

王庆万, 胡淑娟, 贾蓓, 等. 2020. 基于全球大气环流三型分解的西太平洋副热带高压指数的新定义 [J]. 气候与环境研究, 25(6): 625–636.
WANG Qingwan, HU Shujuan, JIA Bei, et al. 2020. A New Definition of the Western Pacific Subtropical High Indexes Based on Three-Pattern Decomposition of Global Atmospheric Circulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (6): 625–636. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19160

基于全球大气环流三型分解的西太平洋副热带高压指数的新定义

王庆万 胡淑娟 贾蓓 周冰倩 高晨斌

兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘 要 西太平洋副热带高压 (简称副高) 活动规律及其变异的动力学机理问题一直是我国气象学家的重要课题。本文针对现有研究和预测中常用的高度场指数不能全面、准确刻画全球变暖背景下的副高演变特征的缺陷, 利用全球大气环流三型分解模型中的流函数能够等价描述副高三维空间几何图像的优势, 以 500 hPa 水平型环流流函数的零等值线为客观标准, 给出了副高面积、强度、脊线及西伸脊点指数的新定义, 并以 2018 年夏季副高的短期结构演变特征及其与我国东部地区降水之间的关系研究为例, 验证了本文新定义副高指数的客观性与合理性。本文利用全球大气环流三型分解模型中的水平型环流流函数新定义的副高指数, 不仅从形态上准确刻画了副高的大尺度涡旋环流特征, 而且全球大气环流三型分解的动力学、热力学方程组为进一步利用新指数开展副高异常演变的机理研究提供新的理论工具。

关键词 全球大气环流的三型分解 水平型环流 流函数 副高指数

文章编号 1006-9585(2020)06-0625-12

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19160

A New Definition of the Western Pacific Subtropical High Indexes Based on Three-Pattern Decomposition of Global Atmospheric Circulation

WANG Qingwan, HU Shujuan, JIA Bei, ZHOU Bingqian, and GAO Chenbin

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract Formation and variation dynamics of western Pacific subtropical high (WPSH) have always been an important subject of interest for Chinese meteorologists. However, geopotential height field indexes commonly used in current studies and operational services cannot accurately describe the evolution characteristics of the subtropical high with a global warming background. It is known that the stream function of horizontal circulation defined by the three-pattern decomposition of global atmospheric circulation can equivalently describe the three-dimensional spatial geometric images of the subtropical high. Based on this information, this study proposes the use of the zero contour of the 500 hPa stream function of horizontal circulation as the objective standard to redefine the area, intensity, ridge line, and westward ridge point indexes of the subtropical high. The objectivity and rationality of the newly defined indexes of subtropical high are

收稿日期 2019-10-17; **网络预出版日期** 2020-06-19

作者简介 王庆万, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候动力学与气候预测理论研究。E-mail: wangqw17@lzu.edu.cn

通讯作者 胡淑娟, E-mail: hushuju@lzu.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41975076、41775069, 国家重点研发计划项目 2017YFC1502305

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41975076 and 41775069), National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1502305)

verified by taking short-term structural evolution characteristics of the subtropical high during summer in 2018 and its relationship with precipitation in eastern China. Results reveal accurate depiction of the large-scale eddy circulation characteristics of the subtropical high with the use of the newly defined indexes of based on the stream function of the horizontal circulation. Additionally, the dynamic and thermodynamic equations concerning the stream function of three-pattern decomposition of global atmospheric circulation provide a new theoretical tool for studying the mechanism of the evolution of the subtropical high anomaly by using the newly defined indexes.

Keywords Three-pattern decomposition of global atmospheric circulation, Horizontal circulation, Stream function, Subtropical high index

1 引言

西太平洋副热带高压（简称副高）是东亚夏季风系统的重要成员，是连接热带和中高纬大气环流的主要纽带，它的异常活动往往会导致我国夏季降水异常，特别是引起江淮流域的洪涝或干旱灾害（吴国雄等, 2002）。因此，研究西太平洋副高的活动规律及其变异的动力学机理问题，一直是我国气象学家的重要课题。

