

1 北太平洋维多利亚模态（VM）与海洋性大陆秋季降水年际
2 关系的年代际变化

3 朱科旭 任保华* 郑建秋

5 中国科学技术大学地球和空间科学学院，合肥 230026

7 **摘要：**本文利用 HadISST 和 ERSSTv5 海表温度、EN4 次表层海温数据、CMAP
8 降水和 ERA5 再分析资料，研究了北太平洋春季海表温度与海洋性大陆秋季降水
9 年际变化之间的关系及年代际变化特征。研究表明：1) 北太平洋维多利亚模态
10 (VM) 是北太平洋春季海表温度 EOF 第二模态，其与秋季海洋性大陆的降水存
11 在显著的负相关关系。2) 春季的 VM 为正(负)位相时，通常伴随太平洋经向
12 模态的正(负)位相和西北太平洋的冷(暖)海表温度异常，海表温度梯度会导
13 致赤道太平洋的西风(东风)异常，影响东传的赤道开尔文波，在赤道中东太平
14 洋形成暖(冷)海温异常，再通过 Bjerknes 正反馈，西风异常和赤道中东太平洋
15 的海温异常维持到秋季，秋季时出现较成熟的厄尔尼诺(拉尼娜)事件。再通过
16 沃克环流，海洋性大陆出现异常下沉(上升)运动和低层辐散、高层辐合(低层
17 辐合、高层辐散)的环流形势，产生降水负(正)异常。3) 春季的 VM 和秋季
18 的海洋性大陆降水年际变化的关系在 2003 年发生了年代际转变，1979~2002 年
19 春季 VM 与秋季降水在年际变化上有显著的负相关，而 2004~2020 年相关关系
20 转变为不显著。造成这个年代际转变的原因是北太平洋涛动(NPO)在 2004~2020
21 年强度减弱、位置移动，导致 VM 南部海表温度关键区受 NPO 的影响减弱，从
22 而振幅减弱，使得 VM 的南部和北部海表温度关键区的经向梯度减弱，VM 强度
23 减弱，最终导致相关系数降低。

25 **关键词** 北太平洋维多利亚模态，海洋性大陆，秋季降水，北太平洋涛动，年代
26 际转变

27 **文章编号** 中图分类号 文献标识码

28 **doi:**[10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22243](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22243)

收稿日期 2022-12-08；网络预出版日期

作者简介 朱科旭，男，1998 年出生，硕士，主要从事海气相互作用研究。E-mail: Zhu_Cosin@mail.ustc.edu.cn

通讯作者 任保华，教授，E-mail: ren@ustc.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41675066

Funded by National Natural Science Foundation of China (41675066)

30 **The interdecadal shift of interannual relationship between**
 31 **Victoria Mode (VM) in the North Pacific and autumn**
 32 **precipitation over the Maritime Continent**

33 ZHU Kexu, REN Baohua*, ZHENG Jianqiu

34

35 School of Earth and Space Science ,University of Science and Technology of China,
 36 Hefei 230026, China

38 **Abstract:** Using HadISST and ERSSTv5 sea surface temperature (SST) data, EN4
 39 subsurface ocean temperature data, CMAP precipitation and ERA5 reanalysis data,
 40 this paper studies the interdecadal shift of interannual relationship between spring
 41 SST in the North Pacific and autumn precipitation in the the Maritime Continent. The
 42 results show that: 1) Victoria mode (VM) is the second mode of EOF analysis of
 43 spring SST in the North Pacific, which has a significant negative correlation with
 44 autumn precipitation in the Maritime Continent. 2) When VM is in positive (negative)
 45 phase in spring, it is usually accompanied by the positive (negative) phase of the
 46 Pacific meridional mode and the cold (warm) SST anomaly in the Western North
 47 Pacific. The SST gradient would lead to the westerly (easterly) anomaly in the
 48 equatorial Pacific, impacting eastward propagation of equatorial Kelvin wave and
 49 leading to warm (cold) SST anomaly in the central and eastern Pacific. SST gradient
 50 and westerly (easterly) anomaly persist into autumn through Bjerknes feedback, so the
 51 mature El Niño (La Niña) event forms in autumn. Then, through the Walker
 52 circulation, the abnormal sinking (rising) movement, low-level divergence and
 53 high-level convergence (low-level convergence and high-level divergence) over the
 54 Maritime Continent occur, resulting in precipitation decrease (increase). 3) This
 55 interannual relationship between the variation of springtime VM and the autumn
 56 precipitation over the Maritime Continent has changed in 2003, which was a
 57 significant negative correlation from 1979 to 2002, but was insignificant from 2004 to
 58 2020. The reason for this interdecadal shift is that the magnitude and position of
 59 North Pacific Oscillation altered from 2004 to 2020, which led to the weakening of
 60 the influence of the North Pacific Oscillation on the southern SST key area of VM,
 61 thus weakening the amplitude, weakening the meridional gradient of the key area of

62 SST between the southern and northern part of VM, weakening the VM amplitude,
63 and finally reducing the correlation coefficient.

64

65 **Keywords** Victoria Mode in the North Pacific, Maritime Continent, Autumn
66 precipitation, North Pacific Oscillation, Interdecadal shift

67

68 1 引言

69 海洋性大陆包括了许多岛屿和附近的浅海，是印太暖池的重要组成部分
70 (Ramage, 1968)，对我国气候具有显著影响。前人研究指出，夏季时海洋性大
71 陆降水主要受到非绝热加热的影响，并且可通过东亚–太平洋型 (EAP) / 太平洋
72 –日本型 (PJ) 波列，使中国江南和江淮地区产生气温和降水异常 (金大超等, 2010;
73 Li et al., 2016)，也可促使西太平洋副热带高压加强西伸、影响中南半岛北部和
74 南海向西南地区的水汽输送，导致中国西南地区高温少雨 (李永华等, 2009; Xia et
75 al., 2019)。海洋性大陆夏季的海气相互作用主要通过潜热通量，6~8月可通过
76 影响季风环流和赤道辐合带，导致云贵高原降水异常，但是 6~7 月和 8 月海气
77 相互作用影响云贵高原同期降水的物理机制不同 (张秀年, 2012)。

78 北太平洋海表温度 EOF 第一模态是太平洋年代际振荡 (Mantua et al., 1997;
79 Zhang et al., 1997)。太平洋年代际振荡空间结构为马蹄形，北太平洋中部存在
80 区域一致的海表温度异常，与之相邻的从阿拉斯加海湾、加利福尼亚西海岸延伸
81 到热带的海洋则为反向海表温度异常。北太平洋海表温度 EOF 第二模态是维多
82 利亚模态 (VM; Bond et al., 2003)，是东北–西南偶极子模态。VM 是北太平洋
83 涛动 (NPO) 滞后 1 个月的响应 (Ding et al., 2015a)，NPO 是北太平洋阿拉斯
84 加和夏威夷地区海平面气压反向变化的现象，可通过影响风场，强迫出北太平洋
85 三极子分布的地表热通量异常场，导致 VM 的形成 (Alexander et al., 2010; Yu and
86 Kim, 2011; 刘凯和祝从文, 2015)。

87 一些学者认为，NPO 可以通过季节足迹理论激发厄尔尼诺–南方涛动
88 (ENSO)，尤其更倾向于激发中部型 ENSO，因此 NPO 可提前一年预测 ENSO
89 的产生 (Alexander et al., 2010; Yu and Kim, 2011; Daniel, 2003)。毛欣 (2019)
90 运用时序因果分析证明 VM 与次年 ENSO 事件之间存在因果关系，VM 可能通过
91 三个主要过程来触发 ENSO：与发生在副热带东北太平洋的太平洋经向模态
92 (PMM) 相关的海洋表面的热力学过程；沿赤道与西北太平洋区域海表温度相
93 关的温跃层–海表温度反馈过程 (姬凯, 2020)；以及太平洋副热带经圈环流海洋
94 通道 (谢巍, 2019)。在统计上 VM 往往导致中部型和东部型 ENSO 事件的混合
95 型 (姬凯, 2020)，并且相较于 NPO，VM 是中部型 ENSO 更有效的预测信号 (Qi
96 and Mao, 2021)。

97 冬春季节的 VM 不仅是 ENSO 的前驱信号，还对周边地区的气候具有显著

影响。比如 VM 可以改变沃克环流对赤道辐合带夏季降水产生影响，并且这种影响独立于 ENSO 事件 (Ding et al., 2015b)。此外，VM 对西北太平洋夏季台风的生成 (Pu et al., 2019)、南海夏季风的爆发时间及强度 (Ding et al., 2018; Hu et al., 2021)、春季的大气季节内振荡 (Wen et al., 2020)、次年冬季中国华南地区降水 (Zou et al., 2020)、当年夏季至次年夏季的西太平洋暖池面积和西太平洋暖池东边界 (史良等, 2020) 具有显著影响。

前人对海洋性大陆降水的研究主要集中于夏季，而对秋季研究较少。目前研究已指出海洋性大陆赤道以南的部分地区秋季降水量为全年最多 (Yang et al., 2019)，而赤道以北的岛屿则因为处于旱季而森林火灾频发 (Hu et al., 2020)，并且海洋性大陆秋季降水受到同期 ENSO 和印度洋偶极子的共同调制作用 (Nur'utami and Hidayat, 2016; Kurniadi et al., 2021)。但是，对于影响秋季降水的前期信号尚不明确。VM 作为北太平洋的重要模态，其对秋季海洋性大陆降水的影响不容忽视，因此本文将研究春季北太平洋海表温度与秋季海洋性大陆降水的年际变化关系及可能的联系机制，并分析近年来年际关系减弱的可能原因，这对于秋季海洋性大陆降水的提前预测具有重要意义。

