地点之间空间相关性带来的估计偏差。我们使用以下算法来识别每条链的长记忆周期。

(i) 计算训练时间序列数据的自相关函数。

(ii) 确定周期 $P_1, P_2, \cdots, P_{m_s}$, 利用自相关 $\rho_m > s$, 其中 $s = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} |\rho_m - \hat{\rho}|$；$\rho_m$ 为m^{th}–滞后自相关；$\hat{\rho}$ 为所有自相关值的中位数；M 为研究中考虑的最大滞后。

图（11）展示了某个地点（坐标：经度 116.45、纬度 -32.85）的自相关图，其最大滞后为 400 月。我们使用了从 1973 年6月 到 2010年11月 的 450 个月数据来计算自相关函数。通过应用该算法，我们确定了四个周期：91、183、263 和 289 月。前三个周期表明，当前标准化降水指数的值与过去的标准化降水指数值存在显著正相关，周期性约为 7.5 年。详细调查显示，在所有 194个地点 中，周期数有所不同，平均值约为 148 月（约 12 年），标准差为 103.15 月。图（11）是研究区域 194个地点 中一个地点的代表性图。我们对全部 194个地点 重复了这一过程，并确定了每个地点的长记忆周期性。

图（12）显示了西澳大利亚地图上全部194个地点的长记忆周期。长记忆周期范围为60个月至360个月，显然，我们可以看到很强的空间相关性。识别该周期有助于我们分析季节性。对于每个地点，我们使用450个月的数据，时间范围从1973年6月至2010年11月。

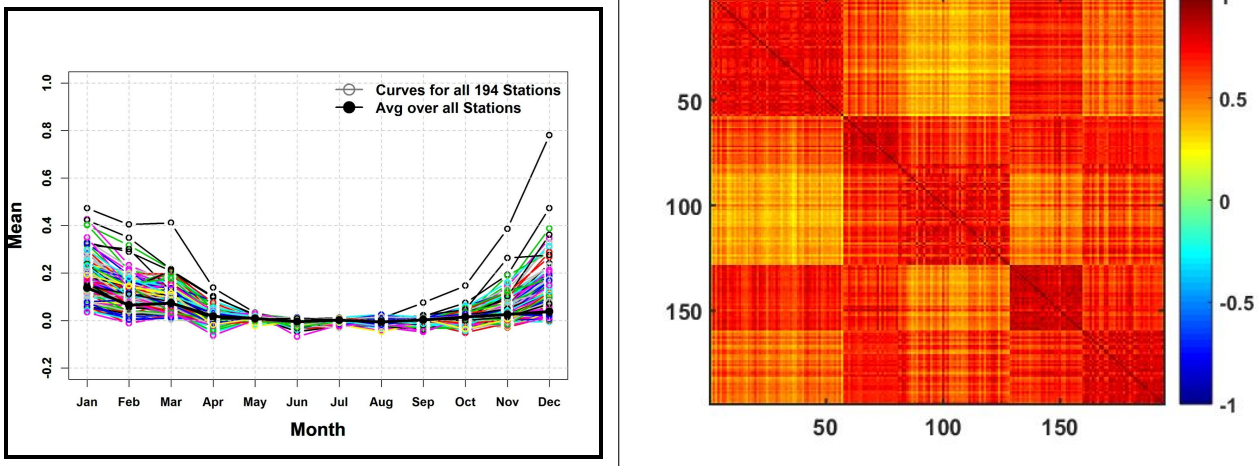


图3. (a) 澳大利亚西南部各地点1961年至2018年这58年间所有月份的标准化降水指数（标准化降水指数）平均值图。黑色粗曲线表示全部194条曲线的平均值。(b) 194个地点的标准化降水指数相关矩阵的可视化表示。该相关矩阵表明，所有地点均存在空间相关性。

不同组合	类型 I	Type II	Type III	Type IV
无空间更正	1.26	0.49	0.51	0.38
带空间校正	0.96	0.45	0.46	0.37
LASSO 选定模型采用空间校正	0.77	0.35	0.34	0.34

表 3. 2010年12月至2018年11月（8 年）期间，四种模型的样本外均方根误差（RMSE）值。此处，标准化降水指数（SPI）为目标变量。各类模型的简要说明如下：类型 I：仅使用傅里叶级数方法捕捉长期记忆；类型 II：尼诺 3.4 和印度洋偶极子（IOD）为协变量；类型 III：尼诺 3.4 和印度洋偶极子的滞后值为协变量；类型 IV：尼诺、印度洋偶极子和海表温度（SST）为协变量。可以看到，在采用 LASSO 和高斯过程校正时，类型 III 和类型 IV 的 SPI 估算均得到 0.34 的最低（最佳）RMSE 值。

