

东亚-西北太平洋海平面气压场的动力特征分析

孙宇¹ 韩琳¹ 李建平² 丁瑞强³

¹ 成都信息工程大学, 成都 610225

² 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266100

³ 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要 东亚-西北太平洋地区的海平面气压(sea-level pressure, SLP)直接反映了低层大气的环流特征,其动力特征对大气环流形势,气压系统的演变和天气、气候系统的发展等都有显著的影响。因此,深入分析东亚-西北太平洋地区海平面气压场的时空演变特征,对于提高我国的天气和气候预报具有重要意义。为了从非线性动力学的角度进行深入研究,文中使用了一种新方法来定量估算海平面气压吸引子的两个瞬时指标:瞬时维度和瞬时稳定度。瞬时维度表征了吸引子轨道在局部空间上的离散程度,瞬时稳定度则表征了轨道在局部时间上的稳定程度,它们共同反应了海平面气压吸引子的瞬时(逐日)动力特性。本文利用不同大小的指标值与海平面气压场的对应关系,研究了该地区海平面气压场的不同时空特征。主要结论为:(1)海平面气压吸引子的两个指标都是低值时,对应逐日环流场的空间特征表现为:气压结构单一,通常有几个强大的高低气压中心东西对峙;时间特征表现为:环流模态可以稳定的持续10天左右。(2)相反,当两个指标都是高值时,逐日环流场的空间特征表现为:多个弱的气压中心同时存在且结构混乱;时间特征为:环流场极不稳定,持续性仅在1天左右。(3)此外,发现瞬时维度和瞬时稳定度具有一致的年代际变化趋势:从上世纪70-90年代呈现明显的下降趋势,90年代末快速上升,2000年后波动变化。

文章编号 2020254A DOI 编码 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期 2021.03.30 网络预出版日期

作者简介 孙宇,男,1995年出生,硕士研究生,主要从事大气可预报性的研究。E-mail: m13729002572@163.com

通讯作者 丁瑞强, E-mail: drq@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41975070

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41975070)

关键词 东亚-西北太平洋 海平面气压 瞬时维度 瞬时稳定度 大尺度环流 可预报性

Dynamic Properties of Sea Level Pressure Field in East Asia-Northwest Pacific

SUN Yu¹, HAN Lin¹, LI Jianping², DING Ruiqiang³

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Key Laboratory of Physical Oceanography, MOE, China, Ocean University of China, Qingdao 266100

³ State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract The sea-level pressure (SLP) in the East Asia-Northwest Pacific region directly reflects the circulation characteristics of the lower atmosphere, and its dynamical characteristics have significant effects on the atmospheric circulation situation, the evolution of the pressure system and the development of weather and climate systems. Therefore, an in-depth analysis of the spatial and temporal evolution characteristics of the sea-level pressure field in the East Asia-Northwest Pacific region is of great significance to improve the weather and climate forecasting in China. In order to investigate the dynamical characteristics of the daily sea-level pressure field from the perspective of nonlinear dynamics, a new method is used to quantitatively estimate two instantaneous indicators of the sea-level pressure attractor: the instantaneous dimension and the instantaneous stability. The instantaneous dimension characterizes the dispersion of the attractor orbit in local space, and the instantaneous stability characterizes the stability of the orbit in local time, which together characterize the instantaneous (daily) dynamical properties of the sea-level baroclinic attractor. In this paper, different spatial and temporal characteristics of the sea-level pressure field in the East Asia-Northwest Pacific region are studied by the correspondence between the indicator values of different sizes and the daily sea-level pressure circulation field. The main conclusions are: (1) When both indicators of sea-level pressure attractor are low, the spatial characteristics of the corresponding circulation field are as follows: the pressure structure is single, usually with several strong high and low pressure centers

facing each other at east-west direction, while the time characteristics show that the circulation mode can be stable for about 10 days. (2) On the contrary, when both indicators are high, the spatial characteristics of the circulation field are as follows: multiple weak pressure centers exist at the same time, with a chaotic spatial structure. As for the temporal characteristics, the circulation field is extremely unstable, and the duration is only about 1 day. (3) In addition, the instantaneous dimension and instantaneous stability were found to have consistent interdecadal trends, both showing a clear downward trend from the 1970s to 1990s, a rapid rising trend in the late 1990s and fluctuating changes after 2000.

Keywords East Asia-Northwest Pacific, Sea-level pressure, Instantaneous dimension, Instantaneous stability, Large-scale circulation, Predictability

1 引言

低层大气环流是直接控制和影响近地面天气、气候变化的主要因子之一（肖子牛等，2000）。人们通常用海平面气压场的状况来反映低层大气环流的特征，进而分析气温、降水、风场等要素的变化。对于东亚-西北太平洋地区，海平面气压是用来表征天气和气候系统的重要变量，典型的环流系统一般都可以通过海平面气压场表征出来，包括大气遥相关、台风、中高纬的大气阻塞环流和东亚季风等（龚道溢和王绍武，2000；苏同华和薛峰，2010；丁一汇等，2007）。例如，施能等（1996）使用海平面气压定义了东亚夏季风强度指数，并指出东亚夏季风的强弱与我国夏季降水的关系主要表现在雨带的南北位置上。在北半球冬季，北极涛动和西伯利亚高压也会通过海平面气压场直接影响东亚冬季风（Wu and Wang, 2002）。西太平洋海平面气压的强弱及空间分布，不仅对中东亚干旱区的降水和气温有重要影响，对东亚的气候预测也有很好的指示意义（王劲松等，2008）。实际上，海平面气压场作为预报初始场时，直接影响着大尺度环流的可预报性（Li and Ding, 2011），例如中纬度地区的大气为纬向环流状态时，可预报性要高于由阻塞到纬向环流的过渡状态（Ferranti et al., 2015）。

东亚-西北太平洋海平面气压场还与一些典型的天气、气候系统相联系，如西北太平洋台风、西太平洋副热带高压、东亚冬夏季风、阿留申低压等，这些系统与我国的天气和气候灾害联系密切。东亚-西北太平洋地区的环流形势会影响

该区域台风的发生频数、移动路径和强度(吴达铭,1997;孙秀荣和端义宏,2003;王一格等,2020)。西太平洋副热带高压的东西、南北位置对我国夏季降水有着显著的影响(赵俊虎等,2011,2012;魏凤英和黄嘉佑,2010;张庆云和陶诗言,2003)。东亚大气环流系统由冬向夏的演变与入梅的早晚密切相关,中低纬环流系统的配置也影响着梅雨量的多寡(丁一汇等,2007;孙树鹏等,2021;赵俊虎等,2018)。东亚冬季风指数与北极涛动指数和北太平洋涛动指数的相关非常显著,北极涛动可以通过影响北太平洋涛动进而影响东亚冬季风(贺圣平和王会军,2012)。此外,我国大范围的持续干旱、洪涝和降水往往都是由东亚-西北太平洋区域大气环流的持续异常造成的(黄荣辉等,2003,2006;刘长征等,2003;封国林等,2012)。