副高活动最为显著的特征是季节性的南北进退，其夏季的两次北跳与我国夏季雨带的位置密切相关，两次北跳的形成与东亚地区的气候突变亦密切相关（黄士松和余志豪, 1962; 陶诗言和徐淑英, 1962; 陶诗言等, 1962; 黄士松, 1963; 陶诗言, 1963）。为了定量表征和描述副高的位置和强度，20 世纪 70 年代，中央气象台长期预报组基于 500 hPa 位势高度场 5880 gpm 等值线定义了 5 种最常用的副高参数（赵振国, 1999），即副高面积指数、强度指数、脊线位置、北界和西伸脊点指数。该套特征参数的定义有助于量化地研究副高的自身变化规律和对我国气候的影响及其异常前兆信号，在科学研究乃至我国短期气候预测业务之中有着广泛的使用，并取得了较好的效果，例如 1998 年国家气候中心对夏季副高和长江流域特大洪涝的成功预测（中国气象局国家气候中心, 1998）。此后，为了能从三维空间结构特征的角度来表征副高这一深厚的环流系统，我国学者对副高的高度场指数定义进行了诸多改进，给出了不少定义副高指数的新方法。例如，Lu（2002）和 Lu et al.（2008）利用 850 hPa 位势高度异常定义了副高在东西方向和南北方向上的偏移，并分析了副高东西偏移和环流主要变化模态之间的关联。刘芸芸等（2012）利用 500 hPa 位势高度场及纬向风场资料重新定义了副高指数，并使得新指数取代旧指数在实际业务中应用起来。高辉等

（2017）利用（10°N~30°N，110°E~150°E）区域平均的 1000~500 hPa 各层位势高度标准化值的累积值，定义了一个新的三维副高强度指数，并指出新的副高强度指数对东亚夏季风和我国东部雨带异常的表征有较好的改进效果，同时，对副高指数的研究也有利于中长期的数值预报。

然而，自 20 世纪 70 年代末以来的全球变暖，使得等压面抬升，高度场整体性升高膨胀，500 hPa 等高线呈现逐渐西进的趋势，造成了高度场指数所描述的副高呈现出虚假的年代际演变特征（杨辉和孙淑清, 2014; He et al., 2015; Wu and Wang, 2015; Yang et al., 2017）。因此，为克服目前常使用的描述副高特征的高度场指数单纯依赖于特定阈值（5880 gpm 等值线）、特定层次（500 hPa 对流层中层）以及特定区域（10°N~30°N，110°E~150°E）的缺陷，同时也为避免全球变暖引起高度场整体升高所导致的副高虚假的变化趋势，急需发展一套具有明确物理意义、且能准确刻画副高这一深厚环流系统的三维空间结构特征的新指数，为客观揭示西太平洋副热带高压异常结构特征的演变及其与我国夏季气候异常关系提供科学依据。

实际分析指出，在副热带地区相对涡度场和气压场有很好的配合，负涡度区与高压区结合，正涡度区与低压区结合，高压的发展移动亦即反映在涡度场的变化（黄士松和余志豪, 1962; 黄士松, 1963）。吴国雄和刘还珠（1999）最早利用全型垂直涡度方程理论研究了副高的形成机理，指出副高的形成和变异在很大程度上取决于外部热源的变异和分布，证明了垂直非均匀加热和地球自转效应是决定副高形态的基本因子。刘屹岷等（2001）利用全型涡度方程及数值模拟，证明副热带深对流加热不仅能导致副高异常，还能通过水平非均匀加热在热源区外的中纬度西风带中激发出负涡度源，它借助 Rossby 波向外频散而影响北半球的气候异常，从而把空间

非均匀加热、热力适应和能量频散联结成一个整体, 并把副高异常与北半球的气候异常联系起来。近年来, 为了研究全球变暖背景下高度场的整体抬升所带来的副高演变特征描述不准确的问题, Yang and Sun (2003) 利用 (22.5°N~30°N, 115°E~140°E) 区域平均的 500 hPa 相对涡度异常研究了夏季副高东西向的移动问题; Huang et al. (2015) 从水平风速、海平面气压以及相对涡度等多物理量角度出发, 得出了自 20 世纪 70 年代末期以来副高减弱并东移的结论; 进一步, He et al. (2015) 利用相对位势高度场描述了副高在全球变暖背景下减弱并东移的趋势。