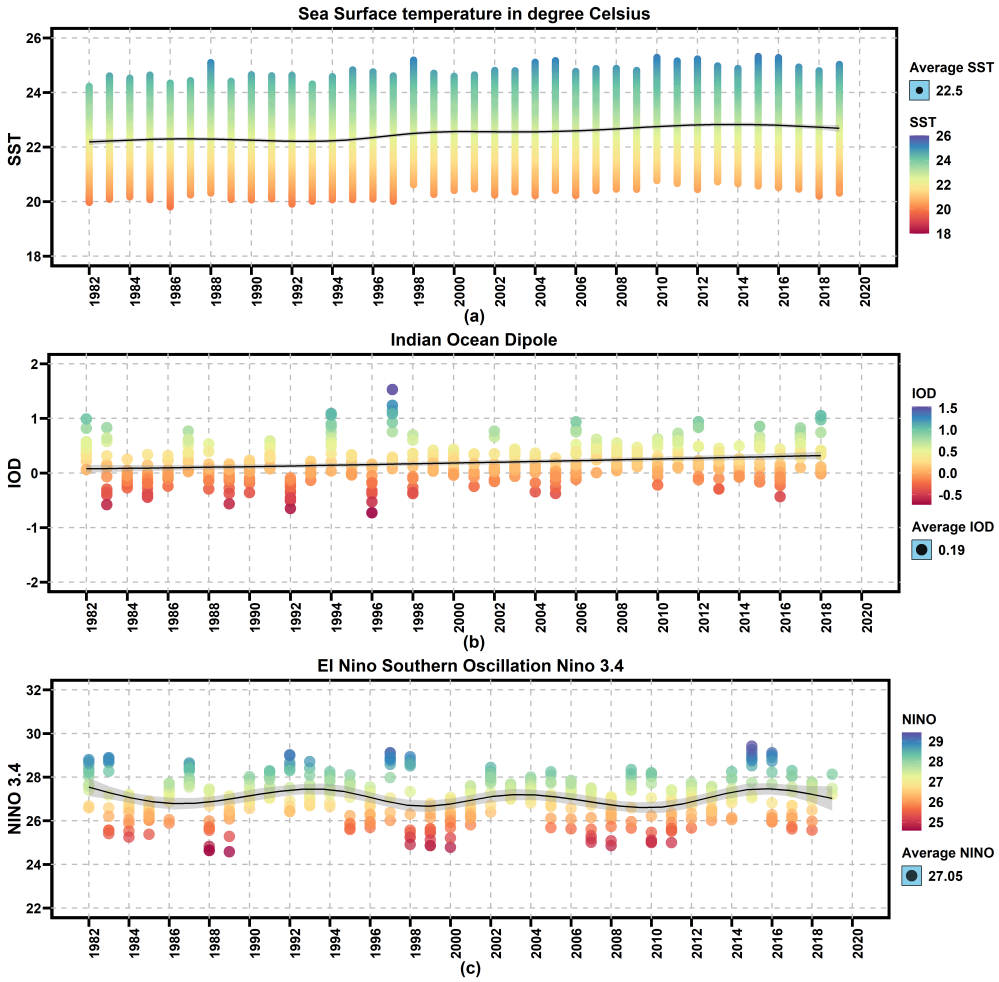


图 4。 澳大利亚西南部 37 年（1982—2018年）海表温度（SST）（a）、印度洋偶极子（IOD）（b）和厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）NINO 3.4（c）的时间序列图。黑色曲线为三年移动平均。