因此,深入研究东亚-西北太平洋海平面气压环流场的时空特征,对于提高我国的天气预报和短期气候预测具有重要意义(封国林等,2015;王会军等,2008;曾庆存等,2003)。过去关于变量场模态的研究主要基于线性主成分分析(EOF或PCA)、线性相关和合成分析等,然而大气是一个非线性系统,大气环流场对外强迫的非线性响应和自身的非线性结构也非常重要(杨秋明等,2009)。此前,曾使用嵌入相空间的方法来估计大气变量场的吸引子维度(Grassberger and Procaccia, 1984),但是这种方法的缺点是计算比较复杂,特别是对自由度较大的吸引子不能准确的估计维度值;并且只能提供吸引子的平均维度,并未提供和极端天气相关的瞬时动力特征,所以人们更希望能够准确估计大气吸引子的瞬时、局地特性。直到最近,Lucarini等(2016)发展了估算吸引子瞬时维度 d ($0 < d < \infty$)和瞬时稳定度 θ ($0 < \theta < 1$)的新方法,能够很好的克服之前方法的不足。 d 表示了足够描述吸引子的有效自由度, θ 表示了大气持续性的倒数,单位为1/天,使用这两个指标能够很好的表征大气吸引子在相空间中的特征。简单来说, d 值的大小反应了整个环流场的稳定程度,若 d 值越小,则环流系统比较单一、稳定少变; θ 值的大小则反应了环流场在时间上的持续性, θ 值越小,持续性越强。使用该方法可以计算出海平面气压在每一个时刻的 d 值和 θ 值,然后用它们共同表征海平面气压在该时刻的瞬时动力特性,兼顾了时间层面和空间层面,可以较准确的估计海平面气压的瞬时动力特征,这对于和海平面气压相联系的遥相关、台风和大气阻塞等系统的诊断,具有非常重要的意义。

因此，计算海平面气压场的瞬时维度和瞬时稳定度，分析其吸引子的动力特征，并用这两个瞬时指标分析海平面气压环流场的时空动力特征，是本文的重点研究内容。论文的结构安排如下：第一部分为前人研究结果介绍；第二部分为资料介绍、指标的计算方法和动力学意义；第三部分为两个指标的时间序列、季节分布和对应关系；第四部分为两个指标的极值对应的海平面气压时空特征；第五部分为两个指标年代际趋势的分析；第六部分为总结与讨论。

2 资料和方法

本文使用 NCEP/NCAR 的逐日海平面气压再分析资料，时间长度为 1948～2019 年，选取区域为 20°N～60°N，90°E～150°W，该区域覆盖了东亚-西北太平洋地区主要天气系统的活动范围，资料的空间分辨率为 2.5°×2.5°。已有研究表明两个指标对区域边界和空间分辨率的选择不敏感（Faranda et al., 2017a）。

下面介绍两个指标的计算方法和动力学意义。根据混沌系统中的庞加莱重现理论和极值理论（Freitas et al., 2010），变量的观测序列 $x(t)$ 可以被用来定量估算吸引子的瞬时维度 d 和瞬时稳定度 θ 。我们首先需要理解相空间中的一些概念，相空间作为一个假想的高维空间，大气单变量在某一时刻的值可以在相空间中唯一的确定一个状态点，这样每个时刻都可以在相空间中找到一一对应的状态位置，状态点的空间位置也就直观的显示了大气变量的动力特征。公式(1)中 $x(t)$ 为 t 时刻变量场的空间格点序列代表的状态序列， $dist$ 表示将各状态序列求平方和后作算术平方根，得到一个状态值，接着通过对数运算来“放大”状态值。对所有时刻的状态序列都作上述计算，就得到了每一个时刻的状态值，即把每个时刻空间格点上的信息都“压缩”进了“状态值”中。公式(2)中， q 为所有状态值的 0.98 分位数，作为所有状态 $g(x(t))$ 的阈值，其中参数 δ 的倒数就可以表征吸引子的瞬时维度 d 。

$$g(x(t)) = -\log(dist(x(t), \zeta)) \quad (1)$$

$$P(g(x(t)) > q, \zeta) \cong \exp\left[-\theta \frac{x - \mu(\zeta)}{\delta(\zeta)}\right] \quad (2)$$

在相空间中，某一状态点 ζ 的瞬时维度 d 表征了 ζ 周围邻近点（周围的相似

状态点) 的密度, 其取值范围为 $(0, \infty)$, 即从空间上表征了状态点 ζ 邻近轨道的离散程度。 d 值越小, 该状态点 ζ 周围的演化轨道越密集, 表明这些时刻的状态点具有和 ζ 类似的动力特性, 状态 ζ 往往会沿着这些轨道的方向发展; 相反, 若 d 值很大, 说明状态点 ζ 周围的点很少, 很少有和 ζ 类似的动力状态。实际上, 邻近轨道的离散程度与其可预报性的关联非常密切 (Young, 1982)。

$$\theta = \frac{\sum_i^{N_c} (1-q)S_i + N + N_c - \sqrt{(\sum_i^{N_c} (1-q)S_i + N + N_c)^2 - 8N_c \sum_i^{N_c} (1-q)S_i}}{2\sum_i^{N_c} (1-q)S_i} \quad (3)$$

本文使用 Süveges(2007)似然估计法计算吸引子的瞬时稳定度 θ 。当公式(2)中的阈值 q 固定时, 瞬时稳定度可以使用公式(3)进行估算。其中, N 为所有状态值中超过阈值 q 的个数, 连续两个或两个以上的状态值超过阈值时, 称为一个集群, 所有集群的个数为 N_c , 第 i 个集群的长度为 S_i 。

在相空间中, 瞬时稳定度 θ 表征了状态点 ζ 邻近轨道的平均停留时间, 即在时间上表征了轨道的稳定性, θ 值越小, 则连续的停留在 ζ 附近的邻近点就越多。瞬时稳定度 θ 与大气持续性互为倒数, 取值范围为 $(0,1)$, 所以稳定度的值越小, 大气持续性越强, 即在 ζ 之前和之后的状态类似于 ζ 越久, 系统越稳定, 在吸引子中可预报性越长。

3 海平面气压的动力指标分析

3.1 指标时间序列

东亚-西北太平洋地区海平面气压的瞬时维度和瞬时稳定度的变化范围都很大 (图 1a, b), 最高可以达到 20, 最小为 8 左右, 因此使用逐日的瞬时维度可以较好代表每个时刻的瞬时特征。将所有时刻的瞬时维度作平均即可得到海平面气压的平均维度 $D \approx 12.26$, 这个值低于北大西洋地区 13 和北半球 19.4 的平均维度值 (Faranda et al., 2017b), 这说明东亚-西北太平洋的海平面气压场在这三个区域中相对更稳定, 在相空间中可以用更少的有效自由度来描述。由稳定度 θ 得到的海平面气压持续性约为 1.3~3.3 天, 这个结果与北大西洋地区相当, 但比实际大气环流的持续性要低一些, 这是因为我们在计算 θ 的过程中, 对阈值的选择

