投稿信

2

3

4

5

6

20

21

22

23

24

25

26

1

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 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名个平衡状态。系统在不同平衡状态之间转换时会

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

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 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。

近百年及未来百年 PDO 位相年代际转变检测及其早期预警

处口十次不不口干 1 DO 应怕干心你将又应然及共干别 项目
信号研究
吴浩1,4 颜鹏程2 侯威3 赵俊虎3 封国林3,5†
1 湖南省气候中心, 长沙 410118
2 中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州 730020
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
4 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118
5 扬州大学物理科学与技术学院,扬州 225002
摘要:本文基于临界慢化的理论,采用太平洋年代际振荡指数(Pacific
Decadal Oscillation, PDO)的近百年历史数据(1900~2019 年)及未来百年模式
模拟数据(2006~2100 年),首先通过滑动 t 检验确定 PDO 位相转变的时间,进
而借助于表征临界慢化现象的方差和自相关系数,研究了 PDO 年代际位相转折
的早期预警信号。结果表明: (1) 近百年来 PDO 发生了 4 次显著的位相转变,
每次位相转变前的 5~10 年可以提取到早期预警信号; (2) 通过对 CMIP5 气候
模式资料计算得到的 PDO 进行统计合成得到未来百年的 PDO 序列,检测结果表
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
预警信号;(3)近百年和未来百年 PDO 序列的位相转变及早期预警信号研究证
实在 PDO 发生位相转变之前方差和自相关系数总能提前数年给出预警信号,也
揭示了未来 PDO 的转折时间。
关键词: PDO, 非线性, 临界慢化, 转折/突变, 早期预警信号 DOI: doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.20127 中图分类号 P467 文献标识码 A
作者简介 吴浩, 男, 1988年出生, 硕士, 工程师, 主要从事气候变化、极端天气气候事件方面的研究。 R
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
* 资助项目 本工作受国家自然科学基金项目(42005058,41675092,41775078, 42005056)、湖南省自然科学
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
29	WU Hao ^{1,4} YAN Peng-Cheng ² HOU Wei ³ ZHAO Jun-Hu ³ 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 Meteorologica
33	Administration, Beijing 100081, People's Republic of China
34	4 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha, 410118
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
42	signal of phase transition is studied by means of variance and autocorrelation coefficient which
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 CMIPS
46	data shows that PDO will have two decadal transitions around 2040 and 2080, and early warning
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 year
50	in advance, which also reveals the climate changes of PDO in the future.
51	
52	Keywords: PDO, nonlinear, critical slowing down, transition/abrupt change, early warning
53	signals

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

- 84 状态转换到另一种状态(Kuznetsov, 2004; Scheffer et al., 2009; Fisher et al., 2011),
- 85 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
- 86 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
- 87 种的灭亡、绿洲的消失等 (Venegas et al., 2005; Lenton et al., 2012; Trefois et al.,
- 88 2015; Gopalakrishnan et al., 2016; Spielmann et al., 2016)。某一系统的临界转换往
- 89 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
- 90 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;
- 91 王邵武等, 1995; Alley et al.,2005)。
- 92 临界转换往往伴随临界慢化现象的发生,Carpenter 等人(Carpenter et al.,
- 93 2006; Guttal et al., 2008; Scheffer et al., 2009,)研究发现复杂系统临界慢化现象
- 94 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
- 95 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
- 96 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
- 97 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
- 98 的概率变小等现象, 这一现象称为慢化(于渌等, 1984)。 Marten Scheffer 等(2009)
- 99 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,
- 100 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
- 101 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
- 102 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
- 103 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
- 105 (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
- 106 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
- 107 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
- 108 信号提供了新思路。
- 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。

2 资料及方法

116 2.1 资料

115

129

131

132

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 (i=1,2,3,...,36) 和相应的空间模态;进而对不同模式的 PDO_i 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;与其它 35 个 PDO; 124 125 $(i\neq i)$ 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 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

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

2.2 研究方法

(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,L2,144 L3,…Ln…往后滑动一个 LT(滞后时间)长度得到新的子序列 L12,L22,145 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。