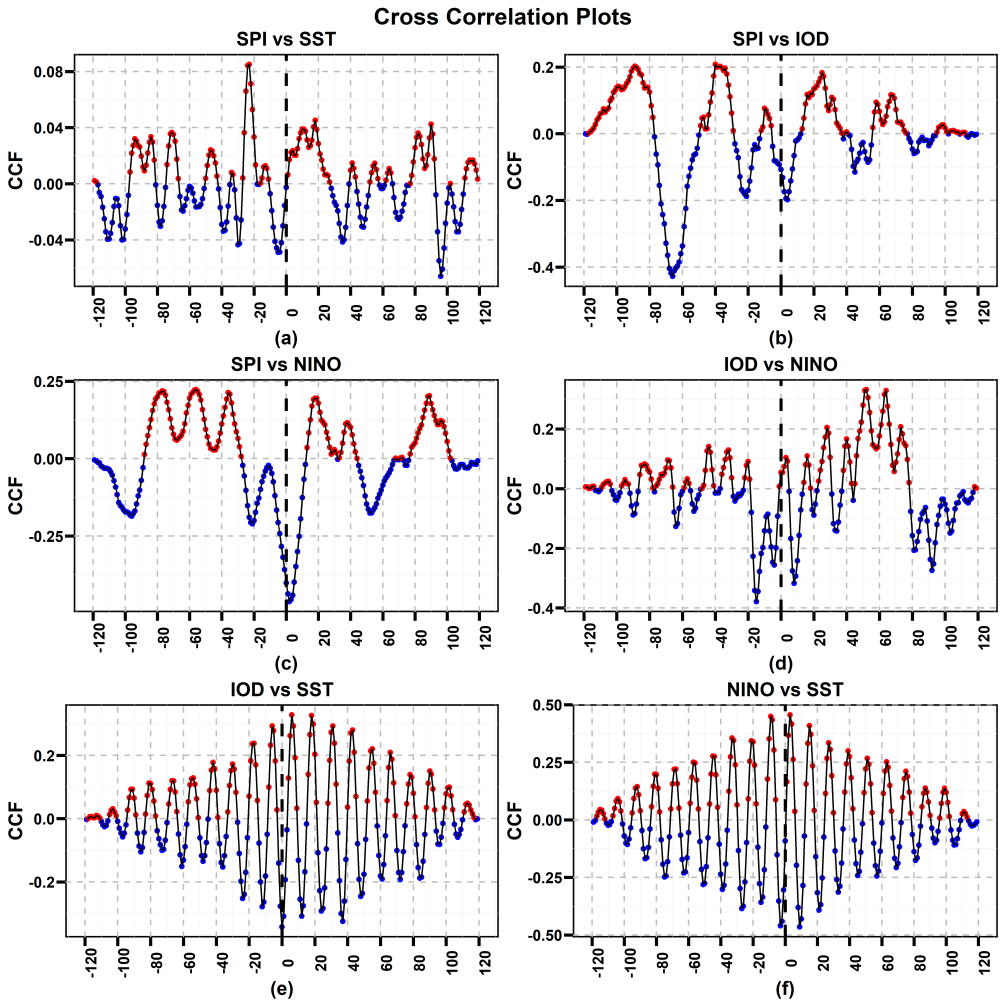


图 5. 对于1999年至2008年：滞后为120时，(a) 标准化降水指数（SPI）与海表温度（SST）、(b) SPI与印度洋偶极子（IOD）、(c) SPI与NINO 3.4、(d) IOD与NINO 3.4、(e) IOD与SST、(f) 尼诺与SST之间的互相关函数（CCF）图。互相关系数足够显著，表明这些指数之间均存在显著影响。

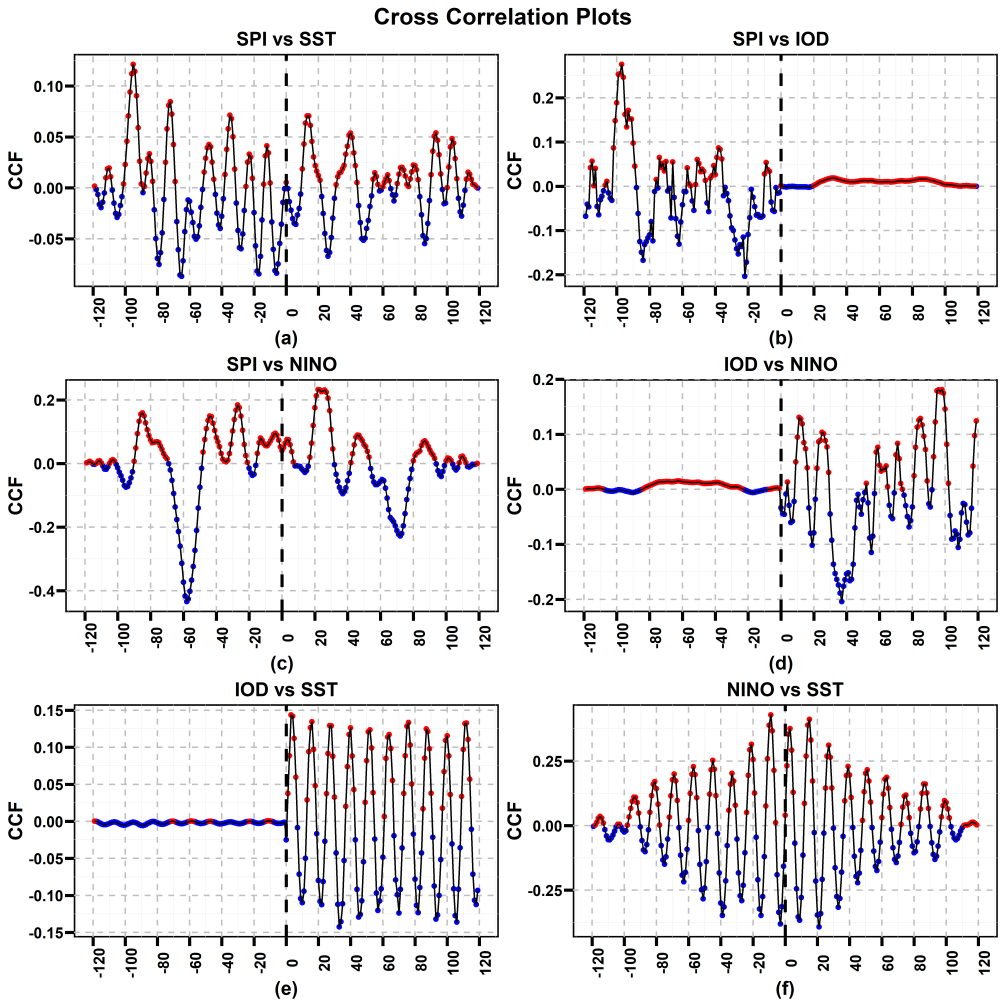


图 6。 关于2009年至2018年这一十年：（a）标准化降水指数（SPI）与海表温度（SST）、（b）SPI与印度洋偶极子（IOD）、（c）SPI与NINO 3.4、（d）IOD与NINO 3.4、（e）IOD与SST、（f）滞后400期的尼诺与SST之间的互相关函数（CCF）图。结果表明，尽管互相关函数值较小，但SPI与SST彼此相关。SPI对IOD有影响，但反之则不成立。SPI与IOD之间的相关性并不显著。显然，SPI与NINO 3.4彼此之间存在显著相关性。从图中可以清楚看出，IOD对NINO 3.4有影响，但反之则不成立。IOD对SST的影响较小，而SST对IOD没有影响。可以看出，NINO 3.4与SST彼此之间存在显著相关性。互相关系数足够显著，表明所有这些指数彼此之间都有显著影响。

2010年12月至2018年间的其余数据用于检验分析的泛化能力。我们为位置$s=1$、2、$\cdots$、$S(=194)$，提出以下混合统计机器学习模型，

$$M_s: \quad y(t)=\beta_0+\beta_1 t+\alpha(t)+\eta(t)+W(s)+\varepsilon(t), \tag{1}$$