更加严格，因此将两个状态看作是相似状态的距离要足够小才行，所以计算得到
的大气持续性要偏低一些，但这样更有利于对高、低指标值的筛选，也不影响各

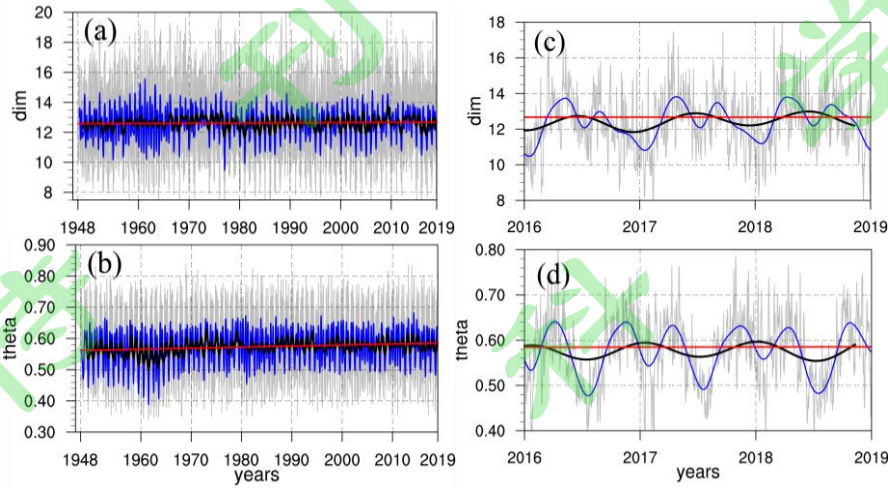


图 1 1948-2019 年东亚-西北太平洋海平面气压瞬时维度 (a) 和瞬时稳定度 (b) 的逐日序列 (灰线)、3 个月低通滤波序列 (蓝线)、1 年低通滤波序列 (黑线) 和线性拟合 (红线)。(c) (d) 同 (a) (b)，但为 2016-2019 年的值。

Fig. 1 Daily series (gray line), 3-month low-pass filtered series (blue line), 1-year low-pass filtered series (black line), and linear fits (red line) of the instantaneous dimension (a) and instantaneous stability (b) of sea-level pressure in the East Asia-Northwest Pacific from 1948-2019. (c) (d) same as Fig.1 (a) (b), but for the values of 2016-2019.

瞬时状态的相互比较。两个指标分别滤波去除 3 个月内的高频信号后，发现存在明显的年循环，表现为明显的双峰型分布和季节周期性 (图 1c, d)，说明东亚环流的季节性特征通过海平面气压场的 d 、 θ 指标很好的表现出来了。

3.2 指标的季节分布特征

我们进一步对两个指标的时间序列进行超前滞后相关分析 (图 2a, 2b)，发现指标都存在一个明显的半年循环。当超前或滞后为整数年时，正相关可以达到峰值，说明 d 指标和 θ 指标具有很强的季节依赖性，指标的这种周期变化可以和中纬度地区海平面气压场的半年变率相联系 (Schwerdtfeger and Prohash, 1997)。两个指标的多年逐月平均 (图 2c, 2d) 显示存在明显的季节分布特点，即冬夏为低值，春秋为高值，从指标代表的动力特征来看，冬夏季的低 d 值表明此时海平面气压场分布相对单一，且相似模态的分布较多，低 θ 值表明海平面气压场的持

续性较高；春秋季节的高 d 值表明此时海平面气压场较为复杂，因此需要用更多的有效自由度来表示，高 θ 值表明海平面气压场的持续性很低，环流场演变迅速。

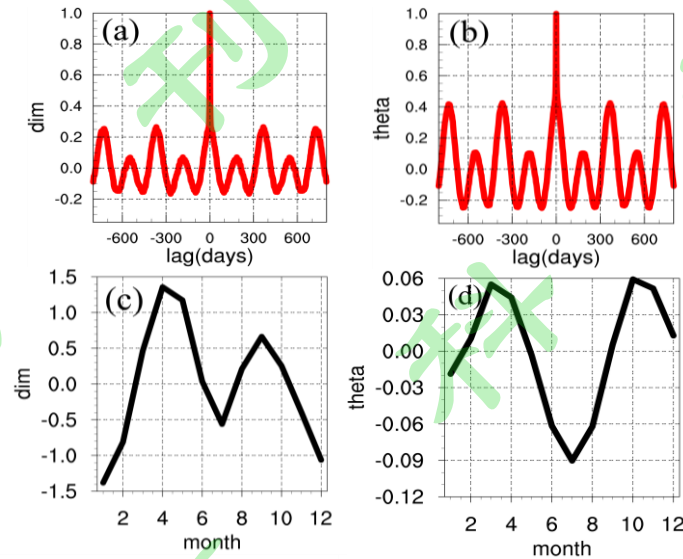


图 2 东亚-西北太平洋海平面气压瞬时维度 (a) 和瞬时稳定度 (b) 的超前滞后自相关，瞬时维度 (c) 和瞬时稳定度 (d) 的多年月平均异常序列。

Fig. 2 The lead-lag autocorrelation of instantaneous dimension (a) and instantaneous stability (b) of sea-level pressure in the East Asia-Northwest Pacific. Multi-year monthly average anomalies of instantaneous dimension (c) and instantaneous stability (d).

为了进一步给出指标的季节分布特点，提取不同大小的指标值对应的海平面气压的时空分布特点，本文给出了两个指标的散点分布图（图 3）。图 3 中 d 和 θ 指标呈不规则的线性分布，整体上是低 d 值与低 θ 值对应，高 d 值与高 θ 值对应，这与两个指标代表的动力学意义一致，即 d 为高值时，海平面气压的动力状态不稳定，所以持续性必然也小，所以对应着高 θ 值； d 值小时，海平面气压稳定少变，那么在下一个时刻，变量类似上一个时刻的概率就更大，所以持续性强，因此对应着低 θ 值 (Messori et al., 2017; Faranda et al., 2017a; Rodrigues et al., 2018)。图 3 中各个单点的颜色表示指标在该日所处的月份，以此来区分各个季节，我们发现 11、12、1 月份和 6、7、8 月份都为明显的带状分布，两个季节集中分布的区域也有明显的区别，说明了冬夏两种截然不同的指标动力特征。

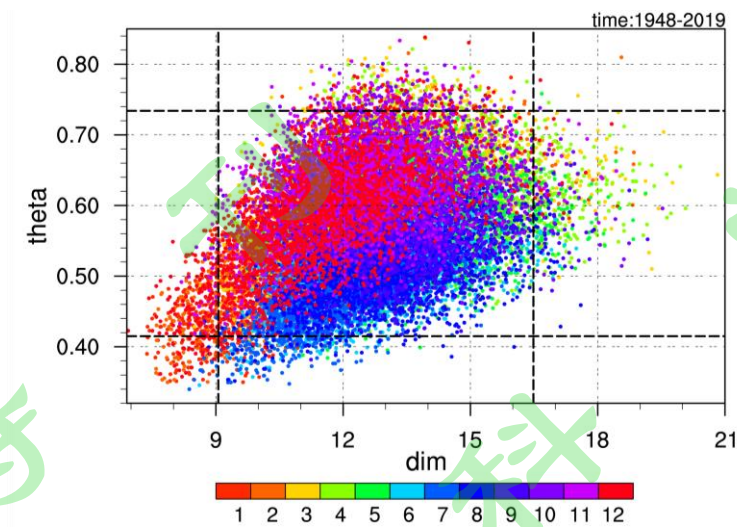


图 3 东亚-西北太平洋海平面气压的瞬时维度 d 和瞬时稳定度 θ 的散点分布。图中黑色竖虚线从左至右分别为瞬时维度的 0.02 和 0.98 分位数阈值，横虚线从下至上分别为瞬时稳定度的 0.02 和 0.98 分位数阈值。点的颜色代表月份。

Fig. 3 Scatter distribution of instantaneous dimension d and instantaneous stability θ of sea-level pressure in the East Asia-Northwest Pacific. The black vertical dashed lines from left to right in the figure are the 0.02 and 0.98 quantile thresholds for the instantaneous dimension, and the horizontal dashed lines from bottom to top are the 0.02 and 0.98 quantile thresholds for the instantaneous stability, respectively. The color of the dots represents the month.