综上所述, 与传统研究中常采用的高度场指数相对比, 涡度场能更准确地表达副高的涡旋环流结构特征, 同时, 由于涡度场的演变不直接受全球变暖的影响, 从而能更准确地刻画全球变暖背景下副高的演变特征。我们知道, 涡度是一个表示环流系统局地旋转程度的物理量, 而与涡度场具有等价表示关系的流函数, 则是一个反映环流系统大尺度结构特征的新变量。这是因为流函数具有明确的几何意义, 流函数等值线的切线方向代表了环流的速度方向, 流函数等值线的疏密程度表示了环流速度的大小, 故以流函数为工具的涡度场表示形式, 既能像位势高度那样形象地刻画副高的大尺度形态特征, 又能通过风场的演变来揭示副高内部发展的动力和热力因子作用。因此, 考虑用流函数所表征的涡度场来描述副高活动指数的新定义方法研究, 是非常值得探索和研究的。

本文拟在前人研究的基础上, 利用近年来提出的全球大气环流三型分解理论 (Hu et al., 2017, 2018a, 2018b) 中的水平型环流的流函数, 定义描述副高强度及空间位置结构特征的新指数。为了方便叙述, 本文的第二节简要介绍全球大气环流的三型分解模型, 第三节介绍基于全球大气环流三型分解的水平型环流的流函数定义副高指数的新方法, 第四节将以 2018 年副高的短期演变过程为例, 通过分析副高新指数与降水的对应关系, 验证本文给出的副高新指数定义的正确性与合理性。第五节是结论与讨论部分。

2 全球大气环流的三型分解模型

为了探索解决全球大气环流统一描述相关的动

力学问题, 尤其是为表示副热带地区复杂的大气运动规律, 在全球大气环流的重要特征研究基础上, 自 20 世纪 90 年代末起, 逐步提出并构建了全球大气环流的三型分解理论 (徐明, 2001; 胡淑娟, 2006, 2008; 刘海涛等, 2007; 邓北胜等, 2010; Hu et al., 2017, 2018a, 2018b)。该理论首先将中高纬度地区的 Rossby 波及低纬度地区的 Hadley 环流和 Walker 环流的概念推广到全球大气环流, 定量化地提出三维水平型环流、经圈型环流以及纬圈型环流的概念, 并将全球大气环流分解成为水平型环流、经圈型环流以及纬圈型环流, 建立了全球大气环流的三型分解模型 (Hu et al., 2018a); 进一步, 还将全球大气环流的三型分解模型与行星尺度大气运动的原始方程组相结合, 建立了直接描述全球大尺度水平型环流、经圈型环流以及纬圈型环流演变规律的流体力学方程组 (Hu et al., 2018b)。该理论从全球视野出发, 把中高纬度大气与低纬度大气运动统一起来, 为定量化研究副热带地区大气的三维运动规律提供了新的理论工具。为方便应用, 本节将给出全球大气环流三型分解模型的简要介绍。

为了能够表示右手螺旋坐标系中的三维涡旋矢量运算, 同时也不失一般性, 全球大气环流的三型分解模型采用了球面 σ 坐标系 (Hu et al., 2018a), 其中 $\sigma = (p - p_0)/(p_s - p_0)$, p 表示气压, p_0 表示大气层顶气压, p_s 表示海平面气压。若取 $p_s = 1000$ hPa, $p_0 = 0$ Pa, 则 σ 坐标系中的风场分量 (u' , v' , $\dot{\sigma}$) 及其所满足的连续性方程可分别表示为

$$u' = \frac{u}{a}, v' = \frac{v}{a}, \dot{\sigma} = \frac{\omega}{p_s}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial u'}{\partial \lambda} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial (v' \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \theta} = 0 \quad (2)$$

其中, a 表示地球半径, λ 是经度, θ 表示余纬, 而 u 、 v 及 ω 为气压坐标系中的 3 个风场分量。公式 (1) 也表示了球面 σ 坐标系中的风场分量与常用的气压坐标系中风场分量之间的转换关系。

结合中高纬度地区的 Rossby 波及低纬度地区的 Hadley 环流和 Walker 环流的基本特征, 球面 σ 坐标系中的水平型环流、经圈型环流与纬圈型环流的风场 (V'_R , V'_H 与 V'_W) 可依次定义为如下形式 (Hu et al., 2018a):

$$V'_R = iu'_R(\lambda, \theta, \sigma) + jv'_R(\lambda, \theta, \sigma), \quad (3)$$

$$V'_H = jv'_H(\lambda, \theta, \sigma) + k\dot{\sigma}_H(\lambda, \theta, \sigma), \quad (4)$$

$$\mathbf{V}'_W = iu'_W(\lambda, \theta, \sigma) + k\dot{\sigma}_W(\lambda, \theta, \sigma), \quad (5)$$