2 数据和方法

本文主要用到的数据为：1) 英国哈德莱中心的全球海表温度数据集 (HadISST, $1^\circ \times 1^\circ$) 和美国国家海洋与气象局 (NOAA) 拓展重建海表温度数据集 (ERSSTv5, $2^\circ \times 2^\circ$)，将 HadISST 插值到 $2^\circ \times 2^\circ$ 的水平格点上，与 ERSSTv5 合并，得到融合海表温度数据，以使海表温度数据更可靠 (Hu et al., 2018)，除特别说明外，本文均为融合海表温度数据的结果；2) 英国哈德莱中心的次表层海温数据 EN4，水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ ，垂直方向上从 5m 到 5350m，具有非等间距的 42 层。3) 美国国家海洋与气象局 (NOAA) 和气候预报中心 (CPC) 提供的 CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP) 月平均降水数据，空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ；4) 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的第 5 代全球大气再分析资料 (ERA5) 中的垂直速度、水平风场和海平面气压场的月平均数据，空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ；5) 去除赤道太平洋冷舌指数 (CTI) 线性信号的 PMM 指数，其中，冷舌指数定义为 $6^\circ\text{S} \sim 6^\circ\text{N}$, $180^\circ \sim 90^\circ\text{W}$ 区域平均海表温度异常，PMM 指数定义为 $21^\circ\text{S} \sim 32^\circ\text{N}$, $175^\circ \sim 95^\circ\text{W}$ 区域海表温度场和风场最大协方差分析 (MCA) 的海表温度膨胀系数，是副热带东北太平洋海气变率耦合的主要模态 (Chiang and Vimont, 2004)，下载地址为 <https://www.aos.wisc.edu/~dvimont/MModes/Data.html> [2023-03-01]。所用数据选取的时段均为 1979~2020 年，并在分析之前去除线性趋势。

VMI 指数：Ding et al. (2015a) 采用全年逐月的北太平洋 ($20^\circ\text{N} \sim 66^\circ\text{N}$, $124^\circ\text{E} \sim 99^\circ\text{W}$) 海表温度场数据，应用 EOF 方法得到 VM 模态。本文参考 Ding et

133 al. (2015a), 但是仅使用春季三个月平均的海表温度数据, 得到春季 VM 模态
134 及其时间序列。为了与 PMM 指数保持一致, 在进行 EOF 之前, 去除了春季冷
135 舌指数线性信号。其中 EOF 第二模态 (EOF2) 就是 VM。因此 VMI 指数定义为
136 EOF2 所对应的标准化时间序列 (PC2), 代表 VM 随时间的变化特征。

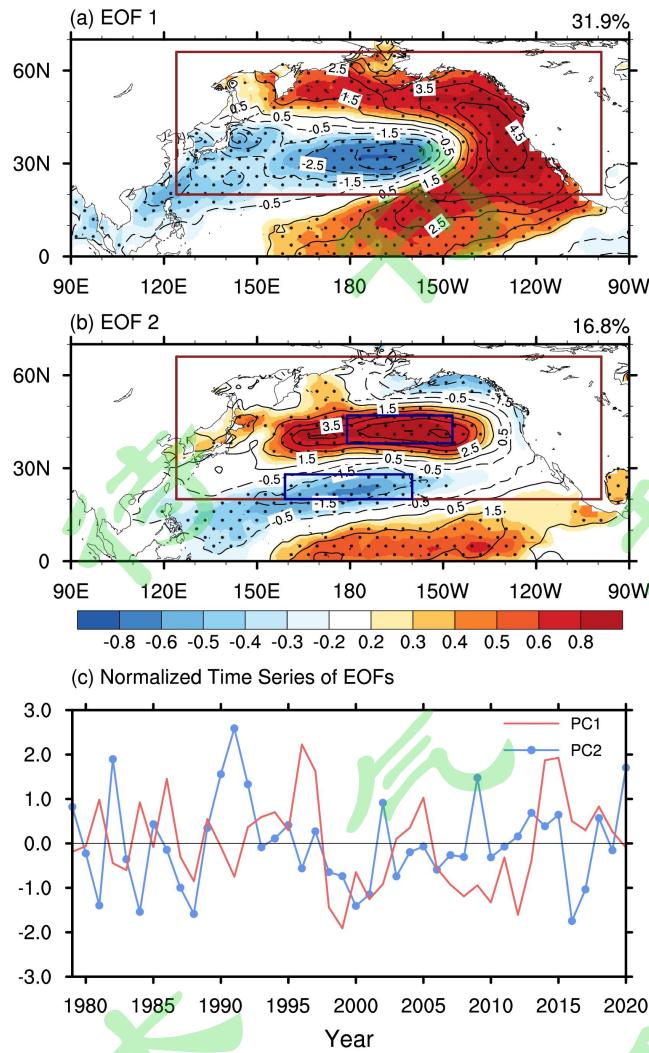
137 PI 指数: 秋季海洋性大陆 ($90^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$) 区域平均降水异常。

138 NPOI 指数: 通过全年逐月的北太平洋 ($20^{\circ}\text{N} \sim 66^{\circ}\text{N}$, $124^{\circ}\text{E} \sim 99^{\circ}\text{W}$) 海表面
139 气压场数据, 应用 EOF 分析得到 NPO 模态。对 EOF2 所对应的标准化时间序列
140 (PC2) 进行 2~4 月三个月平均, 即可得到早春的 NPOI 指数。

141 研究过程中, 主要使用了 EOF 分析、回归分析、相关分析, 还用到了 11 年
142 lanczos 高通滤波, 以提取各指数的年际变化信号, 并用到了 11 年滑动相关, 以
143 提取 VM 与海洋性大陆秋季降水年际关系的年代际转变特征。

144 3 北太平洋春季海表温度与海洋性大陆秋季降水年际变化之间的关系

145 计算春季三个月平均的海表温度场, 再使用春季的冷舌指数, 去除海表温度
146 场的 ENSO 线性信号, 之后对北太平洋区域 ($20^{\circ}\text{N} \sim 66^{\circ}\text{N}$, $124^{\circ}\text{E} \sim 99^{\circ}\text{W}$) 的春
147 季海表温度场进行 EOF 分析, 结果如图 1 所示。根据 North 准则 (North et al.,
148 1982), 前 2 个模态均具有实际意义。春季海表温度 EOF1 的解释方差为 31.9%,
149 是典型的太平洋年代际振荡模态。EOF2 的解释方差为 16.8%, 是典型的 VM 模
150 态, 为东北-西南分布的海表温度偶极子, 从加利福尼亚西海岸延伸到白令海西
151 部的带状暖海表温度异常和从夏威夷群岛延伸到亚洲的带状冷海表温度异常组
152 成, 并与热带中太平洋的海表温度显著相关。



153

154 图 1 1979~2020 年春季北太平洋海表温度 EOF 前两个模态 (EOF1 和 EOF2) 与对应的标准
155 化时间序列 (PC1 和 PC2) 的相关分析 (填色, 打点区域为通过 95% 的信度检验) 和回归分
156 析 (等值线, 单位: 0.1K) : (a) EOF1, (b) EOF2, (c) PC1、PC2。其中, 海表温度
157 场已去除春季冷舌指线性信号, 红框为 EOF 区域 (20°N ~ 66°N , 124°E ~ 99°W), 蓝框分
158 别为北太平洋维多利亚模态 (VM) 的南部 (20°N ~ 28°N , 159°E ~ 160°W) 和北部 (38°N ~ 47°N ,
159 179°E ~ 147°W) 海表温度关键区

160 Fig. 1 The correlation (shading, dark dots denote statistical significance at the 95% confidence
161 level) and regression (contour, unit: K) analysis of the first two EOF modes (EOF1 and EOF2) of
162 springtime SST with/onto their two standardized principal components (PC1 and PC2) in the
163 North Pacific during 1979–2020: (a) EOF1, (b) EOF2, (c) PC1, PC2. The springtime CTI signals
164 were linearly removed before the correlation/regression. The red box is EOF region (20°N ~ 66°N ,
165 124°E ~ 99°W), and the blue boxes are the southern (20°N ~ 28°N , 159°E ~ 160°W) and the
166 northern (38°N ~ 47°N , 179°E ~ 147°W) SST key areas of North Pacific Victoria Mode (VM),
167 respectively