指标在高/低值时所对应的海平面气压场是否和上述分析一致呢？首先，我们需要分别使用 0.02 分位数和 0.98 分位数（图 3 黑色虚线）来筛选出两个指标的高值和低值，这样就得到了 d 指标低值（小于 0.02 分位数）、 d 指标高值（大于 0.98 分位数）、 θ 指标低值（小于 0.02 分位数）和 θ 指标高值（大于 0.98 分位数）。此处也计算了阈值为 0.03/0.01 和 0.97/0.99 的结果，发现得到的海平面气压模态对阈值的选择不敏感（Faranda et al., 2017a）。当选择阈值的分位数为 0.02/0.98 时，上述四部分指标极值的个数都为 525 天。图 4 为两个指标的极值对应的季节，低 d 值主要集中在冬季，而高 d 值集中在春季；低 θ 值主要集中在夏冬两个季节，高 θ 值主要集中在春秋两季，这与图 3 分析的结果一致。

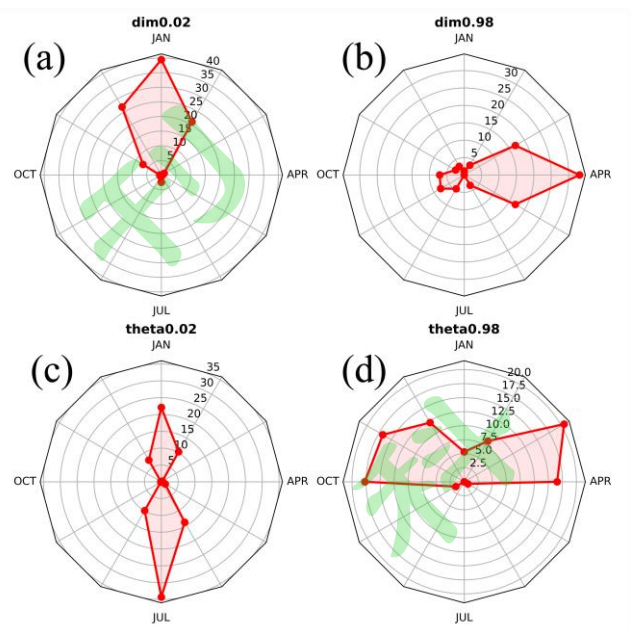


图 4 东亚-西北太平洋海平面气压的不同指标值对应的季节分布：(a)瞬时维度低值；(b)瞬时维度高值；(c)瞬时稳定度低值；(d)瞬时稳定度高值。图中圆的 12 个方向按顺时针顺序分别代表 1-12 月，同心圆的大小代表该月所占的比例。

Fig. 4 Seasonal distribution of different indicator values of sea-level pressure in the East Asia-Northwest Pacific corresponding to low values of instantaneous dimension(a), high values of instantaneous dimension(b), low values of instantaneous stability(c), and high values of instantaneous stability(d). The 12 directions of the circles in the diagram represent January to December in clockwise order, and the size of the concentric circles represents the proportion of the month.

4 指标极值的分析

4.1 指标极值对应环流场的空间分布特征

图 5 给出了上述指标极值对应的海平面气压环流异常场。其中灰色区域由浅到深分别表示有 60%、70%和 80%的成员在该区域具有一致的异常信号分布。瞬时维度 d 为低值时（图 5a），海平面气压场主要为西高东低的分布特点，这是典型的冬季稳定环流型，受海陆热力性质影响，大陆上空为强大而深厚的高压系统控制，东部洋面上空则为稳定的低压系统控制。高低气压控制的中心区域均有 80% 以上的成员具有一致的异常信号分布，这种只有两个大型稳定气压系统控制的环流场符合瞬时维度 d 为低值时的动力特征，即整体分布结构单一、稳定。当瞬时稳定度 θ 为低值时（图 5b），陆地上的强热低压向东部海洋扩展，阿留申半岛及

其南部海域为强高压控制，表现为很强的夏季型分布。值得一提的是，此时大部分区域只有 70% 的指标极值成员具有一致的信号分布，这是因为 θ 低值时有一小部分海平面气压场为冬季型（与图 4c 中的结果一致），说明冬夏的这两种海平面气压环流模态都具有较强的持续性。

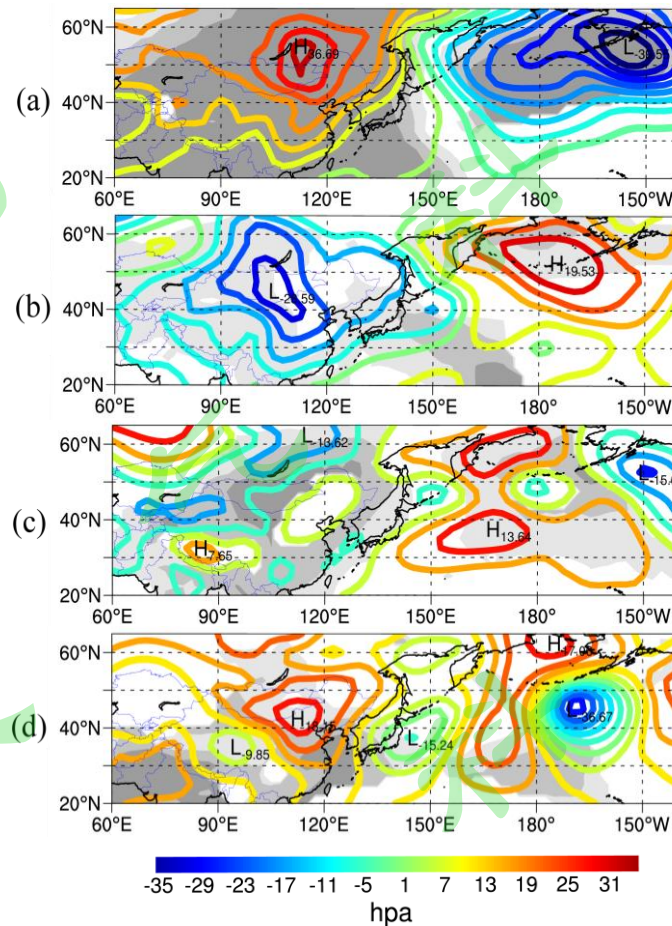


图 5 东亚-西北太平洋海平面气压指标的不同值对应的环流场特征：（a）瞬时维度为低值时；（b）瞬时稳定度为低值时；（c）瞬时维度为高值时；（d）瞬时稳定度为高值时。图中彩色实线为等压线，暗灰、深灰和浅灰色区域分别代表有 80%、70% 和 60% 的指标成员在该区域有一致的信号分布。

Fig. 5 The characteristics of the circulation field corresponding to different values of the East Asia-Northwest Pacific sea-level pressure index when the instantaneous dimension is low (a) and high (c) and the instantaneous stability is low (b) and high (d). The colored solid lines in the figure are isobars, with dark gray, dark gray and light gray areas representing 80%, 70% and 60% of the indicator members having a consistent signal distribution in that area, respectively.