它们分别满足下列连续性方程:

$$\begin{cases} \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial u'_R}{\partial \lambda} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial (v'_R \sin\theta)}{\partial \theta} = 0 \\ \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial (v'_H \sin\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial \dot{\sigma}_H}{\partial \sigma} = 0 \\ \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial u'_W}{\partial \lambda} + \frac{\partial \dot{\sigma}_W}{\partial \sigma} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

方程组 (6) 是原连续性方程 (2) 的一个分解形式, 它确保了水平型环流、经圈型环流与纬圈型环流的风场 $\mathbf{V}'_R$, $\mathbf{V}'_H$ 及 $\mathbf{V}'_W$ 的各分量能够分别被流函数 $R(\lambda, \theta, \sigma)$, $H(\lambda, \theta, \sigma)$ 及 $W(\lambda, \theta, \sigma)$ 定量表示为 (Hu et al., 2018a):

$$\begin{cases} u'_R = -\frac{\partial R}{\partial \theta}, v'_R = \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial R}{\partial \lambda} \\ v'_H = -\frac{\partial H}{\partial \sigma}, \dot{\sigma}_H = \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial (H \sin\theta)}{\partial \theta} \\ u'_W = \frac{\partial W}{\partial \sigma}, \dot{\sigma}_W = -\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial W}{\partial \lambda} \end{cases} \quad (7)$$

其中, R 、 H 和 W 分别为水平型环流、经圈型环流及纬圈型环流的流函数。

在大尺度意义下, 若将实际的大气环流表示成为水平型环流、经圈型环流和纬圈型环流之和的形式, 则有

$$\mathbf{V}' = \mathbf{V}'_H + \mathbf{V}'_W + \mathbf{V}'_R, \quad (8)$$

这里的 $\mathbf{V}'(\lambda, \theta, \sigma) = u'(\lambda, \theta, \sigma)\mathbf{i} + v'(\lambda, \theta, \sigma)\mathbf{j} + \dot{\sigma}(\lambda, \theta, \sigma)\mathbf{k}$ 表示球面 σ 坐标系中实际大气的风场。根据公式 (7), 可知公式 (8) 具有如下的分量形式:

$$\begin{cases} u' = u'_W + u'_R = \frac{\partial W}{\partial \sigma} - \frac{\partial R}{\partial \theta} \\ v' = v'_R + v'_H = \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial R}{\partial \lambda} - \frac{\partial H}{\partial \sigma} \\ \dot{\sigma} = \dot{\sigma}_H + \dot{\sigma}_W = \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial (H \sin\theta)}{\partial \theta} - \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial W}{\partial \lambda} \end{cases} \quad (9)$$

我们称公式 (9) 为全球大气环流的三型分解模型, 公式 (9) 表明: 若已知流函数 H 、 W 、 R , 即可得到三型环流的风场 $\mathbf{V}'_H$ 、 $\mathbf{V}'_W$ 、 $\mathbf{V}'_R$, 进一步相加可得到实际大气环流风场 $\mathbf{V}'$ 的 3 个分量; 反之, 若已知实际大气环流风场 $\mathbf{V}'$ 的 3 个分量, 则可通过计算流函数 H 、 W 、 R 就可将实际大气环流分解成为三型环流的叠加。

显然, 若已知 $\mathbf{V}'$ 的 3 个分量 u' 、 v' 及 $\dot{\sigma}$, 则满足公式 (9) 的流函数 H 、 W 、 R 会有无穷多个。为了保证全球大气环流的三型分解方法在数学上的唯一性与物理上的合理性, 需要流函数 H 、 W 、 R 满

足条件 (Hu et al., 2018a):

$$\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial H}{\partial \lambda} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial (W \sin\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial R}{\partial \sigma} = 0, \quad (10)$$

及边界条件:

$$\text{当 } \sigma = 1 \text{ 时, } H = W = 0, \frac{\partial R}{\partial \sigma} = 0. \quad (11)$$