168 表 1 为 PC1、PC2 (VMI) 、 PI 和 PMM 指数之间的相关系数。在未进行 11

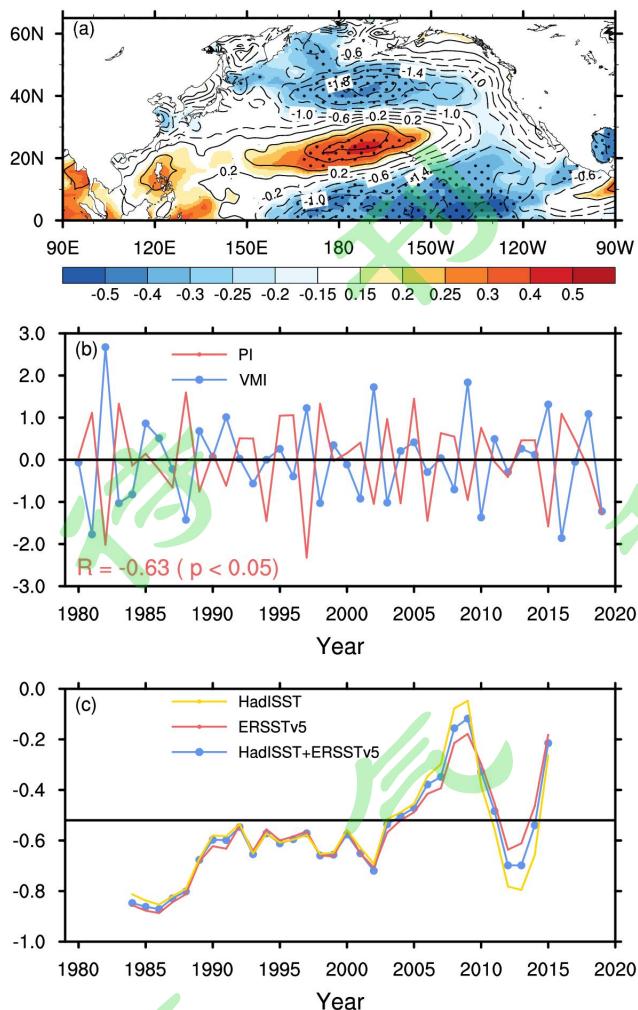
169 年高通滤波时，PC1 与 PI 指数相关系数仅 -0.12，但是与 PMM 指数的相关系数
170 达 0.73，相比之下，PC2 (VMI) 与 PI 指数相关系数为 -0.53，但是与 PMM 指
171 数的相关系数仅 0.31。在 11 年高通滤波处理之后，PC1 与 PI 指数相关系数仍然
172 只有 0.03，与 PMM 指数的相关系数降到 0.39，而 VMI 与 PI 指数的相关系数上升
173 到 -0.63，与 PMM 指数的相关系数上升到 0.46。说明在春季北太平洋海表温度
174 模态中，只有 VM 对海洋性大陆的秋季降水有影响，年际尺度上的方差解释
175 率约为 40% (r^2)。

176 表 1 11 年高通滤波前后的 EOF 分析前两模态的主成分分量、PMM 和 PI 指数的相关系数 (*
177 表示相关系数通过 95% 的信度检验)

178 Tab. 1 Correlation coefficients of PC1 and PC2 of the first two EOF modes, PMM and PI index
179 before and after 11-year high pass (* denote statistical significance at the 95% confidence level)

		PC1	PC2(VMI)
原始序列 /	PI	-0.12/0.03	-0.53*/-0.63*
高通滤波后	PMM	0.73*/0.39*	0.31/0.46*

180 对 11 年高通滤波后的 PI 指数与春季北太平洋海表温度进行相关分析（图
181 2a），发现春季北太平洋 20°N 以北存在两处显著的海表温度异常，其中，加利
182 福尼亚西海岸延伸到白令海处的海表温度与降水存在显著负相关，而夏威夷群岛
183 延伸到亚洲的带状冷海表温度与降水存在显著正相关，这两处的海表温度异常的
184 空间结构特征与 VM 相似。图 2b 展现了 VM 与 PI 指数的负相关关系，但是，
185 VM 与 PI 指数的关系在 2003 年发生了年代际转变，在 1979~2002 年 (P1) 时段，
186 二者关系显著，但是在 2004~2020 年 (P2) 时段，关系不显著（图 2c）。



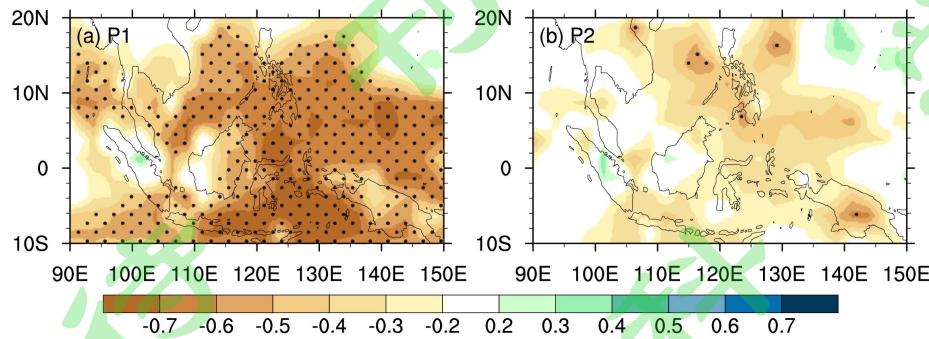
187

188 图 2 1979~2020 年 (a) 11 年高通滤波后的 PI 指数与北太平洋春季海表温度的相关分析 (填
 189 色, 打点区域为通过 95% 的信度检验) 和回归分析 (等值线, 单位: 0.1K), 海表温度场
 190 已去除春季冷舌指数线性信号。(b) 11 年高通滤波后的 VMI 和 PI 指数的标准化时间序列。
 191 (c) VMI 与 PI 指数的 11 年滑动相关系数, 实线: 相关系数的 90% 信度检验, 黄色、红色
 192 和蓝色曲线分别代表 HadISST、ERSSTv5 和融合海表温度数据的结果

193 Fig. 2 (a) The correlation (shading, dark dots denote statistical significance at the 95% confidence
 194 level) and regression (contour, unit: K) analysis of 11-year high pass PI with/onto springtime SST
 195 in the North Pacific. The springtime CTI signals were linearly removed before the
 196 correlation/regression. (b) Standardized time series of PI and VMI after 11-year pass. (c) 11-year
 197 slipping anticorrelation coefficients between VMI and PI (solid line denote statistical significance
 198 at the 90% confidence level). Yellow, red and blue lines represent the outcomes of HadISST,
 199 ERSSTv5 and merged SST data) during 1979–2020

200 分 P1 和 P2 时段, 对 11 年高通滤波后的 VMI 指数与海洋性大陆秋季降水做
 201 相关分析 (图 3)。在 P1 时段, 海洋性大陆降水与 VMI 指数呈负相关, 负相关的
 202 大值区位于 110°E ~ 140°E 之间, 说明 VM 对东海洋性大陆的影响强于西海洋性

203 大陆。表现为 VM 正位相时，海洋性大陆降水减少，VM 负位相时，海洋性大陆
204 降水增加。在 P2 时段，海洋性大陆降水与 VMI 指数的相关系数下降。因此，将
205 分为 P1 和 P2 两个时间段，研究春季 VM 与秋季海洋性大陆降水在年际尺度上
206 的关系。



207 图 3 P1 时段（1979~2002 年, a）和 P2 时段（2004~2020 年, b）11 年高通滤波后的 VMI
208 指数与海洋性大陆秋季降水的相关分析（填色，打点区域为通过 95% 的信度检验），降水
209 场已去除春季冷舌指数线性信号

210 Fig. 3 The correlation (shading, dark dots denote statistical significance at the 95% confidence
211 level) analysis of 11-year high pass VMI with autumn precipitation over the Maritime Continent
212 region during P1 (1979~2002, a) and P2 (2004~2020, b). The springtime CTI signals were
213 linearly removed before the correlation

214 4 春季 VM 影响秋季海洋性大陆降水的可能物理机制

215 将 P1 时段 11 年高通滤波后的 VMI 指数与多个季节的海表温度、925hPa 风
216 场以及多个深度的次表层海温进行相关和回归分析，结果如图 4、5 所示。春季
217 的海表温度场具有典型的 VM 模态，并且在副热带太平洋还有与 PMM 有关的海
218 表温度异常，具体为副热带中太平洋的暖海表温度异常和赤道东太平洋的冷海表
219 温度异常。VM 可通过与 PMM 相关的风-蒸发-SST 反馈机制 (Xie and Philander,
220 1994)，导致热带中太平洋出现暖海表温度和次表层海温异常。具体表现为，
221 VM 正位相时，热带中太平洋西南风异常减弱了气候态的东北信风，这使得中太
222 平洋风速减小，从而海洋通过潜热通量向大气传输的热量减少，最终海洋表面和
223 次表层增暖 (Chiang and Vimont, 2004; Chang et al., 2007)。与此同时，西北太
224 平洋为显著的冷海表温度异常。前人研究已经表明了 PMM 和西北太平洋海表温
225 度模态对启动 ENSO 事件的相对重要性 (Zhang et al., 2009a, 2009b; Wang et al.,
226 2012, 2013; Ji et al., 2023)。西北太平洋的冷海表温度异常和赤道中太平洋的暖
227 海表温度异常产生了纬向的海表温度梯度异常，有利于赤道中太平洋异常西风的
228 形成 (Lindzen and Nigam, 1987)。夏季，副热带中太平洋的暖海表温度异常因
229 为风-蒸发-SST 反馈机制 (Xie and Philander, 1994) 逐渐发展到赤道地区，这与
230 海洋性大陆东部的冷海表温度异常形成纬向海表温度梯度，海表温度梯度会使西
231

风异常进一步发展，增强的西风异常可以更频繁地激发东传赤道开尔文波。赤道开尔文波可以将西太平洋次表层的暖海水输送到赤道中东太平洋，导致春季时局限于赤道中太平洋的海表温度和次表层海温的暖异常向东延伸（Qi and Mao, 2021），暖异常强度也较春季时显著增强，纬向海表温度梯度进一步增强，这种海气相互作用称为 Bjerknes 正反馈（Bjerknes, 1969）。Bjerknes 正反馈可以维持到秋季，最终在秋季时形成了较为成熟的 ENSO 事件。P2 时段的物理机制与 P1 时段类似，只是 VM 对海表温度、风场和次表层海温的影响显著减弱（图 6、7）。

