投稿信

1

2

3 PDO 是太平洋年代际变率的主要信号,也是全球年代际变率最强、最重要
4 的信号之一。PDO 对 ENSO、东亚夏季风和中国气候的年代际变化均有显著的
5 调制作用,研究 PDO 冷暖位相的转换有助于中国汛期雨带位置预测。因此开展
6 PDO 年代际转折及其早期预警信号研究具有重要的理论意义和应用价值。

复杂非线性系统往往存在多个平衡状态,系统在不同平衡状态之间转换时会 7 突破某些阈值,当系统突破某些阈值之后不能恢复到原来的状态时,这些阈值称 8 为临界阈值,或称为临界点。系统突破临界点到达另一个平衡状态即为临界转换。 9 这种临界转换现象广泛存在于包括气候转折/突变在内的不同领域。某一系统的 10 临界转换往往对系统本身或相关联的其他系统造成巨大影响。目前,大部分研究 11 都是针对系统发生临界转换的检测,但对临界转换的机理及其早期预警信号的研 12 究依然较少,所以这是目前气候变化研究领域需要加强的一个重要方向。近年来, 13 科学家们发现临界慢化理论在研究复杂动力系统的早期预警信号方面展示了较 14 大潜力。已有研究将临界慢化理论用于地震及生态系统突变早期预警信号的研 15 究,取得了很好的效果。针对 PDO 位相转变的复杂非线性特征,本文围绕"复杂 16 非线性系统临界转换早期预警信号"这一核心科学问题,结合非线性科学的相关 17 理论和方法,基于历史监测和模式模拟资料对 PDO 位相转变的早期预警信号进 18 行了研究。 19

20 将临界慢化理论引入 PDO 序列位相转变早期预警信号的研究,是国内一项
首创性的工作,对深入认识 PDO 位相转变和寻找其早期预警信号,促进气候系
22 统转折/突变预测的研究都具有重要的现实意义和科学价值。同时,临界慢化现
23 象为提高对观测资料及模式资料的认识、判断异常波动是否趋于临界阶段以及提
24 高灾变预测水平提供了可能。另外,本文还对 CMIP5 的 36 个气候模式的的 PDO
25 的 SST 进行 EOF 分解,和相关合成分析,得到未来百年的 PDO 序列。对未来
26 PDO 位相转变进行了预测。

27 本文所研究的科学问题源于多学科领域交叉的共性难题,具有鲜明的学科交
28 叉特征,旨在通过交叉研究产出重大科学突破,促进分科知识融通发展为完整的
29 知识体系。

1	近百年及未来百年 PDO 位相年代际转变检测及其早期预警
2	信号研究
3	吴浩1.4 颜鹏程2 侯威3 赵俊虎3 封国林3,57
4	1 湖南省气候中心,长沙 410118
5	2 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020
6	3 中国气象局国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081
7	4 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118
8	5 扬州大学物理科学与技术学院,扬州 225002
9	
10	摘更. 木文基壬临界愠化的理论 采田大平洋在代际振荡指数 (Pacific
11	间安 : 本文本 1 幅介 侵 化 的 垤 化 , 水 / 太 / 六 平 代 你 派 初 指 氨 (1 a c n c Decadal Oscillation PDO) 的 近 百 年 历 史 数 据 (1900~2019 年) 及 去 来 百 年 横 式
12	植拟粉据(2006~2100 年)、首先通过滑动 t 检验确定 PDO 位相转变的时间。进
13	而供助于表征临界幅化现象的方差和白相关系数。研究了 PDO 在代际位相转折
14	的目期预整信号 结里表明, (1) 近百年来 PDO 发生了 4 次显茎的位相转亦
15	每次位相转变前的 5~10 年可以提取到早期预整信号. (2) 通过对 CMIP5 气候
10	模式资料计算得到的 PDO 进行统计会成得到表来百年的 PDO 序列, 检测结果表
18	明在 2040 年和 2080 年前后发生年代际转折,转折前的 5~10 年能够检测到早期
10	新整信号, (3) 近百年和未来百年 PDO 序列的位相转变及見期新整信号研究证
20	灾车 PDO 发生位相转变之前方差和白相关系数首能提前数在绘中预整信号,也
20	表在TDO 及工业相将文之前为左和自相入录数态能促前数平组出顶音而与,也 揭示了去来 PDO 的转折时间
21	四小丁木木TDO [1]+? 1)[1]。
22	关键词: PDO, 非线性, 临界慢化, 转折/突变, 早期预警信号
24	DOI: doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.20127 中图分类号 P467 文献标识码 A
25	
	究 .E-mail:wuhaophy@163.com
	†通讯作者 封国林,男,博士,研究员,主要从事短期气候预测研究.E-mail: fenggl@cam.gov.cn
	" 贝切坝日 平上1F文国豕日杰科子 盔玉坝日(42003038,410/3092,41//30/8,42003030)、湖南省日然科学 基金项目 2020JJ5298,干旱气象科学研究基金(IAM202104)共同资助。

Supported by National Natural Science Foundation of China (Grant 42005058, 41675092, 41775078, 42005056), Hunan Provence Natural Science Foundation of China (Grant 2020JJ5298), Foundation of drought Meteorological Science Research (IAM202104).