其中，β_0 为截距，β_1 为趋势的系数，α(t)对该过程的短期记忆进行建模，η(t)对该过程的长期记忆进行建模。W (s)表示位置s处的空间或地理效应，其中W (s) $\sim$高斯过程(0,Σ(s, s′))，即W (s)服从均值为零、协方差函数为 Σ(s,s′) $=\tau^2\exp\{-\rho|s-s'|^2\}$的高斯过程；其中，我们采用指数协方差矩阵$\exp\{-\rho|s-s'|^2\}$。$\varepsilon$(t)为白噪声，其中 $\mathbb{E}(\varepsilon)=0$且 $\mathbb{V}\mathrm{ar}(\varepsilon)=\sigma^2$，$M_s$表示位置s处的模型。我们考虑以下四种不同类型的模型：

- **类型 I**：长期记忆模型

$$\eta(t)=\sum_{j=1}^{m_s}\left\{\sum_{i=1}^{K}\beta_{ji}\sin(i*\omega_j*t)+\sum_{i=1}^{K}\gamma_{ji}\cos(i*\omega_j*t)\right\}, \tag{2}$$

其中，$\omega_j=\frac{2\pi}{P_j}$，$j=1,2,\cdots,m_s$，$P_j$通过前文所述算法进行估算，$m_s$表示$s^{th}$ 位置的周期数。对于短期记忆，即 $\alpha(t)$，我们考虑了两种基于格兰杰因果模型的不同方法：

- **类型 II**：以 Nino3.4 和印度洋偶极子作为估计变量的短期记忆模型。这里，$y(t-K)$表示k_{th} 滞后标准化降水指数，$X(t)$表示估计变量的时间序列，例如 NINO 3.4 和印度洋偶极子。

$$\alpha(t)=\alpha_0+\alpha_1 y(t-k)+\delta X(t), \tag{3}$$

- **类型 III**：考虑尼诺3.4和印度洋偶极子滞后效应的短期记忆模型。在该模型中，我们对$X(t)$（尼诺和印度洋偶极子）考虑滞后效应，使得

$$\alpha(t)=\alpha_0+\alpha_1 y(t-k)+\delta X(t-k), \tag{4}$$

其中，$y(t-K)$为k^{th}阶滞后的标准化降水指数，$X(t-k)$为k^{th}阶滞后的估计变量时间序列。

- **类型 IV**：结合尼诺3.4、印度洋偶极子和海表温度的短期记忆模型。
在此模型中，我们将$X(t)$视为估计器的时间序列，例如 NINO 3.4、海表温度和印度洋偶极子。

$$\alpha(t)=\alpha_0+\alpha_1 y(t-k)+\delta X(t-k), \tag{5}$$

我们采用机器学习收缩技术 LASSO（最小绝对收缩与选择算子）进行筛选，以找出傅里叶模型中最合适的谐波[40]。LASSO 技术只选取那些在降低误差方面具有统计显著影响的谐波。我们使用来自 s位置的数据拟合模型，数据覆盖 $\{(t-w)\cdots、(t-1)\}$，其中$w=450$ 月。为了估计位置$y(t)$ 处s的值，我们将估计值定义为 $\hat{}y_s(t)$，对应t^{th} 月，并使用高斯过程模型进行空间校正，如下所示：

$$\bar{y}(t)=\Sigma(s,s')[\Sigma(s,s')+\tau^2\mathbf{I}]^{-1}\hat{y}(t),$$

其中 $\Sigma(s,s')=exp\{-\rho|s-s|^2\}$，定义见方程（1）。

采用 LASSO 方法对带空间校正的傅里叶模型进行选择，有助于提升模型性能。海表温度对提高样本外 SPI 的准确性有显著贡献。对于不带空间校正的傅里叶模型，我们发现，不考虑短期记忆时，均方根误差（RMSE）为 1.26（无空间校正的完整模型，类型 I）。然而，考虑短期记忆后，类型 II 和类型 III 的 RMSE 分别降至 0.49 和 0.51。在类型 III 中将海表温度作为协变量后，样本外 RMSE 降至 0.38。这表明海表温度对 SPI 估计有显著影响。采用不带 LASSO 的空间高斯过程校正后，类型 I 的 RMSE 从 1.26 降至 0.96；将海表温度作为协变量后，类型 IV 的 RMSE 从 0.38 降至 0.37。同样，我们发现，采用高斯过程空间校正并通过 Lasso 选择最优傅里叶谐波后，类型 I 的 RMSE 进一步降至 0.77，类型 III 和类型 IV 的样本外 RMSE 则达到最低值 0.34。我们的分析表明，采用空间校正模型进行 LASSO 选择能够大幅提高所提出模型的准确性，因为在这种情况下 RMSE 达到最低值（0.34）。

讨论与总结

我们构建了混合模型，并分析了 SPI 与海表温度、NINO 3.4 和印度洋偶极子之间的关系。我们采用包括 LASSO 在内的机器学习算法，选择显著的傅里叶谐波以刻画长记忆。为捕捉 SPI 的短期记忆，我们在格兰杰因果模型中使用了印度洋偶极子、海表温度和 NINO 3.4 等滞后估计量。我们还在估计 SPI 时应用了高斯过程空间校正。研究发现，SPI、海表温度、NINO 3.4 和印度洋偶极子都具有长记忆，因为估计得到的赫斯特指数均大于 0.5，见表（2）。我们基于样本外测试数据，对所提出的模型进行了多项验证。在验证步骤中，我们留出要验证的月份。例如，图（10）展示了澳大利亚地图上 2010 年 12 月的实际值和估计值。我们使用 1973 年 6 月至 2010 年 11 月的数据作为训练数据，即 450 个月，并应用所提出的模型（1）估计 2010 年 12 月的 SPI 值。在图（10）中，我们展示了样本外估计值和实际 SPI。目视检查也表明，所提出的模型（1）对 2010 年 12 月的估计效果良好。然而，这项验证仅针对一个特定月份。为评估所提出模型的性能，我们从 2010 年 12 月至 2018 年 11 月（共八年）重复这一估计过程，并计算 194 个地点估计值的样本外均方根误差。均方根误差中位数的结果见表（3）。