将表达式 (10) 及边界条件 (11) 代入公式 (9), 容易得到流函数 H 、 W 、 R 满足以下 3 个边值问题:

$$\begin{cases} \Delta_3 R = \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial v'}{\partial \lambda} - \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial (u' \sin\theta)}{\partial \theta}, (\lambda, \theta, \sigma) \in \Omega \\ \frac{\partial R}{\partial n} \Big|_{\partial\Omega} = \frac{\partial R}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=1} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \sigma} = \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial R}{\partial \lambda} - v', (\lambda, \theta, \sigma) \in \Omega \\ H \Big|_{\partial\Omega} = H \Big|_{\sigma=1} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial \sigma} = \frac{\partial R}{\partial \theta} + u', (\lambda, \theta, \sigma) \in \Omega \\ W \Big|_{\partial\Omega} = W \Big|_{\sigma=1} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

这里的 $\Omega = S^2 \times [0, 1]$ 是一个单位球, 其中 $S^2 = \{(\lambda, \theta) | 0 \leq \lambda \leq 2\pi, 0 \leq \theta \leq \pi\}$ 表示半径为 $\sigma \in [0, 1]$ 球面; $\partial\Omega$ 表示 Ω 的边界, 它也是一个单位球面, $\mathbf{n}$ 表示 $\partial\Omega$ 的单位外法向量, 算子

$$\Delta_3 = \frac{1}{\sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2}, \quad (15)$$

为球面 σ 坐标系中的三维 Laplace 算子。我们称问题 (12) – (14) 为全球大气环流三型分解模型所对应的定解问题。

边值问题 (12) – (14) 的解是存在唯一的。因此, 我们只需将原始风场 $\mathbf{V}'$ 的水平风 u' 和 v' 代入边值问题 (12) – (14), 即可求得流函数 H 、 W 、 R , 再将流函数 H 、 W 、 R 代入表达式 (7), 即可得到三型环流风场 $\mathbf{V}'_H$ 、 $\mathbf{V}'_W$ 、 $\mathbf{V}'_R$, 实现球坐标系中的全球大气环流的三型分解过程。本文随后的分析过程所采用的资料正是通过计算定解问题 (12) – (14) 及表达式 (7) 所得到的。

3 基于全球大气环流三型分解的副高指数的新定义

在副热带地区, 由于相对涡度场和气压场有很好的配合, 因此, 本节考虑利用与涡度场具有等价表示关系的流函数来分别定义副高的面积、强度、脊线位置及西伸脊点指数。

首先, 由第二节全球大气环流三型分解模型中的定解问题 (12) 知, 大尺度水平型环流的流函数满足如下的三维 Laplace 方程:

$$\Delta_3 R = \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial v'}{\partial \lambda} - \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial (u' \sin \theta)}{\partial \theta}, \quad (16)$$

结合球面 σ 坐标系与 p 坐标系之间的转换关系式 (1), 可将公式 (16) 改写为

$$\Delta_3 R = \Delta_2 R + \frac{\partial^2 R}{\partial^2 \sigma} = \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial (u \sin \theta)}{\partial \theta} = \zeta, \quad (17)$$

这里的 ζ 表示整层大气的垂直涡度。我们注意到, 方程 (17) 的左端是关于流函数 R 的空间变量的二阶导数, 右端正是实际大气的相对涡度场, 这说明流函数 R 能够等价表示相对涡度场的主要特征。事实上, 对于波状的大尺度水平型环流来说, 可假设流函数 R 在水平面上具有球谐波的形式 (吕美仲等, 2004):

$$R(\lambda, \theta, \sigma) = A(\sigma) Y_n^m(\lambda, \cos \theta), \quad (18)$$

这里的 n 和 m 分别代表了纬向和经向的波数。由球谐函数的定义知

$$\frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 Y_n^m}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial Y_n^m}{\partial \theta}) + n(n+1) Y_n^m = 0, \quad (19)$$

因此, 结合公式 (18) 和公式 (19), $\Delta_2 R$ 可简化为

$$\Delta_2 R = -n(n+1) A(\sigma) Y_n^m(\lambda, \cos \theta) = -n(n+1) R. \quad (20)$$