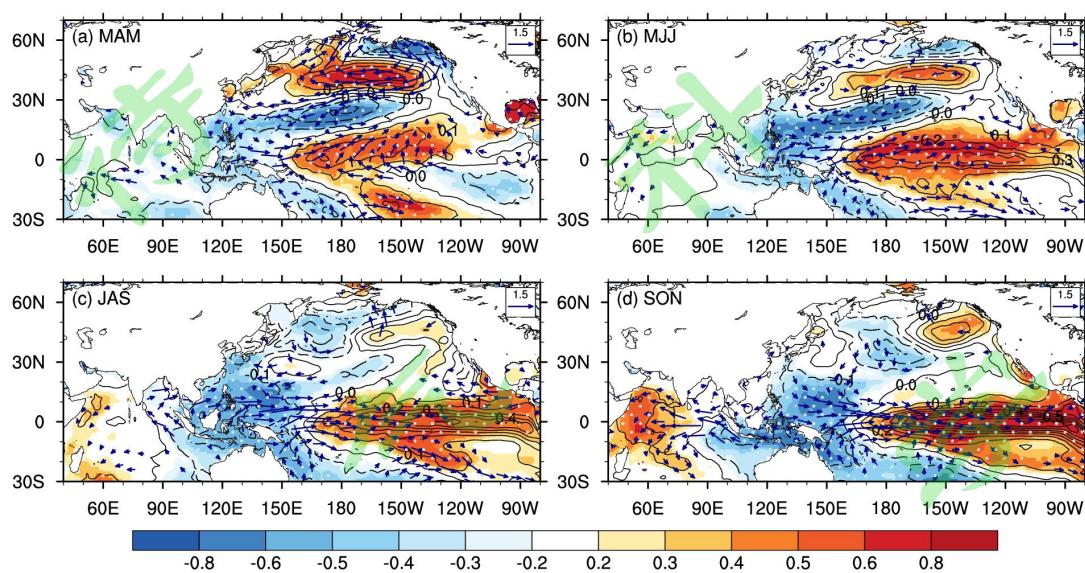
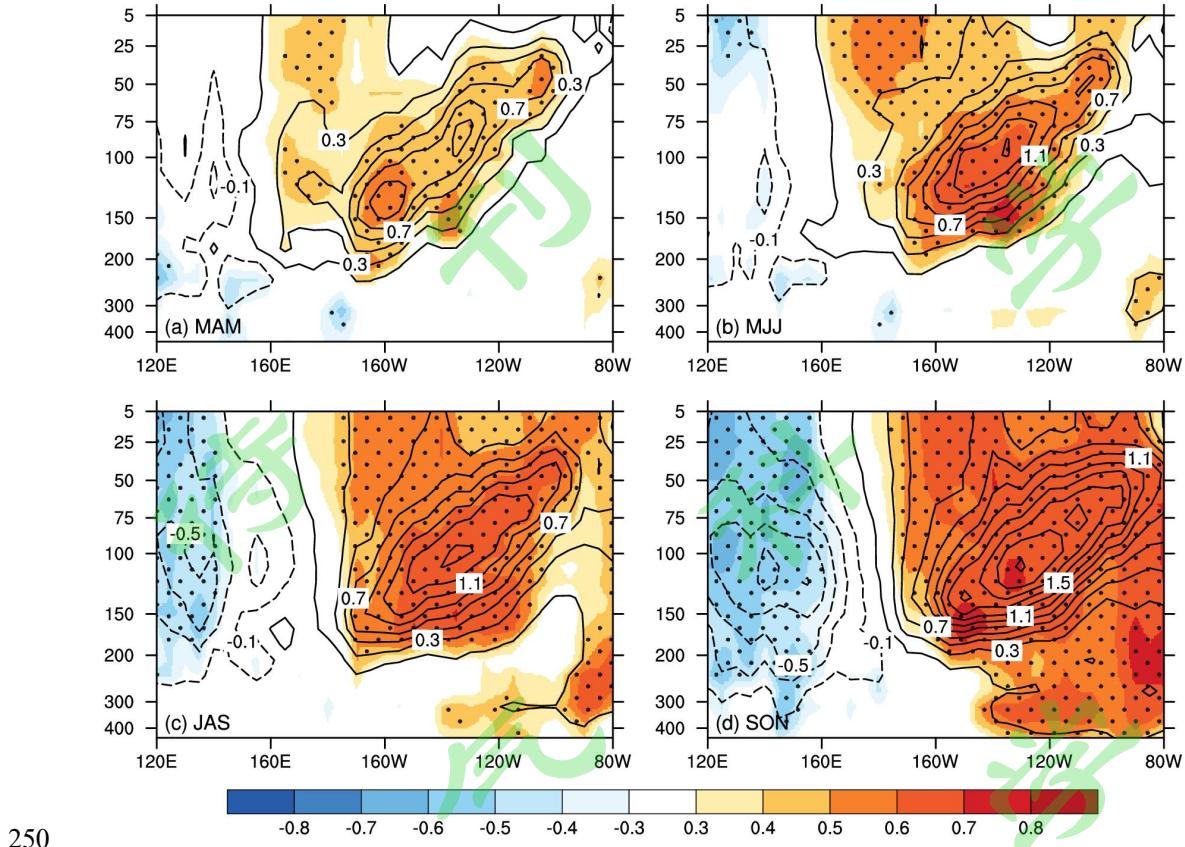


图 4 P1 时段[1979~2002 年 (a) MAM, (b) MJJ, (c) JAS, (d) SON]的海表温度与 11 年高通滤波后的 VMI 指数的相关分析（填色，打点区域为通过 95% 的信度检验）和回归分析（等值线，单位：K），以及 925hPa 风场（矢量，单位： $m s^{-1}$ ）与 11 年高通滤波后的 VMI 指数的回归分析。风场仅绘制出 u 风或 v 风通过 95% 信度检验的部分。海表温度和风场均已去除春季冷舌指线性信号

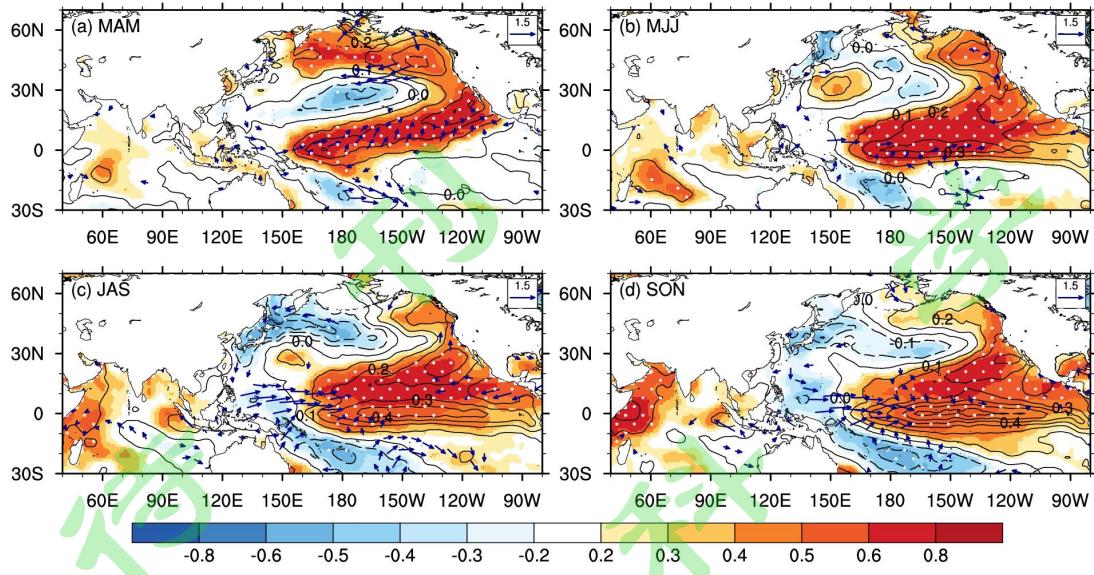
Fig. 4 The correlation (shading, dark dots denote statistical significance at the 95% confidence level) and regression analysis (contour, unit: K) of 11-year high pass VMI with/onto (a) MAM, (b) MJJ, (c) JAS, (d) SON SST during P1 (1979-2002). The regressed winds at 925hPa (vector, unit: $m s^{-1}$) are also shown. Only winds at the 95% confidence level are exhibited. The springtime CTI signals were linearly removed before the correlation/regression



250

251 图 5 P1 时段[1979~2002 年 (a) MAM, (b) MJJ, (c) JAS, (d) SON]的赤道太平洋 (5°N ~ 5°S 区域平均) 次表层海温与 11 年高通滤波后的 VMI 指数的相关分析 (填色, 打点区域为通过 252 95% 的信度检验) 和回归分析 (等值线, 单位: K)。次表层海温已去除春季冷舌指数线性 253 信号 254