A study on the detection of decadal phase transition and

early warning signals of PDO in recent and future 100

28

years

WU Hao^{1,4} YAN Peng-Cheng² 29 HOU Wei³ ZHAO Jun-Hu³ FENG Guo-Lin^{3,5} 30 1 Hunan Climate center, Changsha, 410118, China 31 2 Institude of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China 32 3 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological 33 Administration, Beijing 100081, People's Republic of China 4 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha, 410118, 34 35 China 36 5 College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China 37 38 Abstract Based on the theory of critical slowing down, the present paper studies the decadal phase 39 transition and early warning signals of PDO Series by using the historical monitoring data of PDO in 40 the past 100 years (1900-2019) and the simulation data of future century model (2006-2100). First, the 41 phase transition time of PDO is determined by Moving t-test technique, and then the early warning signal of phase transition is studied by means of variance and autocorrelation coefficient which 42 43 characterize the critical slowing phenomenon. The results show that: (1) There have been four 44 significant phase changes in PDO in the recent 100 years, and early warning signals can be given 5-10 45 years in advance; (2) In the next 100 years, the study of PDO which is obtained based on the CMIP5 data shows that PDO will have two decadal transitions around 2040 and 2080, and early warning 46 47 signals can also be detected 5-10 years in advance; (3) Based on the study of phase transition detection 48 and early warning signals of PDO sequences in recent and future 100 years, the variance and 49 autocorrelation coefficients can be detected as the early warning signals of abrupt change several years in advance, which also reveals the climate changes of PDO in the future. 50 51

Keywords: PDO, nonlinear, critical slowing down, transition/abrupt change,early warning
 signals

55 1引言

PDO(Pacific Decadal Oscillation,太平洋年代际振荡)是太平洋年代际变率 56 的主要信号(Mantua et al., 1997),定义为北太平洋 20°N 以北的海表温度的主 57 成分分析第一模态的时间系数,其冷暖位相在空间分布上呈现相反的情况,暖位 58 相时,北太平洋海表温度异常冷,北太平洋海平面气压低于平均值,反之为冷位 59 相(Zhang et al., 1997; Mantua et al., 1997; 2002)。作为全球海表温度场年代际变 60 化的重要成员之一, PDO 是太平洋海温变化的主要年代际信号, 也是全球年代 61 际变率最强、最重要的信号之一(Davis, 1976; Cayan et al., 1998; Mantua and 62 Hare, 2002; 肖栋等, 2007; Wang et al., 2008; Birk et al., 2010)。PDO 是东亚夏 63 季风的主要驱动力,是造成东亚夏季风 30~40 年周期振荡的主要原因 64 (Gershunov and Barnett, 1998; Minobe, 2000; 丁一汇等, 2018; 2020)。研 65 究表明, PDO 与 AMO 同样存在很好的相关性, 开展 PDO 的模拟及预测能够为 66 AMO 的研究提供依据(Delworth and Mann, 2000; Timmermann et al., 67 2005; Zhang and Delworth, 2007; Okumura et al., 2009; Chikamoto et al., 2013; 68 Fuentes-Franco et al., 2016; 吴波等, 2017; Lin et al., 2019; Zhang et al., 2020)。 69 70 陈红等(2019)研究表明, CMIP5 多数模式对 PDO 周期有着较好的刻画能力, 能模拟出 PDO 的年代际变化周期。Qian 等(2014) 指出, PDO 与华北干旱呈现 71 显著的负相关关系,开展 PDO 位相转变的研究能够为华北干旱预测提供科学依 72 据。 73

当前,有关 PDO 的研究主要集中于其位相的年代际变化及其造成的影响, 74 而鲜有涉及关于 PDO 位相年代际转折的预测研究。 PDO 对 ENSO、东亚夏季 75 风以及中国气候的年代际变化均有显著的调制作用,对 PDO 冷暖位相转换的预 76 测将十分有助于中国汛期雨带位置预测(朱益民和杨修群,2003;杨修群等, 77 2004)。然而由于 PDO 位相年代际转折涉及复杂的非线性过程,基于现有预测 78 理论和技术水平,想要准确预测 PDO 位相年代际转折仍是一项异常艰巨的任务 79 (杨培才等, 2003; 王革丽等, 2011; He et al., 2016)。因此, 亟需开展 PDO 位 80 相年代际转折早期预警信号研究。 81

82 许多复杂非线性系统具有临界阈值(即系统行为或结构发生急剧变化的位83 置,又称之为临界点),当系统发生转折/突变时,系统将在临界点附近从一种

状态转换到另一种状态(Kuznetsov, 2004; Scheffer et al., 2009; Fisher et al., 2011), 84 也就是发生了临界转换现象。这一临界转换现象广泛存在于自然界和人类社会的 85 各个领域,如气候系统的转折/突变、传染性疾病的爆发、金融市场的崩溃、物 86 种的灭亡、绿洲的消失等(Venegas et al., 2005; Lenton et al., 2012; Trefois et al., 87 2015; Gopalakrishnan et al., 2016; Spielmann et al., 2016)。某一系统的临界转换往 88 往对系统本身或相关联的其他系统造成巨大影响,如气候转折/突变对人类赖以 89 生存的自然环境和社会经济都有着重要的影响(李建平等,1993;严中伟等,1993; 90 王邵武等, 1995; Alley et al., 2005)。 91

临界转换往往伴随临界慢化现象的发生, Carpenter 等人(Carpenter et al., 92 2006; Guttal et al., 2008; Scheffer et al., 2009,)研究发现复杂系统临界慢化现象 93 可以作为早期预警信号。临界慢化是一个统计物理学概念,是指动力系统由一种 94 位相向另一种位相发生转变之前,系统趋近至临界点附近,此时临界点附近会出 95 现有利于新位相形成的分散涨落现象,这种分散涨落不仅表现为涨落幅度的增 96 大,而且还表现为涨落持续时间的拉长、扰动恢复速率的变慢,以及回到旧位相 97 的概率变小等现象,这一现象称为慢化(于渌等,1984)。Marten Scheffer 等(2009) 98 对气候系统、生态系统等多个真实系统的研究结果指出,当系统向临界点趋近时, 99 临界慢化现象将导致系统动力学中出现3种可能的早期预警信号:扰动的恢复变 100 慢、自相关系数增大、方差增大。晏锐等(2011)将临界慢化理论用于 2008 年 101 汶川地震早期预警信号的研究,揭示了水氡浓度的震前变化是地震发生前夕的有 102 效早期预警信号;苏小芸等(2020)也利用临界慢化现象研究了甘东南地区的地 103 震并给出早期预警信号。吴浩等(2012; 2013)、Tong等(2014)、颜鹏程等 104 (2012)将临界慢化理论用于中国各区域气温、阿留申低压等气候资料的研究结 105 果表明,基于临界慢化理论的气候转折/突变早期预警信号的研究方法具有很好 106 的有效性和适用性。这些都为基于临界慢化理论研究 PDO 位相转变的早期预警 107 信号提供了新思路。 108