当瞬时维度 d 为高值时（图 5c），海平面气压场中同时存在多个弱的高低气压中心，整体分布比较混乱，符合瞬时维度 d 为高值时的动力特征，即整体分布

结构不稳定。当瞬时稳定度 θ 为高值时（图 5d），海平面气压场的分布也表现为多个高低气压中心同时存在的情况，这种模态多为大型稳定模态间的过渡状态，因此存在时间短，系统整体不稳定，符合高 θ 值的动力学意义。需要说明的是，当两个指标为高值时，海平面气压场中具有一致分布的灰色区域面积较小，这是因为每一个高值指标对应环流场的分布有很大不同，所以难以在某一个区域具有非常一致的分布。

图 3 已经表明，指标 d 和 θ 的低值相对应，高值也相对应。根据上述分析，我们就可以筛选出两个指标都是低值时，对应的空间分布单一稳定的海平面气压空间模态，这种空间特征可能有助于台风的生成，已有研究表明台风发生的日期对应的海平面气压瞬时维度基本都集中在低值区（Faranda et al., 2017a）。我们也可以筛选出两个指标都是高值时，对应的分布复杂的海平面气压空间模态，这种分布可能对中国的气温极端事件有很大的影响，已有研究表明，高 d 、高 θ 值的北大西洋海平面气压模态通常对应着频繁的高温事件（Hurrell, 1995; Yiou and Nogaj, 2004）。我们发现在春秋两季，两个指标在季风区常表现为高值，原因是由于这个时期属于冬季风与夏季风的转换时期，会导致指标值偏高，这点在东亚季风区值得重点关注（Faranda et al., 2017b）。

4.2 指标极值对应环流场的时间演变特征

除了使用指标来筛选海平面气压的空间分布特征外，我们还可以从时间演变的角度对海平面气压进行分析。图 6 为两个指标都为低值或都为高值时对应的典型环流结构，包括在该时刻之后 2 天、4 天、6 天和 8 天的海平面气压分布，打点区域表示有 70% 的指标极值成员在该区域具有一致的信号分布。低值指标（图 6a-e）对应的海平面气压初始场为典型的西高东低分布，大部分区域都有 70% 的成员具有一致的信号分布，在随时间的演变过程中，海平面气压场的演变都比较缓慢，陆上和海上的高低压中心位置和强度变化不大，并且 8 天后（图 6e）仍有大面积的区域具有 70% 的信号一致率。高值指标（图 6f-j）对应的海平面气压初始场只在小面积区域有 70% 的成员具有一致的信号分布，在 2 天后（图 6j），气压系统的空间分布变化较大，打点区域面积变小，4 天后（图 6h），环流场转变明显，符合 70% 成员信号一致的区域基本消失。其实海平面气压场的这种时间演变特点主要由 θ 指标决定，低 θ 值表明海平面气压场的持续性强，模态变化较缓

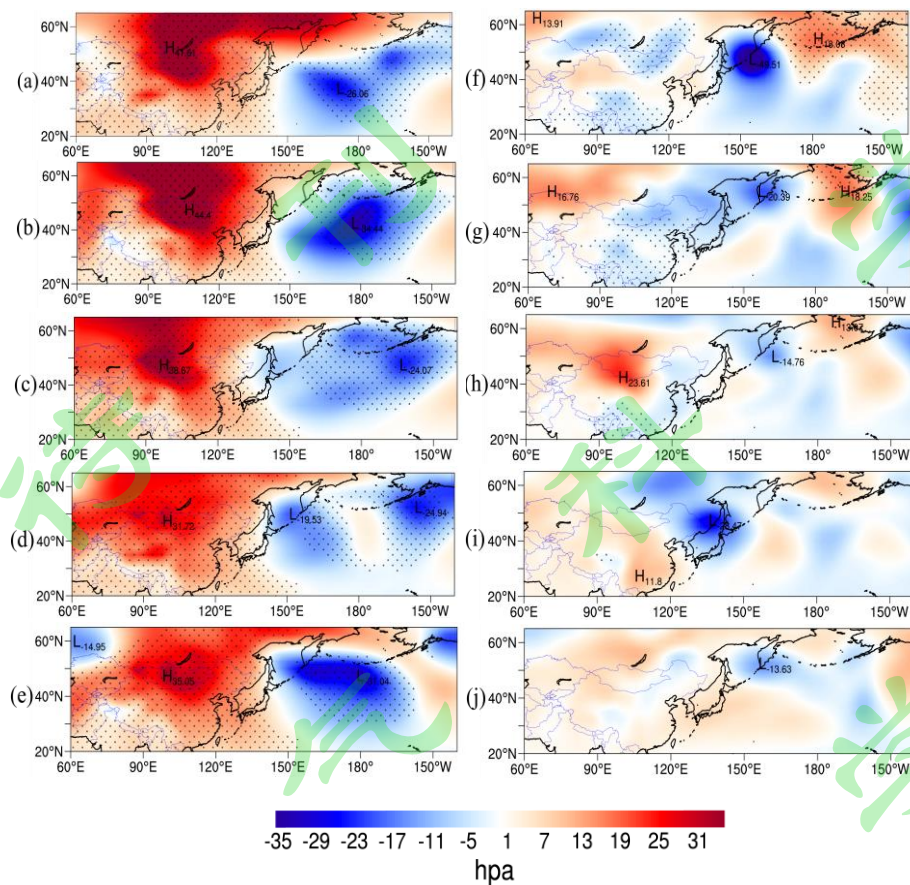


图 6 东亚-西北太平洋海平面气压的瞬时维度 (a - e) 和瞬时稳定度 (f - j) 对应的海平面气压场 (a, f) 在之后第 2 天 (b, g)、第 4 天 (c, h)、第 6 天 (d, i) 和第 8 天 (e, j) 的演变。图中打点区域代表有超过 70% 的成员在该区域具有一致的信号分布。

Fig. 6 The instantaneous dimensions (a - e) and instantaneous stability (f - j) of sea-level pressure in the East Asia-Northwest Pacific correspond to the evolution of the pressure fields (a, f) on the following days of +2 (b, g), +4 (c, h), +6 (d, i) and +8 (e, j). The dotted area in the figure represents a region where more than 70% of the members have a consistent signal distribution.