另一方面, 中纬度天气尺度系统铅直尺度与对流层厚度相当, 从地面到对流层顶系统位相改变约 180° , 故可近似认为 (吕美仲等, 2004):

$$A(\sigma) \cong A_0 \cos \pi \sigma, \quad (21)$$

这样便有

$$\frac{\partial^2 R}{\partial \sigma^2} \cong -\pi^2 A(\sigma) Y_n^m(\lambda, \cos \theta) \cong -\pi^2 R. \quad (22)$$

若将公式 (20) 和公式 (22) 代入 (17) 式, 可得

$$-\left[n(n+1) + \pi^2\right] R \cong \zeta, \quad (23)$$

即有

$$R \cong \zeta. \quad (24)$$

上式表明流函数 R 与相对涡度场 R 成正比例关系, 这说明在给定的等压面上, 北半球的流函数 R 等值线的负值区对应正的相对涡度区域, 代表了逆时针方向旋转的低压环流系统; 相反的, R 值线的正值区对应负的相对涡度区域, 对应于顺时针方向旋转的高压环流系统。因此, 流函数 R 的零值线成

了正负涡度环流的自然分界线。

此外, 由全球大气环流三型分解模型中的风场与流函数的等价表示公式 (7) 知, 流函数 R 具有明确的几何意义, 即 R 等值线的切线方向代表了环流的速度方向, R 等值线的疏密程度表示了环流速度的大小。这说明, 以流函数 R 为工具的相对涡度场的表示形式, 既能像位势高度那样形象地刻画副高的大尺度形态特征, 又能通过风场的演变来揭示副高内部发展的动力和热力因子作用。

综上所述, 根据全球大气环流的三型分解模型中的水平型环流流函数 R 的物理意义与几何意义, 本文给出如下的描述西太平洋副热带高压结构特征指数的新定义:

(1) 面积指数: 在 10°N 以北 $110^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ 范围内, 流函数 R 的零值线所围成的面积;

(2) 强度指数: 在 10°N 以北 $110^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ 范围内, 流函数 R 的零值线所围成的区域内流函数 R 的最大值;

(3) 脊线指数: 在 10°N 以北 $110^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ 范围内, 流函数 R 的零值线所围成的区域内, 流函数 R 的等值线的东、西边界所在纬度的平均值;

(4) 西伸脊点: 在 10°N 以北 $90^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ 范围内, 流函数 R 的零值线最西格点所在的经度值。

4 2018 年夏季西太平洋副高短期结构特征及其与我国降水的联系

本节将以 2018 年夏季副高的短期结构演变特征及其与我国东部地区降水之间的关系研究为例, 验证本文所给出的副高指数新定义的客观性与合理性。

本节所使用的资料有国家气候中心 (<https://cmdp.ncc-cma.net/cn/index.htm>[2018-11-01]) 公布的 2018 年夏季副高的面积、强度、脊线位置及西伸脊点指数资料。除此外, 还使用了 2018 年夏季 6、7 及 8 月 NCEP1/NCAR 逐日再分析资料的 u 和 v 风场资料、降水资料, 分辨率均为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。文中所使用的水平型环流的流函数 R 资料是通过将 NCEP1/NCAR 逐日再分析资料的 u 和 v 风场资料代入全球大气环流三型分解模型的定解问题 (12) 计算得到的。

4.1 北半球环流形势与西太平洋副高短期结构特征
2018 年的 6 月初, 西太平洋副高的位置较往

年异常偏东（张芳和何立富, 2018），而在 7、8 月又较往年异常偏北（王靖和张玲, 2018），与此相对应，我国长江流域雨季较往年开始的偏晚，降水量偏少；华北雨季开始偏早，降水量较往年偏多（顾薇和陈丽娟, 2019）。这说明 2018 年夏季我国降水的异常与西太平洋副高的异常密切相关。

为了验证本文利用全球大气环流三型分解模型中的水平型环流的流函数 R 描述副高特征的合理性，本节将以表 1（顾薇和陈丽娟, 2019）所示的 2018 年我国东部地区梅雨开始时间、梅雨结束时间以及华北雨季结束时间为标准，将 2018 年夏季（6、7 及 8 月）划分为 4 个阶段：6 月 1 日至 18 日、6 月 19 日至 7 月 10 日、7 月 11 日至 8 月 7 日以及 8 月 8 日至 31 日，分阶段分析副高的短期结构特征。