109 针对 PDO 位相转变的复杂非线性特征,本文基于临界慢化理论的相关原理
110 和方法,对历史监测和模式模拟资料对 PDO 位相转变的早期预警信号进行了理
111 论和方法研究。首先利用滑动 t 检验对 PDO 近百年历史监测和未来百年模式模
112 拟资料进行位相转变检测,进而通过对表征临界慢化现象相关参数的分析,研究
113 PDO 位相转变的早期预警信号,为准确预测 PDO 位相年代际转折提供一个新的

114 视角和理论基础。

- 115 2 资料及方法
- 116 2.1 资料

本文研究使用了历史和未来百年 PDO 资料,其中历史资料为美国国家海洋 117 与大气管理局(NOAA)公布的 PDO 指数(1900 年 1 月~2019 年 12 月)。未来 118 资料是基于 CMIP5 的 36 个气候模式 (表 1) 预估的海表温度 (SST) 资料计算 119 得到的,计算时首先根据 PDO 的定义对不同模式的 SST 进行 EOF 分解,得到 120 各自的 PDO; (*i*=1, 2, 3, ..., 36) 和相应的空间模态; 进而对不同模式的 PDO; 进 121 行优选,挑选最具代表性的 PDO;;最后对优选的 PDO;进行合成,得到未来百年 122 PDO 序列。值得注意的是, PDO 不仅代表北太平洋 SST 在时间上的变化特征、 123 还反映了北太平洋 SST 的空间特征,为此,分别计算任意 PDO_i 与其它 35 个 PDO_i 124 $(i \neq i)$ 的相关系数并计算平均,还对 PDO_i的空间模态做相同的处理,则将 PDO_i 125 的平均相关系数大于 0.15、空间模态平均相关系数大于 0.5(均通过 0.01 的显著 126 性检验)的模式视为最具代表性的模式,共有21个(表1中粗体),对这些模 127 式的 PDO_i进行合成,得到未来百年的 PDO 序列。 128

- 129
- 130

表 1 CMIP5 的 36 个气候模式

	Tab 1 The 36 climate models of CMIP5						
编号	模式名称	编号	模式名称	编号 模式名称		编号 模式名称	
1	ACCESS1-0	10	CMCC-CMS	19	GISS-E2-H-CC	28	IPSL-CM5B-LR
2	ACCESS1-3	11	CNRM-CM5	20	GISS-E2-R	29	MIROC-ESM
3	BCC-CSM1-1	12	CSIRO-Mk3-6-0	21	GISS-E2-R-CC	30	MIROC-ESM-CHEM
4	BCC-CSM1-1-M	13	FGOALS-g2	22	HadGEM2-AO	31	MIROC5
5	BNU-ESM	14	FIO-ESM	23	HadGEM2-CC	32	MPI-ESM-LR
6	CanESM2	15	GFDL-CM3	24	HadGEM2-ES	33	MPI-ESM-MR
7	CCSM4	16	GFDL-ESM2G	25	inmcm4	34	MRI-CGCM3
8	CESM1-BGC	17	GFDL-ESM2M	26	IPSL-CM5A-LR	35	NorESM1-M
9	CMCC-CM	18	GISS-E2-H	27	IPSL-CM5A-MR	36	NorESM1-ME

- 131 2.2 研究方法
- 132 (1) 方差和自相关系数



133 方差是描述样本中数据相对于均值x偏离程度的特征量,自相关系数是描述
134 同一变量不同时刻相互之间相关性的统计量(魏凤英,1999)。本文通过滑动计

135 算序列的方差和自相关系数,从而寻找 PDO 序列位相转变的早期预警信号。具136 体做法简要概述如下(图1):

a) 滑动计算方差:以 PDO 序列为例,PDO 序列总长度为 L;从 PDO 序列
中选取子序列,称之为滑动窗口,以 ML 表示;然后滑动截取相同长度的 PDO
子序列,滑动长度称为滑动步长,以 MT 表示;选定 ML 和 MT 后,通过滑动得
到多条长度相同的子序列 L1,L2,L3,…Ln…,计算 L1,L2,L3,…Ln…序
列的均方差,得到一条方差序列 S1,S2,S3,…Sn…。本文在滑动计算方差时,
将 ML 选为 120 月(10 年), MT 选为 3 个月。

b) 滑动计算自相关系数:同样,以 PDO 序列为例,将子序列 L1,L2,
L3,…Ln…往后滑动一个 LT(滞后时间)长度得到新的子序列 L12,L22,
L32,…Ln2…,分别计算 L1 与 L12、L2 与 L22、L3 与 L32、…Ln 与 Ln2…的
相关系数,得到一条相关系数序列α1,α2,α3,…αn…,因为相关系数计算的子
序列都来自 PDO 总序列,因此称之为自相关系数。本文在滑动计算自相关系数
时,将 ML 选为 120 月(10 年), MT 选为 3 个月,LT 选为 1 个月。



150

图1 滑动计算方差、自相关系数示意图

⁽a) 滑动计算方差,其中L1,L2,L3,…Ln…代表长度相同的各个窗口(ML),S1,S2,S3,…Sn…代表对应窗口长度数据的均方差,L为序列总长度,MT为滑动步长;(b)滑动计算自相关系数,L1(L12),L2(L22),L3(L32),…Ln(Ln2)…代表长度相同的各个窗口(ML),a1代表L1和L12的自相关系数,a2
代表L2和L22的自相关系数,…an代表Ln和Ln2的自相关系数,LT表示滞后时间,L、MT意义同(a)。
Fig.1We calculated the variance and autocorrelation coefficient by sliding the window.
(a) We calculated variance by sliding the window,L1,L2,L3,…,Ln…denote windows of the same length,S1,S2,S3,…,
Sn… represent the variances of the corresponding windows,L is the total length of the sequence, and MT is the sliding step; (b)