慢，所以在 8 天后仍有较为一致的分布，通常更好预报。而高 θ 值表明海平面气压场的持续性很弱，系统非常不稳定，模态的演变迅速。已有研究分析了在指标极值之后的几天中，各种极端天气事件发生的频率，以此来用两个指标对极端事件作出预报，如北大西洋地区 500hpa 位势高度场瞬时维度和瞬时稳定度的低值指标之后暖极端事件的发生频率非常高 (Messori et al., 2017)。在针对北大西洋地区海平面气压场的研究中，也曾分析过 d 指标和 θ 指标极值与低温、高湿度和强风等事件的联系 (Faranda et al., 2017a)。这里需要指明的是，分析这两个指标对应的环流场特征时，虽然指标极值大体上都符合上述分析，但可能会有个别指

标值并不一定完美的对应上述某种模态。

5 指标的长期趋势分析

上述分析主要针对指标值与环流场的空间模态和时间演变特征，下面主要从指标的长期趋势变化进行分析。

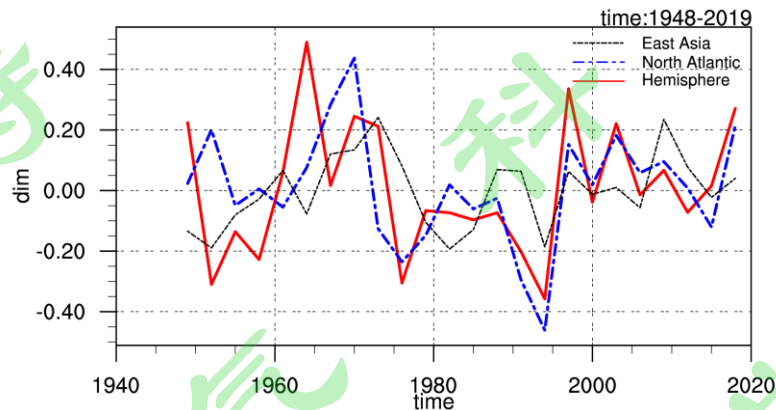


图 7 东亚-西北太平洋 ($20^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$)、北大西洋 ($22^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{W}\sim 50^{\circ}\text{E}$) 和北半球区域 ($0^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$) 海平面气压的瞬时维度在 1948-2019 年的年代际趋势。

Fig. 7 Interdecadal trends in the instantaneous dimension of sea-level pressure in the East Asia-Northwest Pacific ($20^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$), North Atlantic ($22^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{W}\sim 50^{\circ}\text{E}$) and Northern Hemisphere regions ($0^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$) for the period 1948-2019.

为了对比，除东亚-西北太平洋区域外，我们还使用北大西洋区域和北半球区域的海平面气压计算了 d 指标和 θ 指标，我们发现二者具有一致的趋势分布，所以这里仅给出 d 指标的趋势图。图 7 为 d 指标异常值逐三年平均的时间序列，分析发现三个区域的趋势变化基本保持一致，在上世纪 70 年代前为上升趋势，在 70 年代到 90 年代为明显的下降趋势，90 年代末迅速上升，2000 年之后趋势为波动变化。这种分布特征与 Faranda 等（2019）使用不同类型资料计算的结果基本一致，虽然是三个不同的区域，它们的 d 指标平均值和极值也有差异，但它们的异常趋势变化却基本一致，说明存在一种不受地域影响的调制机制。图 7 选定的三个不同区域中，指标异常值的年代际变化趋势一致，有可能是由于海洋温度、 CO_2 浓度等外强迫因素引起。实际上，Faranda 已经研究了北大西洋地区大尺度环流可预报性的趋势变化，使用了百年再分析资料和 CMIP5 模拟资料，发现暖海洋是导致指标长期趋势变化的主要原因，作者称之为“哈曼效应”。这种影响

和暖海洋增强纬向大气环流有关，作者使用 AMIP 模拟资料进行分析，分别使用相对于工业前 280ppm 二氧化碳的四倍浓度和北大西洋上均匀增加 4K 海温所强迫的海平面气压场资料进行计算，分析发现二氧化碳浓度升高后强迫的海平面气压场瞬时维度没有明显的趋势变化，而海温的升高会引起海平面气压场瞬时维度的下降，说明了暖海洋对大气的强迫使得瞬时维度呈现出长期下降的趋势，进一步说明了在全球变暖的背景下，暖海洋使得大气的瞬时维度值呈下降趋势（Lorenz and DeWeaver, 2007）。根据瞬时维度与大气环流时空状态的定性对应关系，大气环流会趋向于相对更稳定的易于预报的状态。这为我们之后研究指标的年代际变化及影响因素的分析提供了思路。

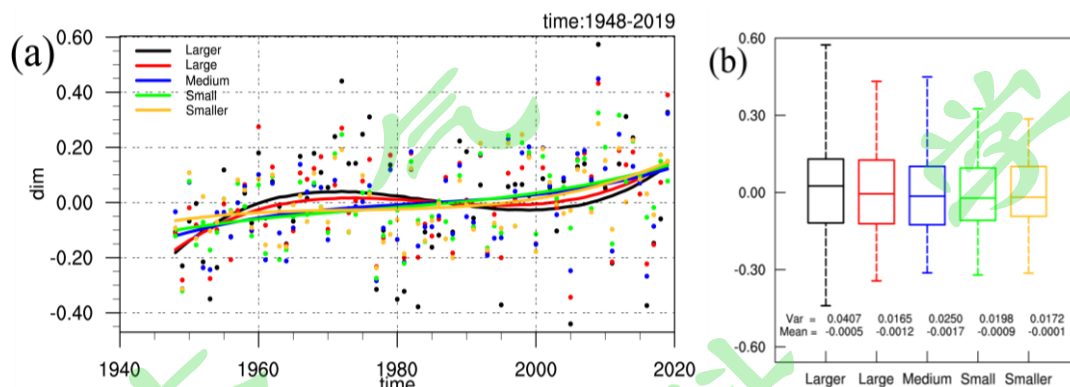


图 8 瞬时维度对东亚-西北太平洋海平面气压区域范围选择的敏感性。(a) 五个不同大小区域海平面气压的逐年瞬时维度值和拟合结果。(b) 五个区域瞬时维度的箱线图分布，分别给出了瞬时维度的上限、下限、4 分位数、中位数、方差和均值。

Fig. 8 Sensitivity of instantaneous dimensions to the regional extent of sea-level pressure in the East Asia-Northwest Pacific. (a) The annual instantaneous dimension values and fitting results of sea-level pressure in five different size regions. (b) Box plot distributions of the instantaneous dimensions for the five regions, giving the upper and lower limits, quartiles, medians, variances, and means of the instantaneous dimensions, respectively.

前文已经提到，区域面积的微小变化不会对指标极值的筛选有很大影响。区域面积的变化是否会对指标的年代际趋势产生影响呢？我们基于东亚-西北太平洋地区（20°N~60°N，90°E~150°W）的范围，逐次递减 5 个经度和纬度，产生了 5 个面积由大到小的区域，然后分别计算了各区域的指标异常趋势（图 8a），图中实线为 d 指标逐年平均的非线性拟合，其中黑色实线较好的拟合出了 d 的变化趋势，随着区域面积的减小，70 年代上升和 90 年代下降的趋势被滤去了，指

标整体表现为微弱的上升趋势。这里为了得到更明显的结果，我们选择区域面积的跨度较大，实际上，我们更加关注的是该区域是否包含了主要天气系统的活动范围，因为我们研究的是大尺度环流的可预报性指标，如果区域选择过小，则天气系统的移动和变化难以表现出来。区域越小，指标的方差越小（图 8b），有效的指标极值就难以筛选出来。另一方面，即使是面积很小的区域仍表现出了较为一致的上升趋势和均值，也说明了用该指标指示系统动力特征的可靠性。