根据表现最佳的模型，我们观察到海表温度属性的变化在标准化降水指数分布特征中呈上升趋势。图（8）显示了1995年至2018年期间海表温度、印度洋偶极子和尼诺3.4对应的平均回归系数值（δ）。这表明尼诺3.4始终对标准化降水指数有显著的负面影响。印度洋偶极子与标准化降水指数呈负相关，直到2008年；2009年至2013年间转为正相关，此后又与标准化降水指数呈显著负相关。然而，直到2004年，海表温度始终与标准化降水指数呈负相关。2005年至2014年间，海表温度与标准化降水指数的相关性在负相关和正相关之间有所波动。自2014年以来，我们观察到海表温度对应的回归系数（δ）始终为正。总体而言，我们观察到图（ δ8）中海表温度对应的 δ 呈上升趋势。这意味着，鉴于海表温度本身呈上升趋势， δ 的正向上升趋势表明，近年来标准化降水指数与海表温度呈正相关。这意味着西澳大利亚研究区域的湿润季节增多。尽管标准化降水指数的12个月移动平均呈干旱加剧的下降趋势（见图（2b）），但标准化降水指数与其他气候变量之间复杂的动态关系表明，西澳大利亚的湿润季节将会增多。

参考文献

1. 国家干旱缓解中心。网站链接：https://psl.noaa.gov/repository/entry/show?entryid=f8d470f4-a072-4c1e-809e-d6116a393818。 2. Heathcote, R. L. 澳大利亚干旱：一个认知问题。《地理评论》59，175–194（1969）。 3. Ludwig, F., Milroy, S. & Asseng, S. 近期气候变化对西澳大利亚小麦生产系统的影响。《气候变化》92，495–517，DOI：10.1007/s10584-008-9479-9（2009）。 4. 西澳大利亚气候变化与大田畜牧生产。初级产业与区域发展部，网站链接：https://www.agric.wa.gov.au/climate-change/climate-change-and-broadacre-livestock-production-western-australia。 5. 西澳大利亚气候趋势。初级产业与区域发展部，网站链接：https://www.agric.wa.gov.au/climate-change/climate-trends-western-australia。 6. 气候变化 —— 趋势与极端事件。澳大利亚政府气象局，网站链接：http: //www.bom.gov.au/climate/change/。 7. 减缓气候变化或可扭转副热带地区干旱化。墨尔本大学，网站链接：
h
t
t
p
s://
fi
ndanexpert.unimelb.edu.au/news/2750-slowing-climate-change-could-reverse-drying-in-the-subtropics。 8. Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S. & Domínguez-Castro, F. 环境干旱综述：全球变暖是否会增加风险？《地球科学评论》201，102953，DOI：https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953（2020）。 9. Sugg, M. 等。北美干旱对健康和社会影响的范围综述。《气候变化》162，1–19，DOI：10.1007/s10584-020-02848-6（2020）。 10. Huai, J. 1991—2010年澳大利亚小麦抗旱韧性的动态变化。《科学报告》7，DOI：10.1038/ s41598-017-09669-1（2017）。 11. Wang, Q. 等。评估干旱对全球草地净初级生产力的影响。《科学报告》9，DOI：10.1038/s41598-019-50584-4（2019）。 12. 国家恢复与韧性局。网站链接：https://www.agriculture.gov.au/abares/research-topics/ aboutmyregion/wa。