158 we calculated the autocorrelation coefficient by sliding the window, L1(L12), L2(L22), L3(L32), ..., Ln(Ln2) ... represent 159 windows of the same length, a1 denotes the autocorrelation coefficients of L1 and the L12, a2 denotes the autocorrelation 160 coefficient of the L2, while L22, ... the an refer to the autocorrelation coefficients of the Ln and Ln2, LT represents the lag time, 161 and L and MT have the same meaning as those in Fig.1(a). 162 (2) 临界慢化、自相关增大以及方差增大的关系 163 当系统趋近于临界状态、系统控制参数趋近于临界阈值时,临界慢化往往导 164 致自相关和方差增大现象(Carpenter et al., 2006; Scheffer et al., 2009)。首先假 165 定状态变量存在周期为∆t的受迫扰动(附加噪声),扰动过程中,平衡的回归 166 呈近似指数关系,恢复速度为λ。在一个简单的自回归模型中,可以这样描述: 167 (1) $x_{n+1} = e^{\lambda \Delta t} x_n + s \varepsilon_n$ 168 其中 x_n 是系统状态变量到平衡态的偏离量, ε_n 为符合正态分布的随机量(系统 169 白噪声),s为均方差。如果 λ 和 Δt 不依赖于 x_{a} ,此过程可简化为一阶的自回归 170 模型 (AR(1)): 171 (2)172 $x_{n+1} = \alpha x_n + s \varepsilon_n$ 其中,自相关系数 $\alpha = e^{\lambda t}$ 。对于白噪声,自相关系数接近0;红噪声自相关 173 系数接近1。 174 对AR(1)过程通过方差来分析: 175 $Var(x_{n+1}) = E(x_n^2) + (E(x_n))^2 = \frac{s^2}{1 - \alpha^2}$ (3)176 一般来讲,当系统在向临界点趋近的过程中,小幅度扰动的恢复速率会越来 177 越慢(Bence et al., 1995; Dakos et al., 2008), 当系统趋近于临界点时,恢复速率 178 λ 将趋于零且自相关项 α 趋近于 1,由式 (3) 知方差趋近于无限大。因此可以 179 将方差和自相关系数增大作为系统趋近临界点的早期预警信号。本文在计算中 s 180 代表整个序列的方差,是一个定值;而(3)式中 Var 的值随窗口大小和滑动步 181 长变化。 182 (3) 滑动 t 检验法 183 滑动 t 检验法(Moving t-test, MTT)是通过考察两组样本平均值的差异是 184

185 否显著来检验突变的(魏凤英, 1999)。其基本思想是把一气候序列中两段子序
列均值有无显著差异看做来自两个总体均值有无显著差异的问题来检验。如果两
87 段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平,可以认为均值发生了质变,有突
变发生。要注意的是 MTT 方法子序列时段的选择带有人为性,为避免任意选择
子序列长度造成突变点的漂移,具体应用时,可以反复变动子序列长度进行试验
比较,以提高计算结果的可靠性。本文利用该方法检测 PDO 序列的位相转变。

- 191 3 计算结果与讨论
- 192 3.1 近百年 PDO 位相转变检测及其早期预警信号研究

193 PDO 是太平洋海温年代际变率的主要信号,也是全球海表温度场年代际变
194 化的重要成员之一,开展 PDO 年位相代际转折早期预警信号的研究有重要意义。
195 本节基于临界慢化理论研究近百年(1900-2019年) PDO 位相年代际转折的早期
196 预警信号。

197 3.1.1 近百年 PDO 位相年代际转变检测

图 2 是 1900-2019 年 PDO 指数,图 3 是利用 MTT 方法检测 PDO 序列的转
折。可以看出在 1921 年和 1976 年前后均出现冷相位向暖位相的转换,而在 1942
年和 1998 年前后出现了暖位相向冷相位的转换,即 PDO 序列在这些时刻存在显
著的年代际转折(严中伟,1992; Mantua et al.,1997; Hare et al., 2000; Mantua et al.,2002; 肖栋等,2007; Lenton et al., 2012),其中 1976 年前后的转折被认为是近
几十年来全球增暖的开始而备受关注。







206

黑色曲线为 51 月滑动平均提取的趋势信息)





Fig. 3 The phase transition detection of PDO sequence in recent 100 years based on MTT method(dotted line indicates passing
 statistical test with reliability of 0.05).

(a) The sliding window t is 5 years; (b) the sliding window t is 12 years

219

218

220 3.1.2 近百年 PDO 位相转变早期预警信号研究

根据检测到的近百年 PDO 序列的四次转折,本节将利用临界慢化理论研究 221 转折的早期预警信号。图4所示为近百年 PDO 序列的方差信号的检测结果,其 222 中 ML 为 120 个月(10 年)、MT 为 3 个月, 选定 ML 和 MT 后滑动计算序列方 223 差具体操作参考图 1。图 4(a)为 PDO 序列 1921 年位相转变的方差信号检测结 224 果,图中MT表示将选定窗口大小的序列向后滑动固定步长得到新序列并对新序 225 列求方差。从图4(a)中箭头标识处容易看出,在1916年左右方差逐渐增大。 226 临界慢化理论表明系统趋近临界阈值时,内在变化速率降低、系统在任意时刻的 227 状态与较前时刻的状态越来越相似,即自相关系数将趋近于1;临界慢化将降低 228 系统跟踪涨落的能力,从而对方差产生相反的效果,根据(3)式方差将越来越 229 大,即系统趋近临界点时的方差增大、自相关增大的现象可以作为系统将发生状 230