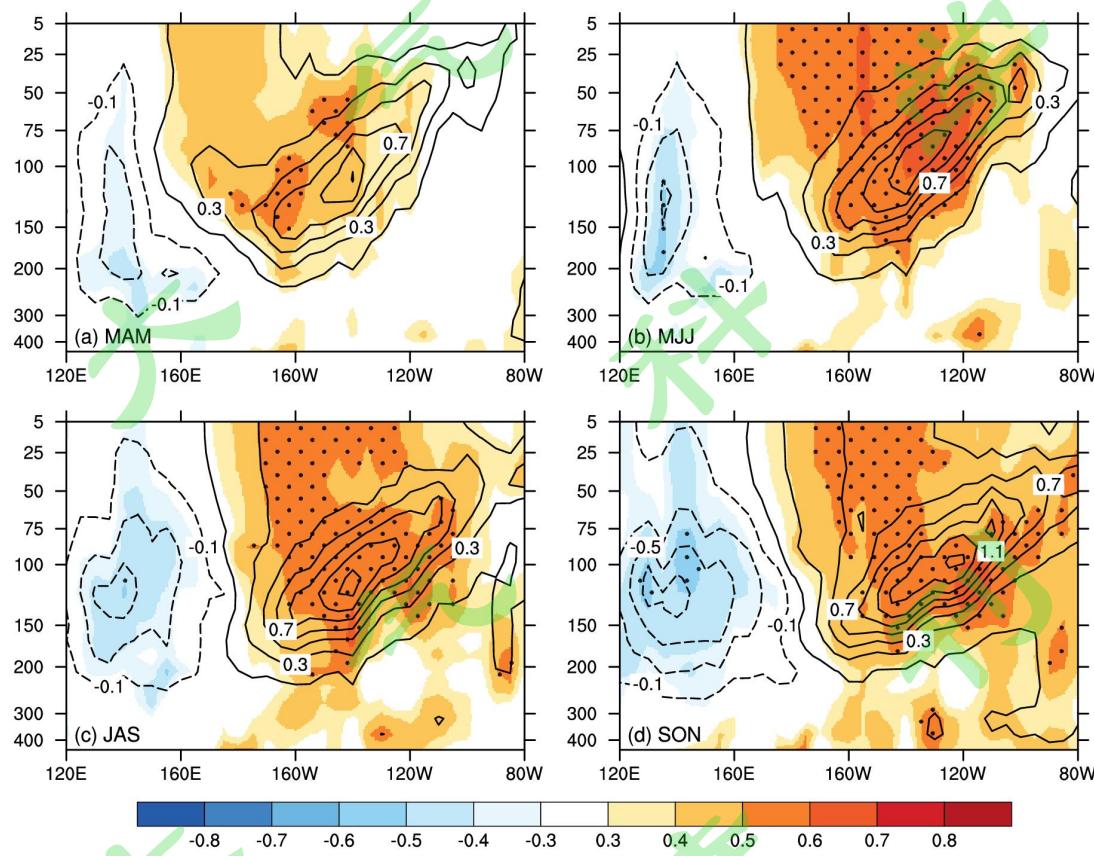
255 Fig. 5 The correlation (shading, dark dots denote statistical significance at the 95% confidence 256 level) and regression (contour, unit: K) analysis with/onto (a) MAM, (b) MJJ, (c) JAS, (d) SON 257 subsurface ocean temperature in the Equatorial Pacific (averaged in 5°S ~ 5°N) during P1 258 (1979-2002). The springtime CTI signals were linearly removed before the correlation/regression



259

260 图 6 同图 4, 但为 P2 (2004~2020 年) 时段

261 Fig. 6 The same as Fig. 4, but for P2 (2004-2020)



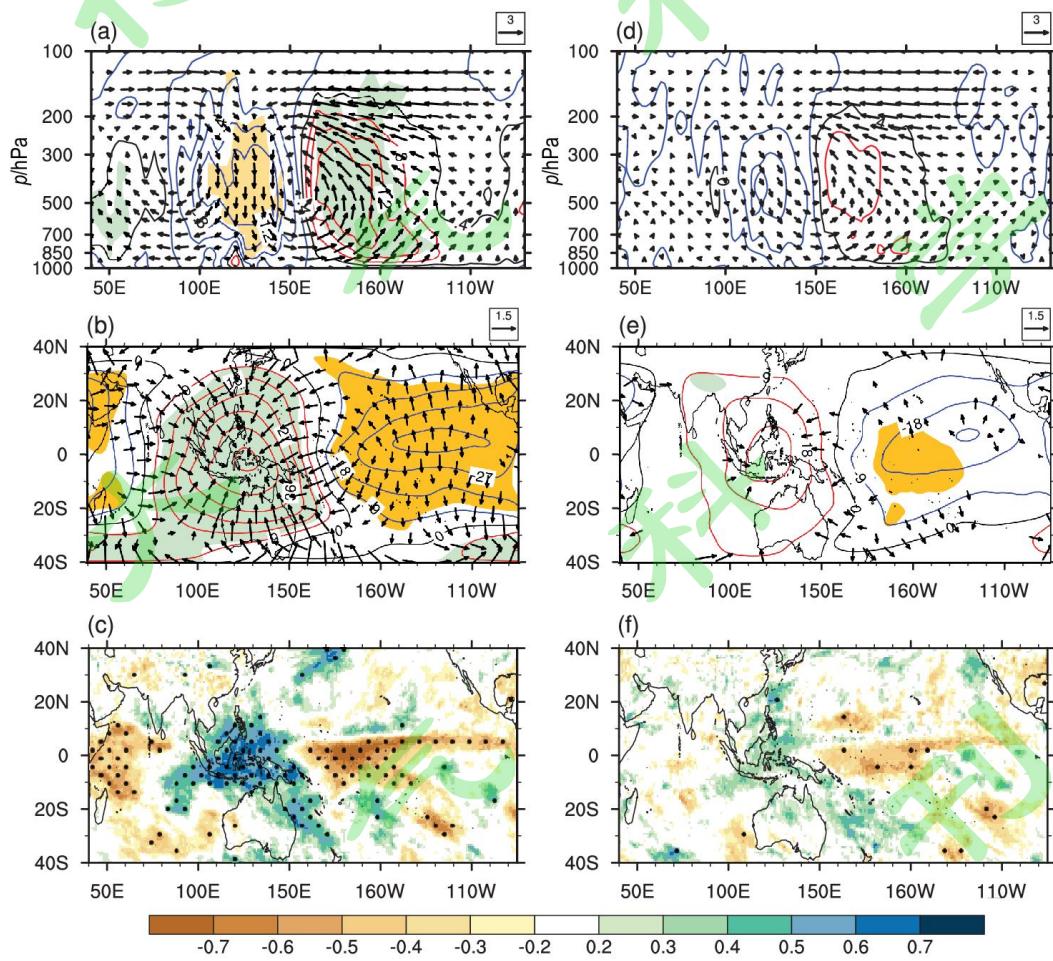
262

263 图 7 同图 5, 但为 P2 (2004~2020 年) 时段

264 Fig. 7 The same as Fig. 5, but for P2 (2004-2020)

265 P1 时段, VM 激发较为成熟的 ENSO 事件后, 秋季的沃克环流则会发生改
266 变 (图 8a)。在赤道中太平洋, 整个对流层均存在上升运动异常, 并在对流层

267 低层存在西风异常，在对流层高层存在东风异常。在海洋性大陆，整个对流层均
 268 存在下沉运动异常，并且还存在低层辐散、高层辐合的环流形势，具体表现为在
 269 对流层低层， 140°E 以东存在西风异常，而在 120°E 以西存在东风异常，在对流
 270 层高层， 140°E 以东存在东风异常，而在 120°E 以西则存在西风异常。根据 200hPa
 271 的速度势和辐散风（图 8b），海洋性大陆表现为高层辐合，而中东太平洋表现
 272 为高层辐散。 850hPa 的速度势和辐散风特征与 200hPa 刚好相反（图略）。并且，
 273 VM 对垂直速度的影响在 $110^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$ 区域比 $90^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$ 区域更强（图 8c），
 274 这也解释了为什么春季 VM 对东海洋性大陆降水的影响强于西海洋性大陆。P2
 275 时段，VM 也是通过类似的物理过程影响降水的，但是影响较弱，没有通过 95%
 276 的信度检验，导致了 VM 与降水的相关系数不显著（图 8d-f）。



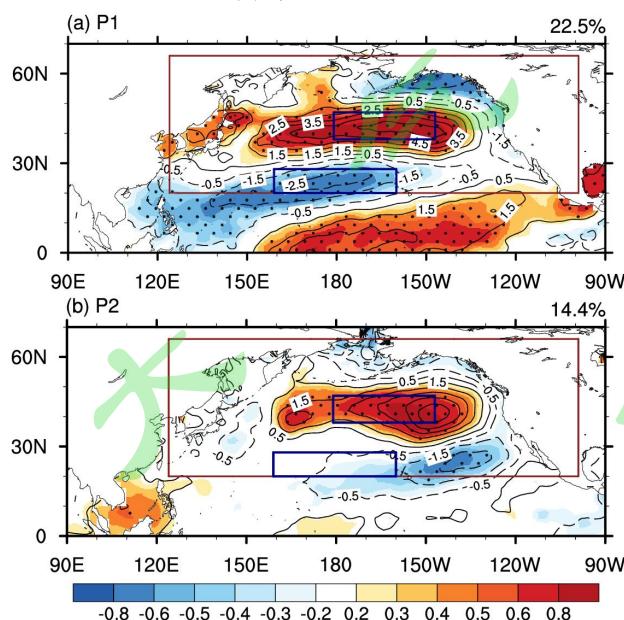
277
 278 图 8 左列：P1 时段（1979~2002 年）的 (a) 秋季沃克环流 ($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$ 区域平均) 与春季 11
 279 年高通滤波后的 VMI 指数的回归分析。沃克环流由纬向风（单位： m s^{-1} ）和垂直速度（等
 280 值线，单位： Pa s^{-1} ，乘以 -100 ）表征，填色为垂直速度通过 95% 信度检验。（b）秋季 200hPa
 281 速度势（等值线，单位： $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）和辐散风（矢量，单位： m s^{-1} ）与春季 11 年高通滤波
 282 后的 VMI 指数的回归分析，填色为速度势通过 95% 信度检验，仅绘制出辐散风通过 95% 信
 283 度检验的部分。（a）和（b）中，红色（蓝色/黑色）表示回归值大于（小于/等于）0。（c）