6 结果与讨论

本文使用动力系统理论方法来估计东亚-西北太平洋区域海平面气压吸引子的瞬时维度 d 和瞬时稳定度 θ 。瞬时维度表征了系统有效自由度的大小，代表了相空间中邻近轨道的离散程度，因此和可预报性相联系。瞬时稳定度表征了大气的持续性，代表了相空间中邻近点的停留时间。本文详细分析了这两个指标的动力学意义，并使用两个指标研究了东亚-西北太平洋海平面气压环流场的时空特征，将海平面气压吸引子的动力学意义与实际的逐日环流场联系了起来。结论如下：

（1）东亚-西北太平洋海平面气压吸引子的瞬时维度范围在 8~20 之间，振幅较大，吸引子平均维度约为 12.26，低于北大西洋地区和北半球地区海平面气压吸引子的平均维度值，说明东亚-西北太平洋海平面气压场的空间模态在这三个区域中相对更稳定。瞬时稳定度表征的环流持续性约为 1.3~3.3 天。

（2）两个指标都具有明显的年循环和季节分布，冬夏季两个指标多为低值，春秋季节指标多为高值。同时发现两个指标值的大小存在一定的线性对应关系，从动力学角度说明了吸引子轨道密集时，轨道的持续时间也更长。

（3）本文重点研究了指标的动力学意义与实际环流场的联系。两个指标的高/低极值对应着环流场不同的空间特征：当两指标都为低值时，环流形势强大而稳定，高低气压的分布较为单一；而当两指标都为高值时，气压场中多个高低气压中心同时存在，系统极不稳定。两个指标的高/低极值也对应着环流场不同的时间演变特征。当两指标都为低值时，几个强的气压中心稳定少变，稳定的环流形势可以持续 10 天左右；而当两指标都为高值时，气压系统极不稳定，环流形势在两天内迅速演变。

（4）进一步的，本文发现在东亚-西北太平洋区域、北大西洋区域和北半球

参考文献 (References)

- 406
407 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 2007. 东亚梅雨系统的天气—气候学研究 [J]. 大气科学, 31 (6): 1082–
408 1101. Ding Yihui, Liu Junjie, Sun Ying, et al. 2007. A study of the synoptic–climatology of the Meiyu
409 system in East Asia [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31(6): 1082–1101.
410 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.05.
- 411 封国林, 杨涵洧, 张世轩, 等. 2012. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探 [J]. 大
412 气科学, 2012, 36(5): 1009-1026. FENG Guolin, YANG Hanwei, ZHANG Shixuan, et al. 2012. A
413 Preliminary Research on the Reason of a Sharp Turn from Drought to Flood in the Middle and Lower
414 Reaches of the Yangtze River in Late Spring and Early Summer of 2011 [J]. Chinese J. Atmos. Sci.
415 (in Chinese), 36(5): 1009-1026. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11220.
- 416 封国林, 赵俊虎, 杨杰, 等. 2015. 中国汛期降水动力—统计预测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1–
417 330. Feng Guolin, Zhao Junhu, Yang Jie, et al. 2015. The Study on Dynamical and Statistical
418 Prediction on Summer Precipitation over China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–330.
- 419 Freitas A C M, Freitas J M, Todd M. 2010. Hitting time statistics and extreme value theory [J]. Probab.
420 Theory Relat. Fields, 147(3-4): 675-710. doi: 10.1007/s00440-009-0221-y.
- 421 Ferranti L, Corti S, Janousek M. 2015. Flow-dependent verification of the ECMWF ensemble over the
422 Euro-Atlantic sector [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 141(688): 916-924. doi:10.1002/qj.2411.
- 423 Faranda D, Messori G, Yiou P. 2017a. Dynamical proxies of North Atlantic predictability and extremes
424 [J]. Sci. Rep., 7(1): 1-10. doi:10.1038/srep41278.
- 425 Faranda D, Messori G, Alvarez-Castro M C, et al. 2017b. Dynamical properties and extremes of Northern
426 Hemisphere climate fields over the past 60 years [J]. Nonlin. Processes Geophys., 24(4): 713–725.
427 doi: 10.5194/npg-24-713-2017.
- 428 Faranda D, Alvarez-Castro M C, Messori G, et al. 2019. The hammam effect or how a warm ocean
429 enhances large scale atmospheric predictability [J]. Nat. Commun., 10(1): 1-7. doi: 10.1038/s41467-
430 019-09305-8.
- 431 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 2003. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究 [J].
432 大气科学, 27(4): 770-788. Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. 2003. Studies on
433 the Relationship between the Severe Climatic Disasters in China and the East Asia Climate System
434 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 27(4): 770-788. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.22.

435 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的
 436 关系 [J]. 大气科学, 30(5): 730-743. HUANG Rong-Hui, CAI Rong-Shuo, CHEN Ji-Long, et al.
 437 2006. Interdecadal Variations of Drought and Flooding Disasters in China and Their Association
 438 with the East Asian Climate System [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 30(5): 730-
 439 743. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.02.
 440 龚道溢, 王绍武, 2000. 大气涛动对全球低层大气环流的贡献 [J]. 高原气象, 19(4): 427-434.
 441 Gong Daoyi, Wang Shaowu. 2000. Contribution of the atmospheric oscillations to the global surface
 442 pressure system [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19(4): 427-434. doi: 1000-0534(2000)04-
 443 0427-08
 444 Grassberger P, Procaccia I. 1984. Dimensions and Entropies of Strange Attractors From a Fluctuating
 445 Dynamic Approach [J]. Physica. D., 13(1-2): 34-54. doi:10.1016/0167-2789(84)90269-0.
 446 贺圣平, 王会军. 2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征 [J]. 大气科学,
 447 36(3): 523-538. HE Shengping, WANG Huijun. 2012. An Integrated East Asian Winter Monsoon
 448 Index and Its Interannual Variability [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 36(3): 523-
 449 538. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11083.
 450 Hurrell J W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and
 451 precipitation [J]. Science, 269(5224): 676-679. doi: 10.1126/science.269.5224.676.
 452 刘长征, 王会军, 姜大膀. 2004. 东亚季风区夏季风强度和降水的配置关系 [J]. 大气科学, 28(5):
 453 700-712. LIU Chang-Zheng, WANG Hui-Jun, JIANG Da-Bang. 2004. The Configurable
 454 Relationships between Summer Monsoon and Precipitation over East Asia [J]. Chinese J. Atmos. Sci.
 455 (in Chinese), 28(5): 700-712. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.05.05.
 456 Lorenz D J, DeWeaver E T. 2007. Tropopause height and zonal wind response to global warming in the
 457 IPCC scenario integrations [J]. J. Geophys. Res., 112: D10119, doi: 10.1029/2006JD008087.
 458 Li J, Ding R. 2011. Temporal-spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical
 459 analogs [J]. Mon. Wea. Rev., 139(10): 3265-3283. doi:10.1175/MWR-D-10-05020.1.
 460 Lucarini V, Faranda D, Holland M, et al. 2016. Extremes and Recurrence in Dynamical Systems
 461 [M]//John Wiley & Sons. New York: Wiley, 1-295. doi:10.1002/9781118632321.
 462 Messori G, Caballero R, Faranda D. 2017. A dynamical systems approach to studying midlatitude
 463 weather extremes [J]. Geophys. Res. Lett., 44(7): 3346-3354. doi:10.1002/2017GL072879.
 464 Rodrigues D, Messori G, Yiou P, et al. 2018. Dynamical properties of the North Atlantic atmospheric

circulation in the past 150 years in CMIP5 models and the 20CRv2c reanalysis [J]. *J. Climate.*, 31(15): 6097-6111. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0176.1.