态转换的早期预警信号,自1916年逐渐增大的方差指示了未来(1921年)出现 231 的位相转换。由此可知, PDO 此次位相转变早期预警信号出现的时间与其位相 232 转变发生的时间相差约5年。同样分析图4(b)、(c),针对近百年PDO序 233 列在 1942 年、1976 年位相转变的方差信号出现在 1933 年和 1969 年,分别提前 234 了9年、7年。值得注意的是1998年 PDO 位相转换之前出现了数次方差阶段性 235 增加(分别在1981年前后、1989年前后和1994年前后),这实际上是因为不 236 同窗口、滑动步长对检测结果稳定性存在一定的影响。以往研究(吴浩等,2012; 237 2013)表明,在数据量一定的情况下,窗口越大、滑动步长越长结果越稳定,即 238 更大的窗口、更长的滑动步长检测到的信号越可靠,通过改变不同的窗口和滑动 239 步长发现,1989年的方差信号始终存在,因此认为1998年 PDO 年代际转折的 240 早期预警信号出现在 1989 年。综上所述,近百年 PDO 序列主要发生了四次位相 241 转变,在位相转变发生前 5-10 年均检测到方差增大的早期预警信号, 242





249 (a)Variance signal detection of phase transitions in 1921; (b)Variance signal detection of phase transitions in 1942; (c) Variance

250

signal detection of phase transitions in 1976; (d)Variance signal detection of phase transitions in 1998.

临界慢化理论表明,系统趋近临界点时会发生自相关系数增大的现象。图 251 5 所示为近百年 PDO 序列的自相关系数信号检测。本文中 L1(L12), L2(L22), 252 L3(L32), …Ln(Ln2)…即 ML 取为 120 个月(10 年), MT 取为 3 个月, LT 取 253 为1个月。选定 ML、MT 及 LT 后滑动计算序列自相关系数具体操作参考图 1。 254 值得注意的是图 5 中的 LT 和 MT 有不同的含义, LT 表示将选定窗口大小的原始 255 序列滞后一个洗定步长得到另一个相同长度的序列,用得到的序列与前面的序列 256 求相关,也就是自身的滞后相关;MT跟方差信号相同。图5(a)为PDO序列 257 中发生于 1921 年位相转变的自相关系数检测,图中箭头标识处自相关系数开始 258 增大,临界慢化导致系统内在变化速率降低,系统在任意时刻的状态与它之前的 259 状态越来越相似,因此自相关系数将趋近于1,即1915年左右出现了PDO位相 260 转变的早期预警信号,此次位相转变早期预警信号出现的时间与其位相转变发生 261 的时间提前了约6年。同样分析图5(b)、(c)、(d),针对近百年PDO序 262 列 1942 年、1976 年、1998 年三次位相转变的自相关系数信号分别出现在 1933 263 年、1970年、1989年。因此针对近百年 PDO 序列的四次位相转变,在发生位相 264 转变前的 5-10 年出现了自相关系数增大的位相转变早期预警信号。 265

266 综上所述,通过方差和自相关系数找到的 PDO 位相转折早期预警信号的时
267 间基本一致,这也佐证了基于临界慢化现象寻找 PDO 位相转折早期预警信号的
268 可行性。





278

279 3.2 未来百年 PDO 位相转换早期预警信号研究

280 通过对历史资料的研究可知,基于方差和自相关系数增大的临界慢化现象可
281 以作为 PDO 位相转换时早期预警信号。本节基于临界慢化理论对未来百年
282 (2006-2100 年) PDO 模式模拟资料进行研究,进一步研究未来百年 PDO 位相
283 转换早期预警信号。

284 3.2.1 未来百年 PDO 位相转变检测

图 6 是未来百年 PDO 序列,存在明显的年代际变化特征,在 2040 年出现了 285 冷暖相位的转换,在 2080 年出现了暖冷相位的转换。图 7 为基于 MTT 方法的 286 未来百年 PDO 序列的位相转换的检测曲线。当滑动窗口 t 选为 10 年时可以发现 287 PDO 序列存在 2040 年及 2080 年两次位相转换; 当滑动窗口选为 12 时同样出现 288 2040年及 2080年两次位相转换(通过对每个 PDO 序列进行突变检测发现 36 个 289 模式计算的 PDO 序列的突变时间不完全相同,但是可以发现各个 PDO 序列,尤 290 其是优选出的 21 个 PDO 序列在 2040 年和 2080 年左右都存在一次较明显的位相 291 转折,图略)。因此,基于 MTT 方法可以认为未来百年 PDO 序列存在 2040 年 292 及 2080 年这样两次位相转换(均通过了信度为 0.05 的统计检验)。结合已有研 293

究(杨修群等, 2004; 丁一汇等, 2018)可知, 在未来百年中 PDO 位于暖位相 294 期间(2040-2080年),我国南方地区降水将偏多,PDO位于冷位相期间(2080-2100 295 年),我国北方地区降水将偏多。Fuentes-Franco等(2016)基于 CMIP5 模式资 296 料研究表明, PDO 在 2080 年左右存在一次正负位(暖冷)相转变, 与本文研究 297 结论一致。 298



301 图 6 未来百年 PDO 序列的时间变化曲线(柱状条表示 PDO 指数的值(红色表示 PDO 指数大于零,蓝色

302

300

299

表示小于 0),黑色曲线为 51 点滑动平均提取的趋势信息)

303 Fig. 6 Curves of PDO sequence in the next hundred year changing with time (The bars represents the value of the 304 PDO index: red for positive, blue for negative; and, a black curve for the trend information extracted from the 51 month

305





indicates passing the statistical test with a reliability of 0.05)

311 (a) The sliding window t is 10 years; (b) the sliding window t is 12 years 312 3.2.2 未来百年 PDO 位相转变早期预警信号研究