图 1 表示水平型环流流函数 R 所表征的 2018 年夏季北半球 500 hPa 环流形势。图中的粗实线表示流函数 R 的零值线，它所包含的范围内是流函数 R 的正值区，代表了顺时针旋转的高压系统；而虚线所包含的区域为流函数 R 的负值区，代表了逆时针旋转的低压系统。从图 1 我们可以看出，以水平型环流流函数 R 所表征的北半球环流场中，除了以极地为中心的大尺度极地低压系统外，在广大的副热带地区存在着大范围的副热带高压带，而西太平洋副高是其中的重要组成部分。图 1a 表明，2018 夏季初期，西太平洋副高强度偏弱、面积偏小，此时北半球极地低压系统（极涡）呈单极型分布，中心位于极地；在中高纬度，沿西西伯利亚、阿留申岛以及格陵兰岛的水平型环流形成 3 个强度较强的低压大槽；到了 6 月 19 日至 7 月 10 日的第二个阶段（图 1b），水平型环流流函数 R 所表征的西西伯利亚上空的大槽迅速减弱，同时阿留申低压槽以及格林兰低压槽也有不同程度的减弱，此时，整个北半球的副热带地区出现了大面积的高压系统，太平洋以及大西洋的副高连成了一片，西太平洋副

高强度也明显加强，面积增大，并且位置稍向北抬，我国正好处于江南梅雨、长江中下游梅雨时期；到 7 月 11 日至 8 月 7 日的第三阶段（图 1c）西太平洋副高进一步北抬并分裂为两个单体，其强度有所减弱、面积相应减小，对太平洋影响较大的阿留申低压槽也进一步减弱，此时我国正处于华北雨季时期；到了 2018 年夏季末期（图 1d）华北雨季结束后，阿留申低压槽开始加强，西太平洋副高南撤，两个副高单体合并为一个较大范围的副高单体。

图 2 为 2018 年夏季西太平洋副高指数的演变特征，其中流函数 R 定义的副高新指数用红线表示，国家气候中心公布的高度场指数用蓝线表示。由于西太平洋副高的面积与强度之间往往是成正比例变化关系，因此图 2a 和 2b 中的两种面积指数和强度指数都较一致地呈现出先增大、后减小以及再增大的变化特征；所不同的是两种面积指数的大小差异明显，传统的高度场指数（图 2a 蓝线）所表示的副高面积明显大于新定义的流函数指数（图 2a 红线）所定义的面积，这一点可能与全球变暖所导致的高度场整体性抬升有关。

脊线和西伸脊点分别是对副高南北以及东西位置的描述。在传统研究中，脊线指数的变化有着更重要的意义，这是因为副高的两次北跳往往对应着长江流域的雨季和华北雨季的开始。如图 2c 所示，本文新定义的脊线指数在 6 月 20 日和 7 月 7 日有着明显的北跳特征，这与表 1 中所给出的长江流域以及华北雨季开始的时间十分接近，而传统的脊线指数在长江流域雨季以及江南梅雨开始以后，又有一次南撤，这一点与雨带的变化略有不符。除了夏季初期，在副高强度较弱时，新定义的西伸脊点位置偏东而传统的高度场定义的西伸脊点位置较偏西（图 2d），其余时间两种西伸脊点指数的变化几乎一致，这表明新定义的西伸脊点指数与强度指数能够更好地对应起来。

综上所述，水平型环流流函数 R 所表征的

表 1 2018 年夏季我国东部梅雨和华北雨季起止时间及雨量异常情况

Table 1 Rainfall anomaly and the starting and ending times of Meiyu and rainy season of North China in 2018

雨季名称	开始时间	结束时间	雨量异常情况
江南梅雨	6月19日（偏晚11天）	7月13日（偏晚5天）	偏少31.8%
长江中下游梅雨	6月22日（偏晚8天）	7月13日（偏早1天）	偏少39.4%
江淮梅雨	6月28日（偏晚7天）	7月10日（偏早5天）	偏少34.6%
华北雨季	7月9日（偏早9天）	8月7日（偏早11天）	偏多22%