施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. *大气科学*, 20(5): 575-583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 20(5): 575-583. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08.

孙秀荣, 端义宏. 2003. 对东亚夏季风与西北太平洋热带气旋频数关系的初步分析 [J]. *大气科学*, 27(1): 67-74. Sun Xiurong, Duan Yihong. 2003. A Study of the Relationships between the East Asian Summer Monsoon and the Tropical Cyclone Frequency in the Northwestern Pacific [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 27(1): 67-74. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.01.06.

孙树鹏, 封国林, 郑志海, 等. 2021. 2016 年梅雨持续性强降水期间大气环流稳定分量研究 [J]. *大气科学*, 45(2): 1-12. SUN Shupeng, FENG Guolin, ZHENG Zhihai, et al. 2021. Study on the Stable Components of Atmospheric Circulation during the Continuous Heavy Rainfall of Meiyu in 2016 [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 45(2): 1-12. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19167.

苏同华, 薛峰. 2010. 东亚夏季风环流和雨带的季节内变化 [J]. *大气科学*, 34(3): 611-628. SU Tonghua, XUE Feng. 2010. The Intraseasonal Variation of Summer Monsoon Circulation and Rainfall in East Asia [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 34(3): 611-628. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.13.

Süveges M. 2007. Likelihood estimation of the extremal index [J]. *Extremes*, 10(1-2): 41-55. doi: 10.1007/s10687-007-0034-2.

Schwerdtfeger W, Prohash F. 1997. The semi-annual pressure oscillation, its cause and effects [J]. *J. Meteor.*, 13(2): 217-217. doi: 10.1175/1520-0469(1956)0132.0.CO;2.

王劲松, 陈发虎, 靳立亚, 等. 2008. 近 100 年来中东地区干旱区气候异常与海平面气压异常的关系 [J]. *高原气象*, 27(1): 84-95. WANG Jinsong, CHEN Fahu, JIN Liya, et al. 2008. Relationships between Climatic Anomaly in Arid Region of Centre-East Asia and Sea Level Pressure Anomaly in the Last 100 Years [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27(1): 84-95. doi: 1000-0534(2008)01-0084-12.

王会军, 孙建奇, 郎咸梅, 等. 2008. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果 [J]. *大气科学*, 32(4): 806-814. WANG Huijun, SUN Jianqi, LANG Xianmei, et al. 2008. Some New Results in the Research of the Interannual Climate Variability and Short-Term Climate

495 Prediction[J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 32(4): 806-814. doi: 10.3878/j.issn.1006-
 496 9895.2008.04.09.

497 王一格, 姜大膀, 华维. 2020. 西北太平洋地区台风环境场的预估研究 [J]. 大气科学, 44(3): 552-
 498 564. WANG Yige, JIANG Dabang, HUA Wei. 2020. Projection of Typhoon-Related Environmental
 499 Fields in the Western North Pacific [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 44(3): 552-564. doi:
 500 10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19168.

501 魏凤英, 黄嘉佑. 2010. 大气环流降尺度因子在中国东部夏季降水预测中的作用 [J]. 大气科学,
 502 34(1): 202-212. WEI Fengying, HUANG Jiayou. 2010. A Study of Downscaling Factors of
 503 Atmospheric Circulations in the Prediction Model of Summer Precipitation in Eastern China
 504 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 34(1): 202-212. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.19.

505 吴达铭. 1997. 西北太平洋热带气旋强度突变的分布特征 [J]. 大气科学, 21(2): 191-198. Wu
 506 Daming. 1997. The Climatological Characteristics of Rapid Change of the Intensity of the Tropical
 507 Cyclone of the Western North Pacific Ocean [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 21(2): 191-
 508 198. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1997.02.07.

509 Wu B, and Wang J. 2002. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian Winter Monsoon [J].
 510 Geophys. Res. Lett., 29(19):3-1-3-4, doi:10.1029/2002GL015373.

511 肖子牛, 孙绩华, 李崇银. 2000. El Nio 期间印度洋海温异常对亚洲气候的影响 [J]. 大气科学,
 512 24(4): 461-469. Xiao Ziniu, Sun Jihua, Li Chongyin. 2000. Influence of the Indian Ocean SSTA on
 513 Asian Climate during an ENSO Period [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 24(4): 461-
 514 469. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.04.03.

515 杨秋明, 谢志清, 黄世成. 2009. 夏季欧亚海平面气压场主要非线性模态的时空变化 [J]. 科技导
 516 报, 27(0902): 83-87. YANG Qiuming, XIE Zhiqing, HUANG Shicheng. 2009. Temporal and
 517 Spatial Variations of the Nonlinear Principal Mode of Summer Sea Level Pressure Anomalies over
 518 Eurasia [J]. Science & Technology Review (in Chinese), 27(0902): 83-87. doi:10.3321/j.issn:1000-
 519 7857.2009.02.018.

520 Young L S. 1982. Dimension, entropy and Lyapunov exponents [J]. Ergod. Th. & Dynam. Sys., 2(1):
 521 109-124. doi: 10.1017/S0143385700009615.

522 Yiou P, Nogaj M. 2004. Extreme climatic events and weather regimes over the North Atlantic: When and
 523 where [J]? Geophys. Res. Lett., 31(7): L07202. doi:10.1029/2003GL019119.

524 张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. 大气科学,

525 27(3): 369-380. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. The Anomalous Subtropical Anticyclone in
526 Western Pacific and Their Association with Circulation over East Asia during Summer [J]. Chinese
527 J. Atmos. Sci. (in Chinese), 27(3): 369-380. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.07.
528 赵俊虎, 封国林, 王启光, 等. 2011. 2010 年我国夏季降水异常气候成因分析及预测 [J]. 大气科
529 学, 35(6): 1069-1078. Zhao Junhu, Feng Guolin, Wang Qiguang, et al. 2011. Cause and prediction
530 of summer rainfall anomaly distribution in China in 2010 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese),
531 35(6): 1069-1078. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.07.
532 赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的
533 分布 [J]. 气象学报, 70(5): 1021-1031. Zhao Junhu, Feng Guolin, Yang Jie, et al. 2012. Analysis of
534 the distribution of large-scale drought/flood of summer in China under different types of western
535 Pacific subtropical high [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70(5): 1021-1031,
536 doi:10.11676/qxxb2012.085.
537 赵俊虎, 陈丽娟, 王东阡. 2018. 2016 年我国梅雨异常特征及成因分析 [J]. 大气科学, 42(5): 1055-
538 1066. Zhao Junhu, Chen Lijuan, Wang Dongqian. 2018. Characteristics and causes analysis of
539 abnormal meiyu in China in 2016 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 42(5): 1055-1066. doi:
540 10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17170.
541 曾庆存, 王会军, 林朝晖, 等. 2003. 气候动力学与气候预测理论的研究 [J]. 大气科学, 27(4):
542 468-483. Zeng Qingcun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. 2003. A Study of the Climate Dynamics
543 and Climate Prediction Theory [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 27(4): 468-
544 483. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.04.
545
546
547