本节将基于临界慢化理论研究未来百年 PDO 位相转换早期预警信号。图 8 313 为未来百年 PDO 序列的方差信号检测结果,同样 ML 取为 120 个月(10 年), 314 MT 取为3个月,选定 ML、MT 后滑动计算序列方差的具体操作参考图1。图8 315 (a)为未来百年 PDO 序列中 2040 年位相转换的方差信号检测结果,从图 8(a) 316 中箭头标识处容易看出,在2037年左右方差开始逐渐增大。前述理论分析可知, 317 在 2037 年左右出现了 PDO 位相转换的早期预警信号, PDO 此次位相转换的早 318 期预警信号出现的时间与其位相转换发生的时间相差约3年。同样分析图8(b), 319 针对 PDO 发生在 2080 年的位相转换的方差信号出现在 2072 年。可见,未来百 320 年 PDO 序列的两次位相转换,在位相转换发生前 5-10 年出现了方差增大的早期 321 预警信号。 322



(a) 2040 年位相转变的方差信号检测; (b) 2080 年位相转变的方差信号检测

325

Fig. 8. The signals of variance of PDO sequence in the next 100 years, in which ML is 10 years and MT is 3 months
(a)Variance signal detection of phase transitions in 2040; (b)Variance signal detection of phase transitions in 2080

同上,基于临界慢化理论对未来百年 PDO 序列的自相关系数早期预警信号 328 进行检测。图9所示为未来百年PDO序列的自相关系数信号检测结果,L1(L12), 329 L2(L22), L3(L32), …Ln(Ln2)…即 ML 取为 120 个月(10 年), MT 取为 3 个 330 月,LT 取为1个月。图9(a)为未来百年 PDO 序列 2040 年位相转换的自相关 331 系数检测结果,图中在 2032 年左右出现了 PDO 位相转变的早期预警信号。由此 332 可知, PDO 此次位相转换的早期预警信号出现的时间与其位相转换发生的时间 333 相差约8年。图9(b)中PDO序列2080年的位相转换的自相关系数信号出现 334 在 2073 年。针对未来百年 PDO 序列的两次位相转换,在位相转换发生前 5-10 335

336 年出现了自相关系数增大的位相转变早期预警信号。

337 综上所述,基于临界慢化理论对近百年历史监测及未来百年模式模拟序列
338 中 PDO 位相转换早期预警信号的研究,论证了临界慢化现象作为 PDO 位相转换
339 早期预警信号的可靠性,并且找到的 PDO 位相转换早期预警信号的时间基本一
340 致,佐证了基于临界慢化现象寻找 PDO 位相转换早期预警信号的可行性。



348 4 结论

349 PDO 是太平洋年代际变率的主要信号,也是全球年代际变率最强、最重要
350 的信号之一。PDO 对 ENSO、东亚夏季风和中国气候的年代际变化均有显著的
351 调制作用,研究 PDO 冷暖位相的转换有助于中国汛期雨带位置预测。因此开展
352 PDO 年代际转折及其早期预警信号研究具有重要的理论意义和应用价值。

353 复杂非线性系统往往存在多个平衡状态,系统在不同平衡状态之间转换时会
354 突破某些阈值,当系统突破某些阈值之后不能恢复到原来的状态时,这些阈值称
355 为临界阈值,或称为临界点。系统突破临界点到达另一个平衡状态即为临界转换。
356 这种临界转换现象广泛存在于包括气候转折/突变在内的不同领域。某一系统的
357 临界转换往往对系统本身或相关联的其他系统造成巨大影响。目前,大部分研究
358 都是针对系统发生临界转换的检测,但对临界转换的机理及其早期预警信号的研

359 究依然较少,而这也正是目前气候变化研究领域的一个重要方向。近年来,科学
360 家们发现临界慢化理论在研究复杂动力系统的早期预警信号方面展示了较大潜
361 力。已有研究将临界慢化理论用于地震及生态系统突变早期预警信号的研究,取
362 得了不错的效果。针对 PDO 位相转变的复杂非线性特征,本文结合非线性科学
363 的相关理论和方法,基于历史监测和模式模拟资料对 PDO 位相转变的早期预警
364 信号进行了研究。得出以下结论:

365 1)近百年来,PDO发生了四次显著的位相转换,分别为1921年,1942年,
366 1976年,1998年。在PDO位相转换发生前5-10年出现了方差以及自相关系数
367 增大的临界慢化现象,表明基于临界慢化现象提取PDO位相转换早期预警信号
368 的可行性。

369 2)对基于 CMIP5 气候模式的 PDO 未来百年资料研究发现,在 2040 和 2080
370 年前后 PDO 出现位相转换;同样在 PDO 位相转换发生前 5-10 年出现了方差以
371 及自相关系数增大的临界慢化现象,进一步佐证了 PDO 发生位相转换前观察到
372 的临界慢化现象可作为标志位相转换即将发生的早期预警信号。

373 3)无论是基于 PDO 近百年资料还是模式资料,方差和自相关系数都在位相
374 转换前的数年检测到早期预警信号,进一步论证了临界慢化现象作为系统发生转
375 折/突变的早期预警信号的可靠性。

将临界慢化理论引入 PDO 序列位相转变早期预警信号的研究,对深入认识 376 PDO 位相转变和寻找其早期预警信号,促进气候系统转折/突变预测的研究都具 377 有重要的现实意义和科学价值。同时,临界慢化现象为提高对观测资料及模式资 378 料的认识、判断异常波动是否趋于临界阶段以及提高灾变预测水平提供了可能。 379 需要指出的是,尽管针对 PDO 的研究表明临界慢化现象导致的方差增大、自相 380 关系数增大是 PDO 位相转换发生前的一个早期预警信号,但对位相转换发生前 381 临界慢化现象出现的空间范围、临界慢化现象与转折/突变幅度之间的关系等问 382 题仍然需要进一步研究。 383

384

385 参考文献(References)



Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, et al. 2005. Abrupt climate change[J]. Science,
299(5615):2005-2010.