284 秋季 500hPa 垂直速度与春季 11 年高通滤波后的 VMI 指数的相关分析，打点为垂直速度通
285 过 95% 信度检验。所有风场和垂直速度场均已去除春季冷舌指数线性信号。右列同左列，
286 但为 P2 时段（2004~2020 年）

287 Fig. 8 Left panels: (a) regression maps of the Walker circulation cell (averaged in 5°S~5°N) in
288 autumn onto 11-year high pass springtime VMI during P1 (1979-2002). The Walker circulation
289 cell is depicted by the zonal wind (unit: $m s^{-1}$) and the vertical velocities (unit: $Pa s^{-1}$, multiplied by
290 a factor of -100). The shaded areas represent values of the vertical velocities at the 95%
291 confidence level. (b) Regression maps of the velocity potential (shading, unit: $10^5 m^2 s^{-1}$) and
292 divergent winds (vectors, unit: $m s^{-1}$) at 200 hPa in autumn onto 11-year high pass springtime VMI
293 during P1. The shaded areas represent values of the velocity potential at the 95% confidence level.
294 Only divergent winds at the 95% confidence level are shown. In (a) and (b), blue (red/black) lines
295 represent values above (below/equal to) 0.(c) Correlation maps of the vertical velocities at 500
296 hPa in autumn with 11-year high pass springtime VMI during P1. Dark dots denote statistical
297 significance at the 95% confidence level. The springtime CTI signals were linearly removed
298 before the correlation/regression. The right panels are the same as the left panels, except during P2
299 (2004-2020)

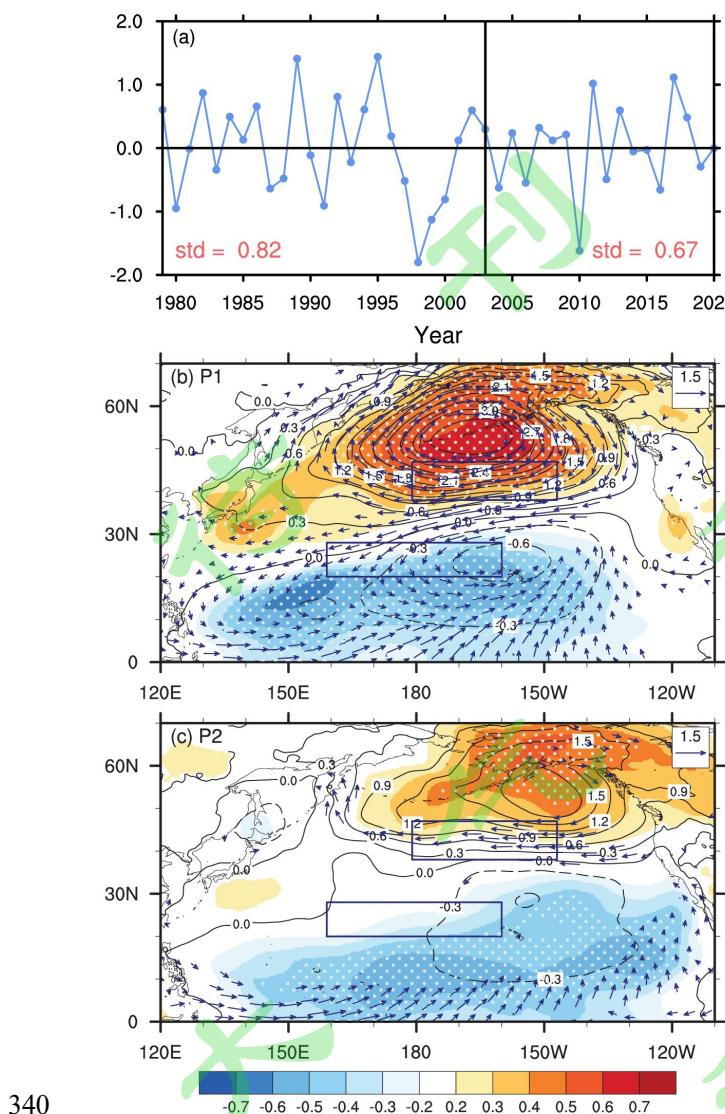
300 5 春季 VM 对海洋性大陆秋季降水的影响年代际减弱原因

301 图 2c 将春季的 VMI 指数与秋季的 PI 指数进行 11 年滑动相关，已经发现二
302 者的年际关系在 2003 年发生年代际变化。表 2 为 P1 和 P2 时段 VMI 的标准差。
303 P1 时段 VMI 的标准差为 1.10，而 P2 时段 VMI 的标准差为 0.82，减弱了 25.45%，
304 图 9 也可以看出，在 P2 时段，VM 的解释方差仅 14.4%，低于 P1 时段的 22.5%。
305 VM 与 ENSO 的关系与 VM 强度有关（谢巍, 2019），因此，春季 VM 强度的减
306 弱可能是 VM 对降水影响减弱的直接原因。



308 图 9 P1 时段 (1979~2002 年, a) 和 P2 时段 (2004~2020 年, b) 北太平洋春季海表温度 EOF2
309 与对应的标准化主成分 (PC2) 的相关分析 (填色, 打点区域为通过 95% 的信度检验) 和回
310 归分析 (等值线, 单位: 0.1K)。红框为 EOF 区域 (20° N~ 66° N, 124° E~ 99° W), 蓝
311 框分别为北太平洋维多利亚模态 (VM) 的南部 (20° N~ 28° N, 159° E~ 160° W) 和北部
312 (38° N~ 47° N, 179° E~ 147° W) 海表温度关键区。已去除春季冷舌指数线性信号
313 Fig. 9 The correlation (shading, dark dots denote statistical significance at the 95% confidence
314 level) and regression (contour, unit: K) analysis of EOF2 of springtime SST with/onto their
315 standardized principal components (PC2) in the North Pacific during P1 (1979–2002, a) and P2
316 (2004–2020, b). The red box is EOF region (20° N~ 66° N, 124° E~ 99° W), and the blue boxes are
317 the southern (20° N~ 28° N, 159° E~ 160° W) and the northern (38° N~ 47° N, 179° E~ 147° W) SST
318 key areas of North Pacific Victoria Mode (VM), respectively. The springtime CTI signals were
319 linearly removed before the correlation/regression

320 NPO 对大气的强迫作用是 VM 形成的重要原因 (Vimont et al., 2003a, 2003b;
321 Alexander et al., 2010; Yu and Kim, 2011)。因此, 分析 P1 和 P2 时段激发 VM 的
322 NPO 模态的差异, 有利于揭示春季 VM 发生年代际减弱的可能原因。当 NPO 超
323 前 VM 一个月时, 二者的相关系数最大 (Ding et al., 2015a)。因此, 分 P1 和
324 P2 两个时段, 分析 NPO 的强度和位置的差异。图 10a 为早春 (2~4 月) NPOI
325 指数的时间序列和 P1、P2 时段的标准差。P1 时段的标准差为 0.82, P2 时段的
326 标准差为 0.67, 说明 P2 时段的 NPO 强度减弱。再将早春 (2~4 月) 的海平面气
327 压异常场回归到 11 年高通滤波后的 VMI 指数, 发现在 P1 时段 (图 10b), VM
328 北部的海温关键区位于高压异常中心的南部和低压异常中心的北部, 这种异常的
329 气压梯度会产生东风异常。而该处的气候态为西风, 这会导致西风减弱。根据风
330 -蒸发-SST 反馈机制 (Xie and Philander, 1994), 西风的减弱促使海洋向大气输
331 送的潜热通量减弱、蒸发减弱, 有利于出现暖海表温度异常。VM 南部的海温关
332 键区位于 NPO 低压异常中心的西部, 因此存在北风异常, 冷平流诱发了冷海表
333 温度异常。在 P2 时段 (图 10c), 由相关分析的结果可知, NPO 高压异常中心
334 位置偏北, 低压异常中心偏南。此时, VM 北部海温关键区位于高压异常西南部,
335 仍然存在显著东风异常, 东风异常诱发了暖海表温度异常, 因此北部海温关键区
336 在 P1 和 P2 时段的标准差基本无变化 (表 2)。但是在 P2 时段, 因为 NPO 南部
337 的低压异常中心位置偏南且强度偏弱, 所以 VM 南部海温关键区不存在北风异
338 常和冷平流, 进而振幅减弱了 39.81%。这使得 VM 的南部和北部海温关键区的
339 经向海温梯度减弱了 16.82%, 最终导致 VM 强度减弱。



340
341 图 10 (a) 1979~2020 年早春 (2~4 月) NPOI 指数的时间序列。 (b) P1 时段 (1979~2002
342 年) 春季 11 年高通滤波后的 VMI 指数与早春 (2~4 月) 的海平面气压场的相关分析 (填色,
343 打点为相关系数通过 90% 的显著性检验) 和回归分析 (等值线, 单位: hPa) 分析, 以及春
344 季 11 年高通滤波后的 VMI 指数与早春 925hPa 风场的回归分析 (矢量, 单位: $m s^{-1}$)。仅
345 绘制出 u 风或 v 风通过 90% 信度检验的部分, 已去除早春冷舌指数线性信号, 蓝框分别为
346 北太平洋维多利亚模态 (VM) 的南部 ($20^{\circ}N \sim 28^{\circ}N$, $159^{\circ}E \sim 160^{\circ}W$) 和北部 ($38^{\circ}N \sim 47^{\circ}N$,
347 $179^{\circ}E \sim 147^{\circ}W$) 海表温度关键区。 (c) 同 (b), 但为 P2 时段 (2004~2020 年)