13. 西澳大利亚谷物产业。初级产业与区域发展部农业与食品司致力于发展并保护西澳大利亚的农业与食品部门。网站链接：https: // www.agric.wa.gov.au/grains-research-development/western-australian-grains-industry。 14. Heim, R. 美国使用的20世纪干旱指数综述。《美国气象学会公报》83，DOI：10.1175/1520-0477(2002)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2（2002）。 15. McKee, Thomas B., D., Kleist, N. J. & John. 干旱频率和持续时间与时间尺度的关系。第八届应用气候学会议，17–22（1993）。 16. Karavitis, A., Christos, A., Stavros, T., Demetrios E., A. & George. 标准化降水指数（SPI）在希腊的应用。《水》3，787–805（2011）。 17. SONMEZ, F. KEMAL, K., ALI UMRAN KOMUSCU, E., AYHAN, T. & ERTAN. 使用标准化降水指数分析土耳其干旱脆弱性的空间和时间特征。《自然灾害》35，243–264（2005）。 18. Li, Wenhong, F., Rong, N. J., Robinson I., F. & Katia. 亚马逊地区标准化降水指数的观测变化、潜在成因及其对未来气候变化的启示。《英国皇家学会学报》363，1767–1772（2008）。 19. Wu, Renguang, K. & L., J. 分析美国干旱与海表温度和土壤湿度的关系，并区分干旱的时间尺度。《美国气象学会》22，4520–4538（2008）。 20. Delage, F. & Power, S. 全球变暖和厄尔尼诺—南方涛动对澳大利亚季节性极端降水的影响。《气候动力学》DOI：10.1007/s00382-020-05235-0（2020）。 21. Abiy, A., Melesse, A., Seyoum, W. & Abtew, W. 干旱、遥相关与干旱监测，275–296（2019）。 22. Wen, N., Liu, Z. & Liu, Y. 观测到的厄尔尼诺对东亚夏季降水的直接影响。《气候动力学》44，DOI：10.1007/s00382-015-2605-2（2015）。 23. Loughran, T., Pitman, A. & Perkins-Kirkpatrick, S. 厄尔尼诺—南方涛动对澳大利亚夏季热浪发展机制的影响。《气候动力学》52，DOI：10.1007/s00382-018-4511-x（2018）。 24. Lee, C., Shen, S., Bailey, B. & North, G. 海表温度和降水中厄尔尼诺信号的因子分析。《理论与应用气候学》97，195–203，DOI：10.1007/s00704-008-0056-y（2009）。 25. Taschetto, Andréa S., E. & H., M. 中部型厄尔尼诺对澳大利亚降雨的影响。《美国气象学会》22，3167–3174（2009）。 26. Koll, R., Gualdi, S., Drbohlav, H.-K. & Navarra, A. 厄尔尼诺与印度洋偶极子关系的季节性。《气候动力学》37，221–236，DOI：10.1007/s00382-010-0876-1（2011）。 27. Izumo, T. 等。印度洋偶极子和太平洋再充电对次年厄尔尼诺的影响：年代际稳健性。《气候动力学》 42，291–310，DOI：10.1007/S00382-012-1628-1（2014）。 28. Nicholls & Neville. 海表温度与澳大利亚冬季降雨。《气候杂志》2，965–973，DOI：10.1175/ 1520-0442(1989)002<0965:SSTAAW>2.0.CO;2（1989）。 29. Los, O. 等。海表温度、陆地表面植被、气温和降水的全球年际变化。《美国气象学会》14，1535–1549（2001）。 30. Drosdowsky, Wasyl, C. & E., L. 近全球海表温度异常对澳大利亚季节性降雨的预测作用。《美国气象学会》14，1677–1687（2001）。 31. 全球气候观测系统。地面气压工作组，下载气候时间序列，网站链接：https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/。 32. 印度洋偶极子。澳大利亚政府气象局，网站链接：http://www.bom.gov.au/climate/ data/。 33. 美国国家海洋和大气管理局。NOAA最优插值（OI）海表温度（SST）v2。数据下载地址：https: //psl.noaa.gov/repository/entry/show?entryid=f8d470f4-a072-4c1e-809e-d6116a393818。 34. Hayes, M., Svoboda, M., Wilhite, D. & Vanyarkho, O. 使用标准化降水指数监测1996年干旱。《美国气象学会公报》-《美国气象学会公报》80，429–438，DOI：10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2（1999）。 35. Lehner, B., Doell, P., Alcamo, J., Henrichs, T. & Kaspar, F. 估算全球变化对欧洲洪水和干旱风险的影响：一项大陆尺度的综合分析。《气候变化》75，273–299，DOI：10.1007/s10584-006-6338-4（2006）。

36. Kirichenko, L.、Radivilova, T. 和 Deineko, Z. 平稳时间序列和非平稳时间序列赫斯特指数估计的比较分析。《信息技术与知识》**5**，371–388（2011年）。**37.** 在线气候数据。澳大利亚政府气象局，网站链接：http://www.bom.gov.au/climate/enso/history/ln-2010-12/IOD-what.shtml。**38.** Granger, C. W. J. 通过计量经济模型和交叉谱方法研究因果关系。《计量经济学》**37**，424–438（1969年）。**39.** Das, P.、Lahiri, A. 和 Das, S. 通过函数型数据分析理解海冰融化。《当代科学》**115**，920–929（2018年）。**40.** Tibshirani, R. 通过 LASSO 进行回归收缩与选择。《皇家统计学会会刊》**64**，267–288（1996年）。

致谢

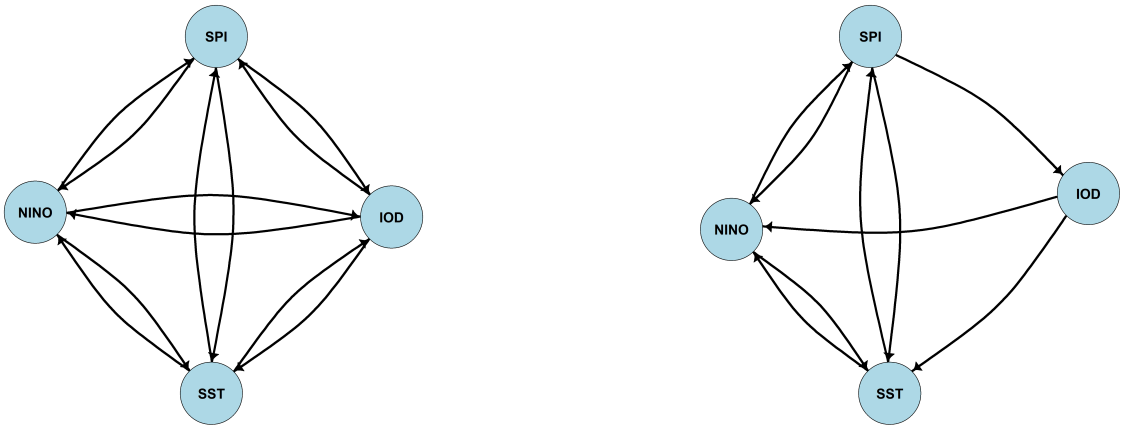
A.Y. 感谢贾瓦哈拉尔·尼赫鲁大学提供的奖学金，以及由 AlgoLabs 资助的 CMI 热情接待。S.D. 感谢印孚瑟斯基金会、塔塔信托以及比尔及梅琳达·盖茨基金会向 CMI 提供的资助所给予的部分财政支持。