388 Bence J R. 1995. Analysis of Short Time Series: Correcting for Autocorrelation[J]. Ecology,

389	76(2):628-639.
390	Birk K, Lupo A R, Guinan P E, et al. 2010. The interannual variability of midwestern
391	temperatures and precipitation as related to the ENSO and PDO[J]. Atmosfera, 23(2): 95-128.
392	Carpenter S R, Brook W A. 2006. Rising variance: a leading indicator of ecological
393	transition[J]. Ecology Letters, 9(3):311-318.
394	Cayan D R, Dettinger M D, Diaz H F, et al. 1998. Decadal variability of precipitation over
395	western North America[J]. Journal of Climate, 11, 3148-3166.
396	Chikamoto Y, Kimoto M, Ishii M, et al. 2013. An overview of decadal climate predictability in
397	a multi-model ensemble by climate model MIROC[J]. Climate Dynamics, 40, 1201-1222
398	Dakos V, Scheffer M, Van Nes E H, et al. 2008. Slowing down as an early warning signal for
399	abrupt climate change[J]. Proc. Natl Acad. Sci. USA, 105(38):14308-14312.
400	Davis R E. 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies
401	over the North Pacific Ocean[J]. J. Phys. Oceanogr., 6, 249-266.
402	Delworth T L, Mann M E . 2000. Observed and simulated multidecadal variability in the
403	Northern Hemisphere[J]. Climate Dynamics, 16(9):661-676.
404	Fisher L, Marten Scheffer. 2011. Critical Transitions in Nature and Society[J]. The American
405	Journal of Psychology, 124(3):365-367.
406	Fuentes-Franco, Ramón, Giorgi F, Coppola E, et al. 2016. The role of ENSO and PDO in
407	variability of winter precipitation over North America from twenty first century CMIP5
408	projections[J]. Climate Dynamics, 46(9-10):3259-3277.
409	Gershunov A, Barnett T P. 1998. Interdecadal Modulation of ENSO Teleconnections[J].
410	Bulletin of the American Meteorological Society, 79(12):2715-2726.
411	Gopalakrishnan E A , Sharma Y , John T , et al. 2016. Early warning signals for critical
412	transitions in a thermoacoustic system[J]. Scientific Reports, 6:35310.
413	Guttal V, Jayaprakash C. 2008. Changing skewness: An early warning signal of regime shifts
414	in ecological systems[J]. Ecology Letters, 11(5):450-460.
415	Hare S R , Mantua N J . 2000. Empirical Evidence for North Pacific Regime Shifts in 1977
416	and 1989[J]. Progress In Oceanography, 47(2-4):103-145.
417	He W P, Liu Q Q, Gu B, et al. 2016. A novel method for detecting abrupt dynamic change
418	based on the changing Hurst exponent of spatial images[J]. Climate Dynamics,
419	47(7-8):2561-2571.
420	Kuznetsov Y A . 2004. Elements of applied bifurcation theory[J]. Applied Mathematical
421	Sciences, 288(2):715-730.
422	Lenton T M, Livina V N, Dakos V, et al. 2012. Early warning of climate tipping points from
423	critical slowing down: comparing methods to improve robustness[J]. Philosophical Transactions
424	of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370(1962):1185-1204.
425	Lin P F, Yu Z P, LV J H,et al.2019. Two regimes of Atlantic multidecadal oscillation:
426	cross-basin dependent or Atlantic-intrinsic[J]. Science Bulletin, 64(3):198-204.
427	Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with
428	impacts on salmon production[J]. Bull Amar Meteor Soc,78(6):1069-1079.
429	Mantua N J, Hare S R. 2002. The Pacific Decadal Oscillation[J]. Journal of Oceanography,
430	58(1):35-44.
431	Okumura Y M, Deser C, Hu A X, et al. 2015. North Pacific Climate response to freshwater
432	forcing in the Subarctic North Atlantic: oceanic and atmospheric pathways[J]. Journal of Climate,

433	22(6):1424-1445.
434	Qian C, Zhou T J. 2013. Multidecadal Variability of North China Aridity and Its Relationship
435	to PDO during 1900–2010[J]. journal of climate, 27(3):1210-1222.
436	Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. 2009. Early-warning signals for critical
437	transitions[J]. Nature, 461(3):53-59.
438	Shoshiro, Minobe. 2000. Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the
439	North Pacific[J]. Progress in Oceanography, 47,381-408
440	Spielmann K A, Peeples M A, Glowacki D M, et al. 2016. Early Warning Signals of Social
441	Transformation: A Case Study from the US Southwest[J]. Plos One,11(10):e0163685.
442	Timmermann A, An S I , Krebs U , et al. 2005. ENSO suppression due to weakening of the
443	North Atlantic thermohaline circulation[J]. Journal of Climate, 18(16): 3122-3139.
444	Tong J L, Wu H, Hou W, et al. 2014. The early warning signals of abrupt temperature change
445	in different regions of China over recent 50 years[J], Chinese physics B, 23(4):049201.
446	Trefois C, Antony P, Goncalves J, Skupin A & Balling R. 2015. Critical transitions in chronic
447	disease: transferring concepts from ecology to systems medicine[J]. Current Opinion in
448	Biotechnology, 34:48-55.
449	Venegas J G , Winkler T , Musch G , et al. 2005. Self-organized patchiness in asthma as a
450	prelude to catastrophic shifts[J]. Nature, 434(7034):777-782.
451	Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO
452	on the East Asian winter monsoon[J]. Geophys. Res. Lett., 35, L20702.
453	Zhang G W, Zeng G, Li C, et al.2020. Impact of PDO and AMO on interdecadal variability in
454	extreme high temperatures in North China over the most recent 40-year period[J]. Climate
455	Dynamics, 54, 3003-3020.
456	Zhang R, Delworth T L, Held I M. 2007. Can the Atlantic Ocean drive the observed
457	multidecadal variability in Northern Hemisphere mean temperature?[J]. Geophysical Research
458	Zhang V. Wallago I.M. Dattieti D.S. ENSO like Interdegedal Veriekility 1000, 02[1] Jaurnal of
439	Climate 1007, 10(5):1004, 1020
460	陈红 2019 CMIP5 耦合模式对大平洋年代际振荡的模拟与预估[1] 大气科学 43(4)
101	
462	783-795. Chen Hong. 2019. Simulation and projection of the Pacific Decadal Oscillation
463	based on CMIP5 coupled models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
464	43(4): 783-795.
465	丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J].大气科学,
466	42 (3): 533-558. Ding Y H, Si D , Liu Y J, et al. 2018. On the characteristics, driving forces
467	and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of
468	Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (3): 533-558.
469	丁一汇,李怡,王遵娅,等,2020. 亚非夏季风的年代际变化: 大西洋多年代际振荡与太
470	平洋年代际振荡的协同作用[J]. 大气科学学报, 43(1): 20-32. Ding Y H, Li Y, Wang
471	Z Y, et al. 2020. Interdecadal variation of Afro-Asian summer monsoon: coordinated
472	effects of AMO and PDO oceanic modes[J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 43(1):20-32.
473	李建平, 史久恩. 1993. 一百年来全球气候突变的检测与分析[J]. 大气科学, 17(z1): 132-140.