348 Fig. 10 (a) Time series of early spring (February-April) NPOI during 1979~2020. (b) The
349 correlation (shading, dark dots denote statistical significance at the 90% confidence level) and
350 regression (contour, unit: K) analysis of 11-year high pass VMI with/onto early spring sea level
351 pressure during P1 (1979~2002). The regressed winds at 925 hPa (vector, unit: $m s^{-1}$) are also
352 shown. Only winds at the 90% confidence level are exhibited. The early spring CTI signals were
353 linearly removed before the correlation/regression, and the blue boxes are the southern
354 ($20^{\circ}N \sim 28^{\circ}N$, $159^{\circ}E \sim 160^{\circ}W$) and the northern ($38^{\circ}N \sim 47^{\circ}N$, $179^{\circ}E \sim 147^{\circ}W$) SST key areas of

355 North Pacific Victoria Mode (VM), respectively. (c) is the same as (b), but for P2 (2004~2020)
356 表 2 PC2 (VMI 指数)、北太平洋维多利亚模态 (VM) 北部和南部海表温度关键区在 P1
357 (1979~2002 年) 和 P2 (2004~2020 年) 时段的标准差及变化
358 Tab. 2 The standard deviations and variations of PC2 (VMI), northern and southern SST key areas
359 of North Pacific Victoria Mode (VM) during P1 (1979~2002) and P2 (2004~2020)

	PC2(VMI)	北部	南部	北部-南部
P1	1.10	0.94	1.03	1.07
P2	0.82	0.93	0.62	0.89
变化	-25.45%	-1.06%	-39.81%	-16.82%

360 6 总结与讨论

361 该论文基于多套数据集 (HadISST、ERSSTv5、EN4、CMAP、ERA5)，利
362 用多种方法 (EOF 分析、回归分析、相关分析、lanczos 高通滤波)，研究了春
363 季 VM 对秋季海洋性大陆降水在年际尺度上影响的可能物理机制，并分析了 2003
364 年后，春季 VM 与秋季海洋性大陆降水的年际关系发生年代际减弱的原因，结
365 论如下：

366 (1) 去除赤道太平洋冷舌指数 (CTI) 线性信号后，北太平洋春季海表温
367 度 EOF1 是太平洋年代际振荡 (PDO)，EOF2 是维多利亚模态 (VM)，为东
368 北-西南分布的海表温度偶极子。对 EOF 前两模态的主成分分量进行 11 年高通
369 滤波，仅 PC2 (即 VMI 指数) 与秋季海洋性大陆降水指数 PI 显著相关，相关系
370 数达 -0.63，通过 95% 的信度检验。

371 (2) 11 年高通滤波后，春季的 VMI 指数与 PMM 指数相关系数为 0.46。春
372 季 VM 影响海洋性大陆秋季降水的可能物理机制为：VM 正 (负) 位相时，赤道
373 中太平洋有暖 (冷) 海表温度和次表层海温异常，并且，西北太平洋还有冷 (暖)
374 海表温度异常，这种海表温度梯度有利于赤道异常西 (东) 风的出现。异常西 (东)
375 风会影响赤道开尔文波的传播，使得赤道中东太平洋出现异常的暖 (冷) 海温，
376 进一步影响纬向海表温度梯度，这种海-气相互作用称为 Bjerknes 正反馈。
377 Bjerknes 正反馈维持到秋季，出现较成熟的厄尔尼诺 (拉尼娜) 事件。厄尔尼诺
378 (拉尼娜) 事件改变沃克环流，海洋性大陆出现异常的下沉 (上升) 运动，形成
379 异常的低层辐散、高层辐合 (低层辐合、高层辐散) 的环流形势，最终导致海洋
380 性大陆降水减少 (增多)。

381 (3) 春季 VM 与海洋性大陆秋季降水之间的年际关系在 2003 年发生了年
382 代际变化，1979~2002 年 (P1) 时段，春季 VM 与秋季海洋性大陆降水关系显著，
383 VM 的标准差为 1.10，2004~2020 年 (P2) 时段，关系不显著，VM 的标准差为
384 0.82。二者年际关系发生年代际变化的直接原因是 VM 强度的减弱，而 VM 强度
385 的减弱则是因为北太平洋涛动 (NPO) 强度减弱、位置移动。P2 时段 NPO 低压

386 异常中心位置偏南且强度偏弱，这导致 VM 的南部海表温度关键区振幅减弱。
387 结合北部海表温度关键区振幅基本不变，可得 VM 的南部和北部海表温度关键
388 区的海表温度梯度减弱，最终使得 VM 强度减弱。

389 本研究指出春季 VM 的变化可以在一定程度上反应海洋性大陆 2 个季节后
390 （秋季）的降水变化，对秋季降水的方差解释率可达 40%，说明春季 VM 可在
391 气候预测时作为影响因子之一，提高预测能力。但是，仅聚焦于春季 VM，并不
392 能完全理解和预测海洋性大陆的秋季降水。本文主要从 VM 通过影响 ENSO 的
393 路径研究 VM 间接影响秋季降水的可能物理机制，研究结果还有待数值模式验
394 证。春季 VM 与秋季降水的年际关系发生了年代际减弱，本文主要从 NPO 的角
395 度探讨了可能原因，并不足以完全解释这种年代际变化，更多可能的原因还有待
396 探索。

397 参考文献：

- 398 Alexander M A, Vimont D J, Chang P, et al. 2010. The impact of extratropical atmospheric
399 variability on ENSO: testing the seasonal footprinting mechanism using coupled model
400 experiments [J]. *J. Climate*, 23(11): 2885–2901. doi:[10.1175/2010JCLI3205.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3205.1)
- 401 Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from equatorial Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97(3):
402 163–172. doi:[10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2)
- 403 Bond N A, Overland J E, Spillane M, et al. 2003. Recent shifts in the state of the North Pacific [J].
404 *Geophys. Res. Lett.*, 30 (23): GL018597. doi:[10.1029/2003GL018597](https://doi.org/10.1029/2003GL018597)
- 405 Chang P, Zhang L, Saravanan R, et al. 2007. Pacific meridional mode and El Niño-Southern
406 Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(16): GL030302. doi:[10.1029/2007GL030302](https://doi.org/10.1029/2007GL030302)
- 407 Chiang J, and Vimont D J. 2004. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical
408 atmosphere-ocean variability [J]. *J. Climate*, 17(21): 4143–4158. doi:[10.1175/JCLI4953.1](https://doi.org/10.1175/JCLI4953.1)
- 409 Daniel J V, John M W, and David S B. 2003. The seasonal footprinting mechanism in the Pacific:
410 implications for ENSO [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 16(16): 2668–2675.
411 doi:[10.1175/1520-0442\(2003\)016<2668:TSFMIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2668:TSFMIT>2.0.CO;2)
- 412 Ding R Q, Li J P, Tseng Y H, et al. 2015a. The Victoria mode in the North Pacific linking
413 extratropical sea level pressure variations to ENSO [J]. *J. Geophys. Res. :Atmos.*, 120(1): 27–45.
414 doi:[10.1002/2014JD022221](https://doi.org/10.1002/2014JD022221)
- 415 Ding R Q, Li J P, Tseng Y H, et al. 2015b. Influence of the North Pacific Victoria mode on the
416 Pacific ITCZ summer precipitation [J]. *J. Geophys. Res. :Atmos.*, 120(3): 964–979.
417 doi:[10.1002/2014JD022364](https://doi.org/10.1002/2014JD022364)
- 418 Ding R Q, Li J P, Tseng Y H, et al. 2018. Influences of the North Pacific Victoria mode on the
419 South China Sea summer monsoon [J]. *Atmos.*, 9(6): 229. doi:[10.3390/atmos9060229](https://doi.org/10.3390/atmos9060229)
- 420 Hu C D, Chen D K, Huang G, et al. 2018. Dipole types of autumn precipitation variability over
421 the subtropical East Asia-Western Pacific modulated by shifting ENSO [J]. *Geophys. Res. Lett.*,