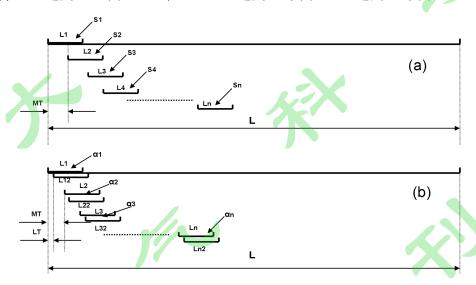


图 1 滑动计算方差、自相关系数示意图

149150

151

152

153

154

155

156

157

(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), α1 代表 L1 和 L12 的自相关系数, α2 代表 L2 和 L22 的自相关系数, …αn 代表 Ln 和 Ln2 的自相关系数, LT 表示滞后时间, L、MT 意义同(a)。

 $\label{eq:Fig. 1} Fig. \ 1 \ We \ calculated the \ variance and autocorrelation \ coefficient \ by \ sliding \ the \ window.$ (a) We calculated \ variance \ by \ sliding \ the \ window, \ L1, \ L2, L3, \ldots, \ Ln \ldots \ denote \ windows \ of \ the \ same \ length, \ S1, \ S2, \ S3, \ldots,

Sn... represent the variances of the corresponding windows, L is the total length of the sequence, and MT is the sliding step; (b)

we calculated the autocorrelation coefficient by sliding the window, L1(L12), L2(L22), L3(L32), ..., Ln(Ln2)...represent windows of the same length, a1 denotes the autocorrelation coefficients of L1 and the L12, a2 denotes the autocorrelation coefficient of the L2, while L22, ... the an refer to the autocorrelation coefficients of the Ln and Ln2, LT represents the lag time, and L and MT have the same meaning as those in Fig.1(a).

161162

163

158

159

160

(2) 临界慢化、自相关增大以及方差增大的关系

- 164 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
- 165 致自相关和方差增大现象(Carpenter et al., 2006; Scheffer et al., 2009)。首先假
- 166 定状态变量存在周期为 Δt 的受迫扰动(附加噪声),扰动过程中,平衡的回归
- 167 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:

$$x_{n+1} = e^{\lambda \Delta t} x_n + s \varepsilon_n \tag{1}$$

- 169 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
- 170 白噪声),s为均方差。如果 λ 和 Δt 不依赖于 x_n ,此过程可简化为一阶的自回归
- 171 模型 (AR(1)):

$$x_{n+1} = \alpha x_n + s \varepsilon_n \tag{2}$$

- 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
- 174 系数接近1。
- 175 对 AR(1) 过程通过方差来分析:

176
$$Var(x_{n+1}) = E(x_n^2) + (E(x_n))^2 = \frac{s^2}{1 - \alpha^2}$$
 (3)

- 177 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
- 178 越慢 (Bence et al.,1995; Dakos et al., 2008) , 当系统趋近于临界点时,恢复速率
- 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
- 180 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
- 181 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
- 182 长变化。

183 (3) 滑动 t 检验法

184 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

Tasanna Tasan

3 计算结果与讨论

3.1 近百年 PDO 位相转变检测及其早期预警信号研究

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。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预警信号。

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。

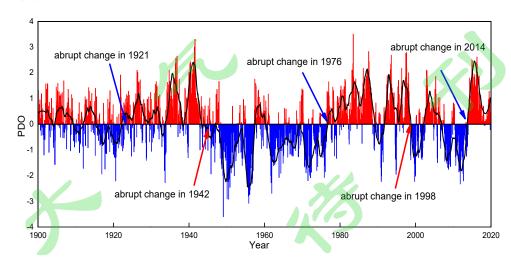


图 2 近百年 PDO 序列的时间变化曲线 (柱状条表示 PDO 指数, 红色表示指数为正、蓝色指数为负),

黑色曲线为 51 月滑动平均提取的趋势信息)

Fig. 2 Curves of PDO sequence in the past hundred year changing with time (The bars represents the value of the PDO index: red for positive, blue for negative; and, a black curve for the trend information extracted from the 51 month moving average).