474	Li J P, Shi J E. 1993. The Detection and Analysis of the Abrupt Change of the Global
475	Climate during the Last 100 Years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese),
476	17(z1): 132-140.
477	苏小芸, 陈丽君, 王文才, 等. 2020. 甘东南地区水氡浓度的临界慢化现象研究[J]. 地震工
478	程学报, 42(5): 1104-1110.
479	王邵武, 叶瑾琳. 1995. 近百年全球气候变暖的分析[J]. 大气科学, 19(5): 545-553. Wang S W,
480	Ye J L. 1995. An analysis of global warming during the last one hundred years[J]. Chinese J.
481	Atmos. Sci. (in Chinese),19(5): 545-553.
482	魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社 62-76. Wei F Y. Modern
483	Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology[M]. Beijing: China
484	Meteorological Press (in Chinese),62-76.
485	吴波,周天军,孙倩. 2017. 海洋模式初始化同化方案对 IAP 近期气候预测系统回报试验
486	技巧的影响[J]. 地球科学进展, 32(4): 342-352. Wu B, Zhou T J, Sun Q. 2017. Impacts
487	of initialization schemes of oceanic states on the predictive skills of the IAP near-term
488	climate prediction system[J]. Advances in Earth Science(in Chinese),32(4): 342-352.
489	吴浩, 侯威, 颜鹏程, 等. 2012. 基于临界慢化现象的气候突变前兆信号的初步研究[J]. 物
490	理学报, 61(20):209202(1-9). Wu H, Hou W, Yan P C, et al. 2012. The preliminary research
491	about the precursory signals of abrupt climate change based on critical slowing down
492	phenomenon. Acta Phys. Sin.(in Chinese), 61(20):209202(1-9).
493	吴浩, 侯威, 颜鹏程. 2013. 试用临界慢化原理探讨气候突变[J]. 物理学报, 62(3): 039206.
494	Wu H, Hou W, Yan P C. 2013b. Using the principle of critical slowing down to discuss the
495	abrupt climate change[J]. Acta Phys. Sin.(in Chinese), 62(3): 039206(1-10).
496	肖栋, 李建平. 2007.全球海表温度场中主要的年代际突变及其模态[J]. 大气科学, 31(5):
497	839-854. Xiao D, Li J P. 2007. Main decadal abrupt changes and decadal modes in global
498	sea surface temperature field[J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31(5): 839-854.
499	严中伟. 1992. 60 年代北半球夏季气候跃变过程的初步分析[J]. 大气科学, 16(1):111-119.
500	Yan Z W. 1992. A Primary Analysis of the Process of the 1960s Northern Hemispheric
501	Summer Climatic Jump Climatic Jump[J]. Chinese J. Atmos.Sci. (in Chinese),
502	
503	严中伟, 李兆元,王晓春. 1993. 历史上 10 年-100 年尺度气候跃变的分析[J]. 大气科
504	学 ,17(6): 663-672. Yan Z W, Li Z Y, Wang X C. 1993. An Analysis of
505	Decade-to-Century-Scale Climatic Jumps in History[J]. Chinese Journal of Atmospheric
506	Sciences (in Chinese),17(6):663-672.
507	颜鹏桯, 侯威, 胡经国. 2012. 基于 Logistic 模型的均值突变时间序列临界预警研究[J]. 物
508	理学报, 61(18):189202(1-8). Yan P C, Hou W, Hu J G. 2012. The critical warning research
509	of the mean time series mutations based on Logistic model[J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese),

510 61(18) :189202(1-8).

- 511 晏锐, 蒋长胜, 张浪平. 2011. 汶川8.0级地震前水氡浓度的临界慢化现象研究[J]. 地球物理
- 512 学报,54(7):1817-1826. Yan R, Jiang C S, Zhang L P. 2011. Study on critical slowing down
- phenomenon of radon concentrations in water befer the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J].
 Chinese J. Geophys. (in Chinese), 54(7):1817-1826.
- 515 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, 028(006):
- 516 979-992. Yang X Q, Zhu Y M, Xie Q, et al. 2004. Advances in Studies of Pacific Decadal
 517 Oscillation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 028(006):979-992.
- 518 杨培才, 卞建春, 王革丽, 等. 2003. 气候系统的层次结构和非线性结构和非平稳行为: 复
- 东系统预测问题探讨[J]. 科学通报,48(13):1470-1476. Yang P C, Bian J C, Wang G L, et
 al. 2003. The hierarchy structure and non-linear structure and non-stationary behavior of
 climate system: The study of Prediction problem of complex systems[J]. Chinese Science
 Bulletin(in Chinese), 48(13):1470-1476.
- 523 于渌,郝柏林. 1984. 相变和临界现象[M]. 北京:科学出版社. Yu L, Hao B L. 1984. Phase
 524 transitions and critical phenomena[M]. Beijing: Science press. (in Chinese).
- 525 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,
- 526 61(6) :641-654. Zhu Y M, Yang X Q. 2003. Relationships between Pacific Decadal
 527 Oscillation and climate variabilities in China[J]. Acta Meteorol. Sin.(in Chinese), 61(6):
 528 641-654.

IN