- 422 45 (17): GL078982. doi:[10.1029/2018GL078982](https://doi.org/10.1029/2018GL078982)
- 423 Hu C, Lian T, Cheung H N, et al. 2020. Mixed diversity of shifting IOD and El Niño dominates
424 the location of Maritime Continent autumn drought [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 7, 1150–1153.
425 doi:[10.1093/nsr/nwaa020](https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa020)
- 426 Hu P, Chen W, Chen S F, et al. 2021. The weakening relationship between ENSO and the South
427 China Sea summer monsoon onset in recent decades [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 39(3): 443–455.
428 doi:[10.1007/s00376-021-1208-6](https://doi.org/10.1007/s00376-021-1208-6)
- 429 姬凯. 2020. 北太平洋维多利亚模态对 ENSO 及华南冬季极端降水的影响 [D]. 兰州大学. Ji
430 Kai. 2020. Impact of Victoria mode in North Pacific on ENSO and South China winter extreme
431 precipitation [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University.
- 432 Kurniadi A, Weller E, Min S K, et al. 2021. Independent ENSO and IOD impacts on rainfall
433 extremes over Indonesia [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(6): 3640–3656. doi:[10.1002/joc.7040](https://doi.org/10.1002/joc.7040)
- 434 Ji K, Tseng Y, Ding R Q, et al. 2023. Relative contributions to ENSO of the seasonal footprinting
435 and trade wind changing mechanisms associated with the Victoria mode [J]. *Climate Dyn.*, 60(1):
436 47–63. doi:[10.1007/s00382-022-06300-6](https://doi.org/10.1007/s00382-022-06300-6)
- 437 Li C, Scaife A A, Lu R, et al. 2016. Skillful seasonal prediction of Yangtze river valley summer
438 rainfall[J]. *Environ. Res. Lett.*, 11(9): 094002. doi:[10.1088/1748-9326/11/9/094002](https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094002)
- 439 李永华, 徐海明, 刘德. 2009. 2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常 [J]. *气
440 象学报*, 67(1): 122–132. Li Yonghua, Xu haiming, and Liu De. 2009. Features of the extremely
441 severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in
442 summer 2006. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 67(1): 122–132.
443 doi:[10.11676/qxxb2009.013](https://doi.org/10.11676/qxxb2009.013)
- 444 Lindzen R S, and Nigam S. 1987. On the role of sea surface temperature gradients in forcing
445 low-level winds and convergence in the tropics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44(17): 2418–2436.
446 doi:[10.1175/1520-0469\(1987\)044<2418:OTROSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<2418:OTROSS>2.0.CO;2)
- 447 刘凯, 祝从文. 2015. 冬季北太平洋海温主模态在 1990 年前后调整及其成因初探 [J]. 大气
448 科学, 39(5): 926–940. Liu Kai, and Zhu Congwen. 2015. Regime shift of winter North Pacific
449 Sea Surface Temperature after 1990 and its possible causes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric
450 Sciences* (in Chinese), 39(5): 926–940. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14218](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14218)
- 451 毛欣. 2019. 北太平洋 Victoria 模态与热带太平洋海温联系的研究 [D]. 南京信息工程大学.
452 Mao Xin. 2019. The research of the relationship between Victoria Mode in the North Pacific and
453 SST in the Tropical Pacific [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information
454 Science & Technology.
- 455 Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with
456 impacts on salmon production [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78(6): 1069–1079.
457 doi:[10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
- 458 North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical

- 459 orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110(7): 699–706. doi:[10.1175/1520-0493\(1982\)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2)
- 460
- 461 Nur’utami M N, and Hidayat R. 2016. Influences of IOD and ENSO to Indonesian rainfall
462 variability: role of atmosphere-ocean interaction in the Indo-Pacific sector [J]. *Procedia Environ.*
463 *Sci.*, 33: 196–203. doi:[10.1016/j.proenv.2016.03.070](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.070)
- 464 Pu X S, Chen Q L, Zhong Q J, et al. 2019. Influence of the North Pacific Victoria mode on
465 western North Pacific tropical cyclone genesis [J]. *Climate Dyn.*, 52(1–2): 245–256.
466 doi:[10.1007/s00382-018-4129-z](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4129-z)
- 467 Qi L, and Mao X. 2021. The North Pacific Victoria mode: More effective prediction signal for the
468 Central Pacific El Niño than the North Pacific Oscillation [J]. *Int. J. Climatol.*, 42(1): 493–506.
469 doi:[10.1002/joc.7256](https://doi.org/10.1002/joc.7256)
- 470 Ramage C S. 1968. Role of a tropical Maritime Continent in the atmospheric circulation [J]. *Mon.*
471 *Wea. Rev.*, 96(6): 365–370. doi:[10.1175/1520-0493\(1968\)096<0365:ROATMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0365:ROATMC>2.0.CO;2)
- 472 金大超, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 2010. 近 50 年华东地区夏季异常降水空间分型及与其相联系的遥相关 [J]. *大气科学*, 34(5): 947–961. Jin Dachao, Guan Zhaoyong, Cai Jiaxi, et al. 2010. Anomalous summer rainfall patterns in east China and the related teleconnections over recent 50 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34(5): 947–961. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.10](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.10)
- 473
- 474
- 475
- 476
- 477 史良, 丁瑞强, 巢婧华. 2020. 北太平洋维多利亚模态对西太平洋暖池面积和东边界的影响
478 研究 [J]. *海洋预报*, 37(6): 31–43. Shi Liang, Ding Ruiqiang, and Chao Jinghua. 2020. The
479 Influence of North Pacific Victoria Mode on the area and eastern boundary of the Western Pacific
480 warm pool [J]. *Marian Forecasts* (in Chinese), 37(6): 31–43. doi:
481 [10.11737/j.issn.1003-0239.2020.06.004](https://doi.org/10.11737/j.issn.1003-0239.2020.06.004)
- 482 Vimont D J, Wallace J M, and Battisti D S. 2003a. The seasonal footprinting mechanism in the
483 Pacific: Implications for ENSO [J]. *J. Climate*, 16(16): 2668–2675.
484 doi:[10.1175/1520-0442\(2003\)016<2668:TSFMIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2668:TSFMIT>2.0.CO;2)
- 485 Vimont D J, Battisti D S, and Hirst A C. 2003b. The seasonal footprinting mechanism in the
486 CSIRO general circulation models [J]. *J. Climate*, 16(16): 2653–2667.
487 doi:[10.1175/1520-0442\(2003\)016<2653:TSFMIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2653:TSFMIT>2.0.CO;2)
- 488 Wang S-Y, L’Heureux M, and Chia H-H. 2012. ENSO prediction one year in advance using
489 western North Pacific sea surface temperatures [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39(5): GL050909.
490 doi:[10.1029/2012GL050909](https://doi.org/10.1029/2012GL050909)
- 491 Wang, S-Y, L'Heureux M, and Yoon J-H. 2013. Are greenhouse gases changing ENSO precursors
492 in the western North Pacific [J]. *J. Climate*, 26(17): 6309–6322. doi:[10.1175/JCLI-D-12-00360.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00360.1)
- 493 Wen T, Chen Q, Li J P, et al. 2020. Influence of the North Pacific Victoria Mode on the
494 Madden-Julian Oscillation [J]. *Front. Earth Sci.*, 8: 584001. doi:[10.3389/feart.2020.584001](https://doi.org/10.3389/feart.2020.584001)
- 495 Xia Y, Guan Z Y, and Long Y. 2019. Relationships between convective activity in the Maritime

- 496 Continent and precipitation anomalies in Southwest China during boreal summer [J]. *Climate*
497 *Dyn.*, 54(1–2): 973–986. doi: [10.1007/s00382-019-05039-x](https://doi.org/10.1007/s00382-019-05039-x)
- 498 Xie S P, and Philander S G H. 1994. A coupled ocean–atmosphere model of relevance to the ITCZ
499 in the eastern Pacific. *Tellus A.*, 46(4): 340–350. doi:[10.1034/j.1600-0870.1994.t01-1-00001.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.1994.t01-1-00001.x)
- 500 谢巍. 2019. 北太平洋维多利亚模态 (Victoria mode) 和 ENSO 年代际关系探讨及其海洋通
501 道研究 [D]. 成都信息工程大学. Xie Wei. 2019. Discussion on the interdecadal relationship
502 between the North Pacific Victoria mode and ENSO as well as its ocean channel research [D]. M. S.
503 thesis (in Chinese). Chengdu University of Information Science & Technology.
- 504 Yang S, Zhang T, Li Z, et al. 2019. Climate Variability over the Maritime Continent and its role in
505 global climate variation: a review [J]. *J. Meteor. Res. Japan*, 33(6): 993–1015. doi:
506 [10.1007/s13351-019-9025-x](https://doi.org/10.1007/s13351-019-9025-x)
- 507 Yu J Y, and Kim S T. 2011. Relationships between extratropical sea level pressure variations and
508 the central Pacific and eastern Pacific types of ENSO [J]. *J. Climate*, 24(3): 708–720.
509 doi:[10.1175/2010JCLI3688.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3688.1)
- 510 Zhang L, Chang P, and Ji L. 2009a. Linking the Pacific meridional mode to ENSO: coupled model
511 analysis [J]. *J. Climate*, 22(12): 3488–3505. doi:[10.1175/2008JCLI2473.1](https://doi.org/10.1175/2008JCLI2473.1)
- 512 Zhang L, Chang P, and Tippett M K. 2009b. Linking the Pacific meridional mode to ENSO:
513 Utilization of a noise filter [J]. *J. Climate*, 22(4): 905–922. doi:[10.1175/2008JCLI2474.1](https://doi.org/10.1175/2008JCLI2474.1)
- 514 Zhang Y, Wallace J M, and Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. *J.*
515 *Climate*, 10(5): 1004–1020. doi:[10.1175/1520-0442\(1997\)010<1004:ELIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2)
- 516 张秀年. 2012. 印太暖池区域海气相互作用的年际变化及其与低纬高原夏季降水异常的关系
517 研究 [D]. 云南大学. Zhang Xiunian. 2012. Interannual variation of sea-air interaction in
518 Indo-Pacific warm pool region and its relationship with summer precipitation anomalies in
519 low-latitude plateau [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Yunnan University.
- 520 Zou Q, Ding R Q, Li J P, et al. 2020. Is the North Pacific Victoria mode a predictor of winter
521 rainfall over South China? [J]. *J. Climate*, 33(20): 8833–8847. doi:[10.1175/JCLI-D-19-0789.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0789.1)