通过改变滑动窗口 t 的取值,以验证转折检测的稳定性。当 t 取值分别为 5 年、12 年时,均检测到 PDO 序列在 1921、1942、1976、1998 年发生了显著的年代际转折(均通过了信度为 0.05 的统计检验),这与肖栋等(2007)检测到的 PDO 转折位置相一致。

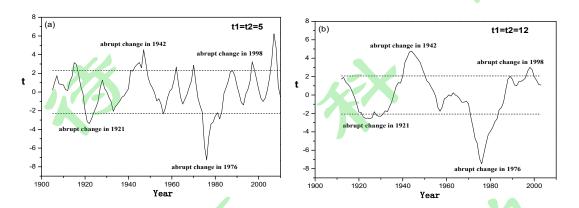


图 3 基于 MTT 方法的近百年 PDO 序列位相转变检测(虚线表示通过信度为 0.05 的统计检验)

(a) 滑动窗口 t 为 5 年; (b) 滑动窗口 t 为 12 年

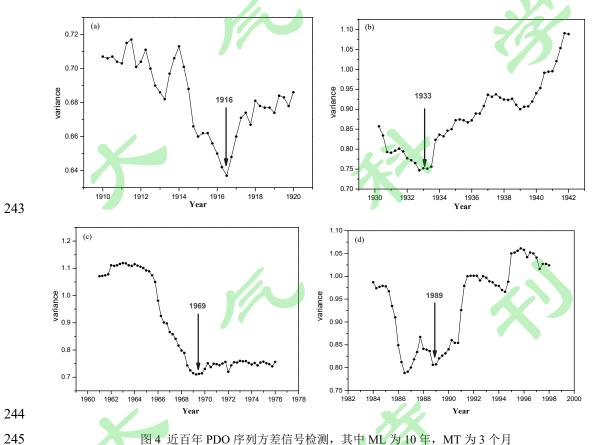
Fig. 3 The phase transition detection of PDO sequence in recent 100 years based on MTT method(dotted line indicates passing statistical test with reliability of 0.05).

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

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。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

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;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。



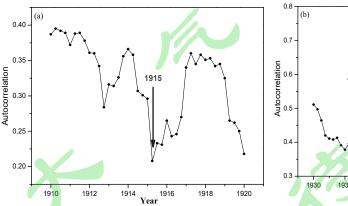
(a) 1921 年位相转变的方差信号检测; (b) 1942 年位相转变的方差信号检测; (c) 1976 年位相转变的方差信号检测; (d) 1998 年位相转变的方差信号检测

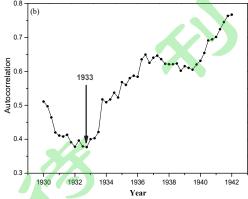
Fig. 4. The signals of variance of PDO sequence in recent 100 years, in which ML is 10 years and MT is 3 months

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 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),L3(L32),…Ln(Ln2)…即 ML 取为 120 个月(10 年),MT 取为 3 个月,LT 取为 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。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序列滞后一个选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。

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可行性。





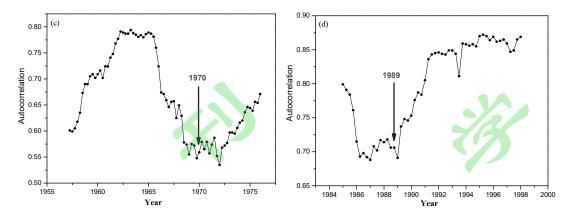


图 5 近百年 PDO 序列自相关系数信号检测,其中 ML 为 10 年、MT 为 3 个月、LT 为 1 个月

(a) 1921 年位相转变的自相关系数信号检测, (b) 1942 年位相转变的自相关系数信号检测, (c) 1976 年位相转变的自相关系数信号检测, (d) 1998 年位相转变的自相关系数信号检测。

 $Fig. \ 5 \quad The \ signals \ of \ autocorrelation \ coefficient \ of \ PDO \quad sequence \ in \ recent \ 100 \ years, \ in \ which \ ML \ is \ 10 \ years, \ MT \ is \ 3$

months and LT is 1 month

276 (a) Autocorrelation signal detection of phase transitions in 1921; (b) Autocorre

- (a) Autocorrelation signal detection of phase transitions in 1921; (b) Autocorrelation signal detection of phase transitions in 1942;
- (c) Autocorrelation signal detection of phase transitions in 1976; (d) Autocorrelation signal detection of phase transitions in 1998

3.2 未来百年 PDO 位相转换早期预警信号研究

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(2006-2100年)PDO 模式模拟资料进行研究,进一步研究未来百年 PDO 位相转换早期预警信号。

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

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年),我国北方地区降水将偏多。Fuentes-Franco等(2016)基于CMIP5模式资料研究表明,PDO 在2080年左右存在一次正负位(暖冷)相转变,与本文研究结论一致。