作者贡献声明

A.C.、S.B.、S.D. 和 A.Y. 构思了这项研究。S.D. 和 A.Y. 开发了研究方法，分析了结果并制作了图表。所有作者均讨论了研究结果，参与了稿件撰写，并审阅了稿件。

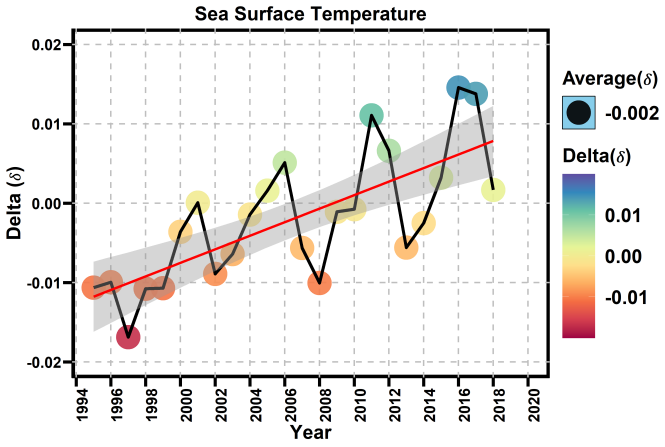
伦理声明

竞争利益：作者声明不存在竞争利益。

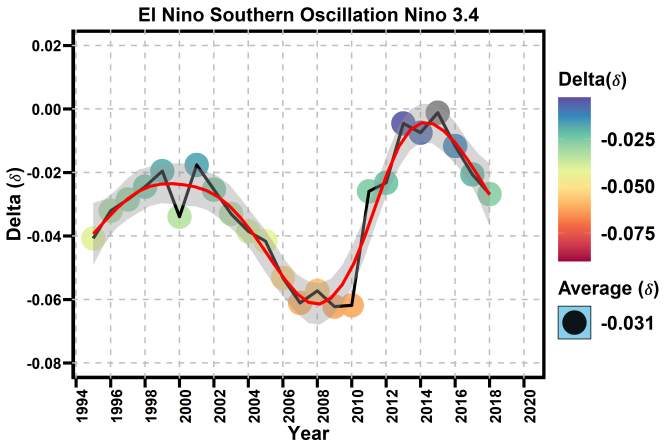


(a) (b)

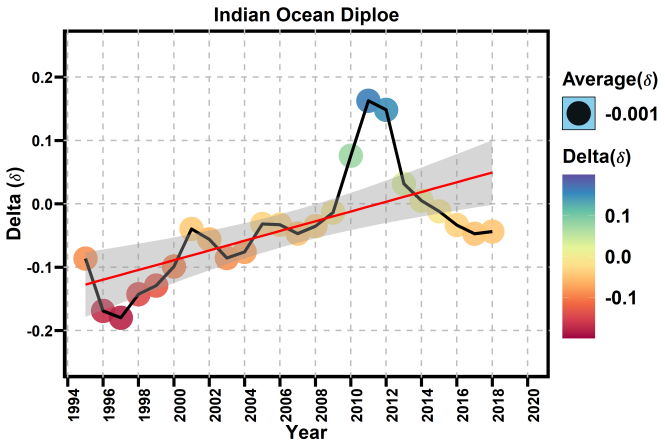
图7。基于交叉相关图的海表温度、NINO、印度洋偶极子和标准化降水指数网络（5，6），分别对应（a）1999年至2008年和（b）2009年至2018年。从图（a）可以清楚看出，在1998年至2008年这十年间，印度洋偶极子对NINO 3.4、标准化降水指数和海表温度有直接影响。但在1999年至2018年这十年间，它对标准化降水指数没有直接影响。而NINO 3.4和海表温度在两个十年间都对标准化降水指数有直接影响，反之亦然。因此，印度洋偶极子间接影响标准化降水指数。互相关系数足够显著，表明这些气候变量彼此之间都有显著影响。



(a)



(b)



(c)

图8。 1995年至2018年期间，NINO 3.4、海表温度和印度洋偶极子对应的平均回归系数值（δ）图。红色平滑曲线表示 δ的三年移动平均。结果显示，NINO 3.4始终对标准化降水指数产生显著的负面影响。另一方面，直到2004年，海表温度始终与标准化降水指数呈负相关。在2005年至2104年期间，海表温度的 δ 在负相关和正相关之间波动。印度洋偶极子在2009年之前始终与标准化降水指数呈负相关；2009年至2013年期间处于正相关范围，此后又与标准化降水指数呈显著负相关。