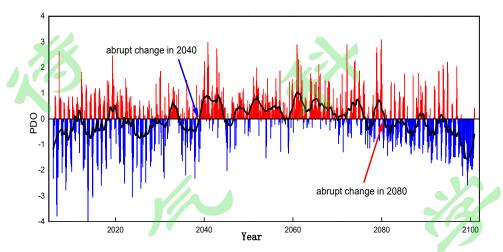


图 6 未来百年 PDO 序列的时间变化曲线(柱状条表示 PDO 指数的值(红色表示 PDO 指数大于零,蓝色表示小于 0),黑色曲线为 51 点滑动平均提取的趋势信息)

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

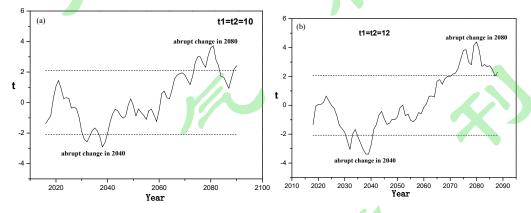


图 7 基于 MTT 方法的未来百年 PDO 序列位相转变检测(虚线表示通过信度为 0.05 的统计检验)

(a) 滑动窗口 t 为 10 年; (b) 滑动窗口 t 为 12 年

Fig. 7 The phase transition detection of PDO sequence in the next 100 years based on MTT method(dotted line indicates passing the statistical test with a reliability of 0.05)

(a) The sliding window t is 10 years; (b) the sliding window t is 12 years

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 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),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 (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) 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,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),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预警信号。

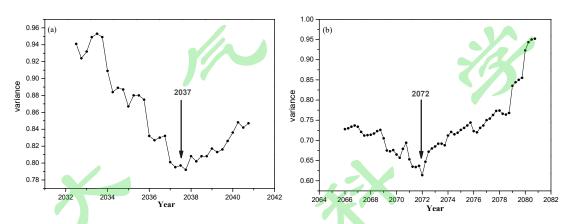


图 8 未来百年 PDO 序列方差信号检测,其中 ML 为 10 年、MT 为 3 个月

(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

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),L2(L22),L3(L32),…Ln(Ln2)…即 ML 取为 120 个月(10 年),MT 取为 3 个月,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

年出现了自相关系数增大的位相转变早期预警信号。

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。

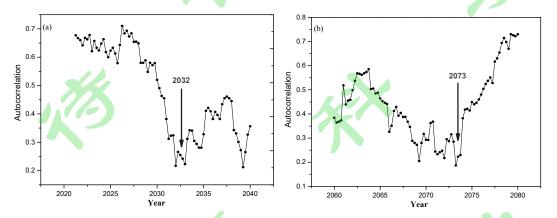


图 9 未来百年 PDO 序列自相关系数信号检测,其中 ML 为 10 年、MT 为 3 个月、LT 为 1 个月 (a) 2040 年位相转变的自相关系数信号检测; (b) 2080 年位相转变的自相关系数信号检测

Fig. 9 The signals of autocorrelation coefficient of PDO sequence in the next 100 years, in which ML is 10 years, MT is 3

months and LT is 1 month

(a) Autocorrelation signal detection of phase transitions in 2040; (b) Autocorrelation signal detection of phase transitions in 2080

4 结论

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 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。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

- 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。
- 376 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
- 377 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
- 378 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
- 379 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。
- 380 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
- 381 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
- 382 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
- 383 题仍然需要进一步研究。

384

385

参考文献(References)

- Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, et al. 2005. Abrupt climate change[J]. Science,
- 387 299(5615):2005-2010.
- Bence J R. 1995. Analysis of Short Time Series: Correcting for Autocorrelation[J]. Ecology,