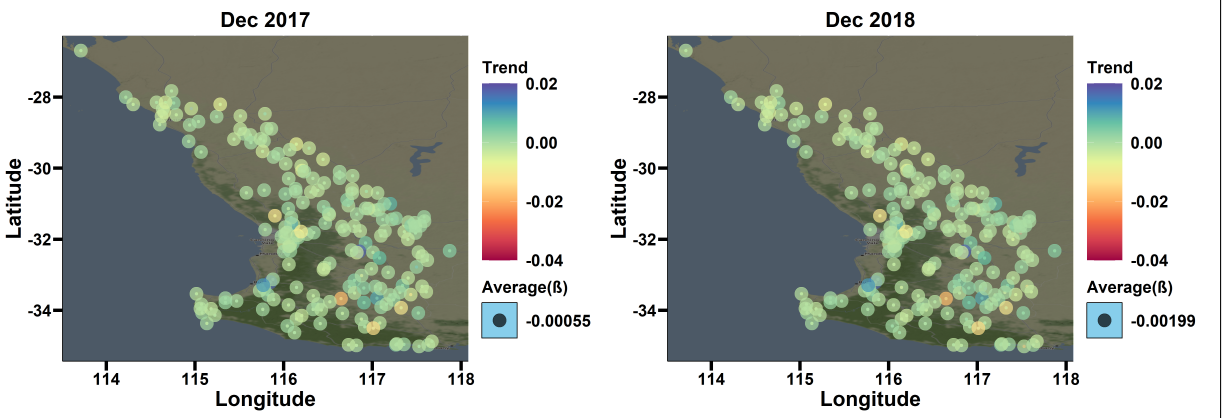


图9。趋势（ β_1）标准化降水指数系数：2017年12月和2018年12月澳大利亚西南部194个地点的标准化降水指数 .

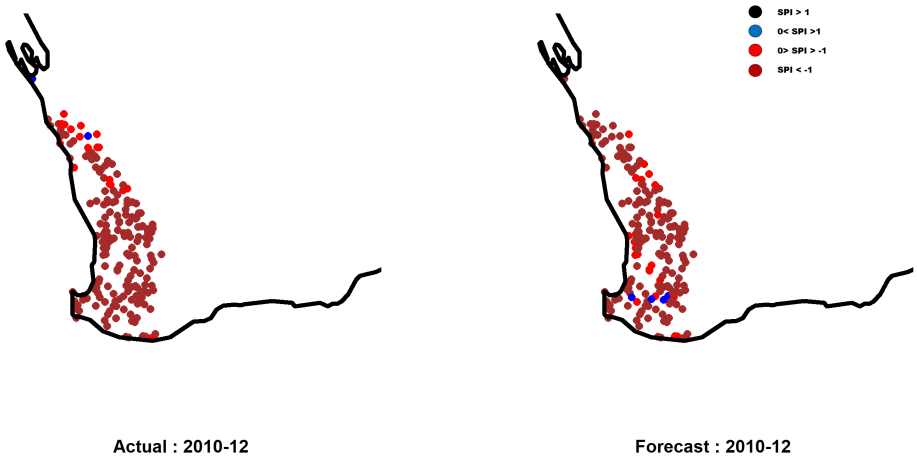


图10。基于1973年6月至2010年11月的训练数据估算2010年12月的标准化降水指数。按以下配色方案定义：（1）如果标准化降水指数>1：黑色（2）如果$1>$标准化降水指数>0：蓝色；（3）如果$-1<$标准化降水指数<0：红色，（4）如果标准化降水指数<-1：棕色

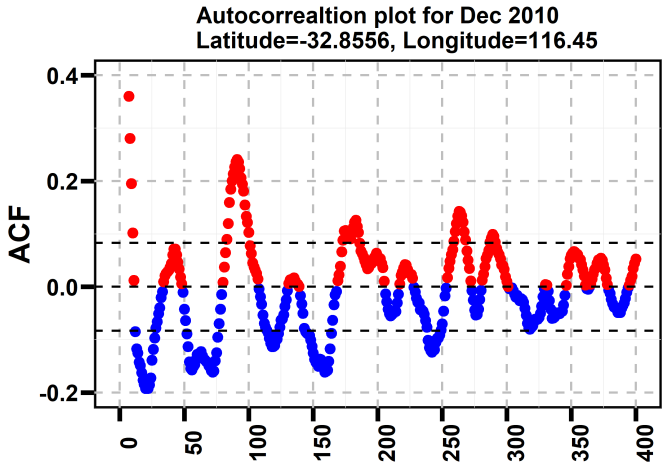


图 11。 经度为 116.45、纬度为 -32.86 的雨量测站位置的自相关图，最大滞后为 400 个月。我们使用从 1973年6月到 2010年11月的 450 个月数据来创建自相关函数。显著周期有四个，分别为 91、183、263 和 289 个月。前三个周期表明，当前标准化降水指数值与过去某个时点的标准化降水指数值之间存在显著正相关，周期性约为 7.5 年。

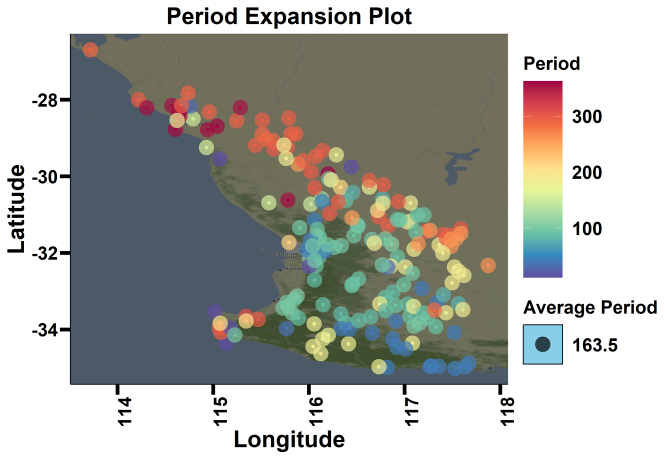


图 12。 该图展示了 194个地点各自的长记忆周期。所有地点的长记忆周期之间存在很强的空间相关性。色标显示了以月数表示的周期长度。