- 389 76(2):628-639.
- Birk K, Lupo AR, Guinan PE, et al. 2010. The interannual variability of midwestern
- temperatures and precipitation as related to the ENSO and PDO[J]. Atmosfera, 23(2): 95-128.
- Carpenter S R, Brook W A. 2006. Rising variance: a leading indicator of ecological
- transition[J]. Ecology Letters, 9(3):311-318.
- Cayan D R, Dettinger M D, Diaz H F, et al.1998. Decadal variability of precipitation over
- western North America[J]. Journal of Climate, 11, 3148-3166.
- Chikamoto Y, Kimoto M, Ishii M, et al. 2013. An overview of decadal climate predictability in
- a multi-model ensemble by climate model MIROC[J]. Climate Dynamics, 40, 1201-1222
- 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.
- Davis R E. 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies
- over the North Pacific Ocean[J]. J. Phys. Oceanogr., 6, 249-266.
- Delworth T L, Mann M E . 2000. Observed and simulated multidecadal variability in the
- 403 Northern Hemisphere[J]. Climate Dynamics, 16(9):661-676.
- 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.
- Gershunov A, Barnett T P. 1998. Interdecadal Modulation of ENSO Teleconnections[J].
- 410 Bulletin of the American Meteorological Society, 79(12):2715-2726.
- Gopalakrishnan E A, Sharma Y, John T, et al. 2016. Early warning signals for critical
- 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
- in ecological systems[J]. Ecology Letters, 11(5):450-460.
- 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
- 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
- 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.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with
- 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.
- 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.
- Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. 2009. Early-warning signals for critical
- 437 transitions[J]. Nature, 461(3):53-59.
- Shoshiro, Minobe. 2000. Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the
- North Pacific[J]. Progress in Oceanography, 47,381-408
- Spielmann K A, Peeples M A, Glowacki D M, et al. 2016. Early Warning Signals of Social
- Transformation: A Case Study from the US Southwest[J]. Plos One,11(10):e0163685.
- Timmermann A, An S I, Krebs U, et al. 2005. ENSO suppression due to weakening of the
- North Atlantic thermohaline circulation[J]. Journal of Climate, 18(16):3122-3139.
- Tong J L, Wu H, Hou W, et al. 2014. The early warning signals of abrupt temperature change
- in different regions of China over recent 50 years[J], Chinese physics B, 23(4):049201.
- Trefois C, Antony P, Goncalves J, Skupin A & Balling R. 2015. Critical transitions in chronic
- disease: transferring concepts from ecology to systems medicine[J]. Current Opinion in
- 448 Biotechnology, 34:48-55.
- Venegas J G , Winkler T , Musch G , et al. 2005. Self-organized patchiness in asthma as a
- prelude to catastrophic shifts[J]. Nature, 434(7034):777-782.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO
- on the East Asian winter monsoon[J]. Geophys. Res. Lett., 35, L20702.
- Zhang G W, Zeng G, Li C, et al. 2020. Impact of PDO and AMO on interdecadal variability in
- extreme high temperatures in North China over the most recent 40-year period[J]. Climate
- 455 Dynamics, 54, 3003-3020.
- 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 Letters, 34(2):346-358.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like Interdecadal Variability:1900–93[J]. Journal of
- 460 Climate, 1997, 10(5):1004-1020.
- 461 陈红. 2019. CMIP5 耦合模式对太平洋年代际振荡的模拟与预估[J]. 大气科学, 43(4):
- 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,
- 42 (3): 533-558. Ding Y H, Si D, Liu Y J, et al. 2018. On the characteristics, driving forces
- 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
- ZY, 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.

- Li J P, Shi J E. 1993. The Detection and Analysis of the Abrupt Change of the Global
- 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,
- 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
- of initialization schemes of oceanic states on the predictive skills of the IAP near-term
- 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
- 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.
- Wu H, Hou W, Yan P C. 2013b. Using the principle of critical slowing down to discuss the
- 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
- 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.
- 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 16(1):111-119.
- 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
- Decade-to-Century-Scale Climatic Jumps in History[J]. Chinese Journal of Atmospheric
- 506 Sciences (in Chinese),17(6):663-672.
- 507 颜鹏程, 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
- of the mean time series mutations based on Logistic model[J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese),

510 61(18):189202(1-8). 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 511 512 学报,54(7):1817-1826. Yan R, Jiang C S, Zhang L P. 2011. Study on critical slowing down 513 phenomenon of radon concentrations in water befer the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 54(7):1817-1826. 514 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): 515 979-992. Yang X Q, Zhu Y M, Xie Q, et al. 2004. Advances in Studies of Pacific Decadal 516 517 Oscillation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 028(006):979-992. 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 518 杂系统预测问题探讨[J]. 科学通报,48(13):1470-1476. Yang P C, Bian J C, Wang G L, et 519 520 al. 2003. The hierarchy structure and non-linear structure and non-stationary behavior of 521 climate system: The study of Prediction problem of complex systems[J]. Chinese Science 522 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). 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, 525 61(6):641-654. Zhu Y M, Yang X Q. 2003. Relationships between Pacific Decadal 526 Oscillation and climate variabilities in China[J]. Acta Meteorol. Sin.(in Chinese), 61(6): 527 528 641-654.