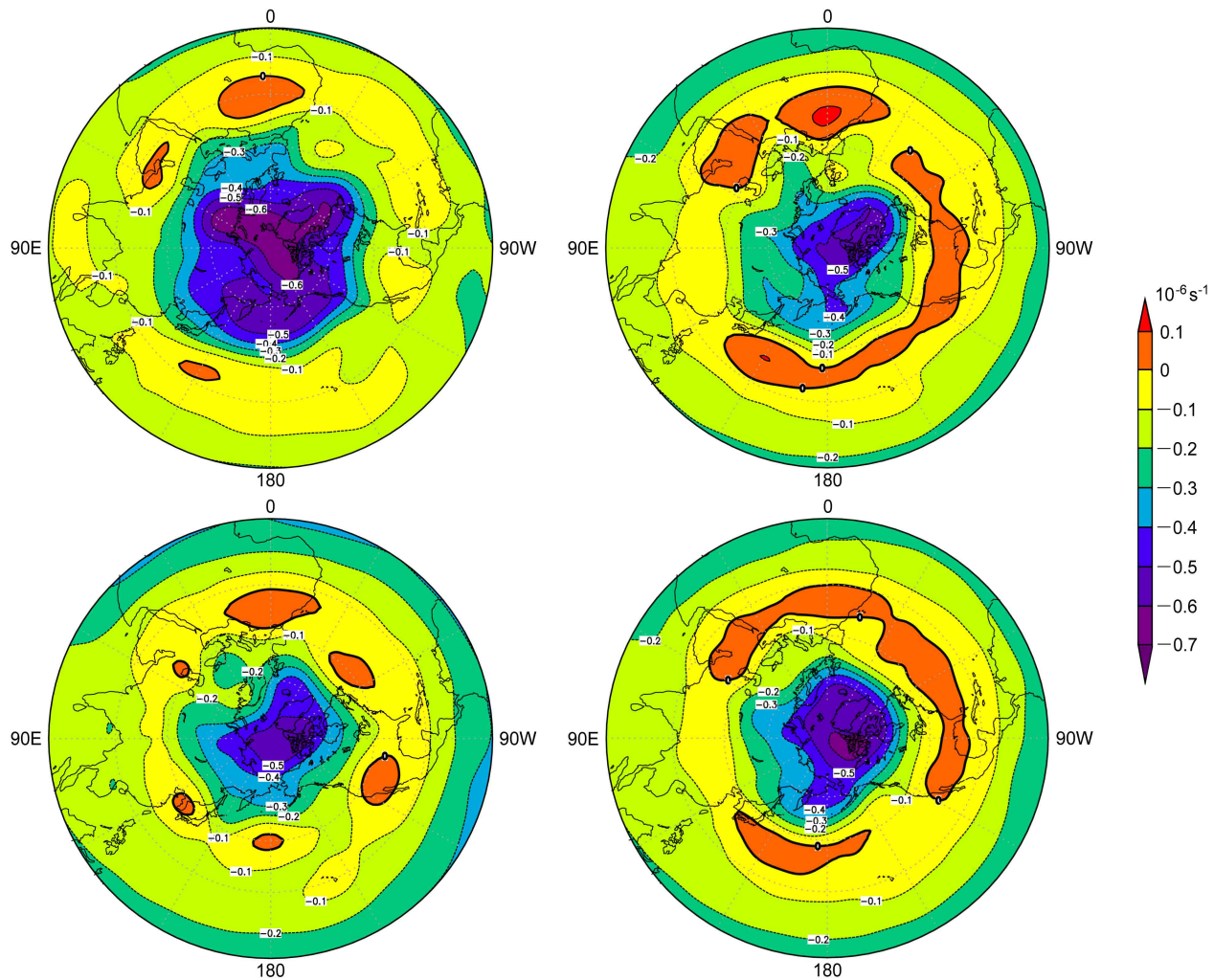


图1 2018年夏季4个阶段北半球500 hPa水平型环流函数 R 的短期平均特征：(a) 2018年6月1~18日；(b) 2018年6月19日至7月10日；(c) 2018年7月11日至8月7日；(d) 2018年8月8~31日。粗实线表示流函数 R 的0值线

Fig. 1 Short-term mean characteristics of 500-hPa horizontal circulation function R in the Northern Hemisphere in summer 2018 for the four time stages: (a) 1–18 June 2018; (b) 19 June to 10 July 2018; (c) 11 July to 7 August 2018; (d) 8–31 August 2018. The solid lines represent the zero value lines of the stream function R

2018年夏季北半球环流形势的演变特征完全符合传统意义上高度场所表征的环流形势场的演变；进一步，用流函数 R 新定义的西太平洋副高指数与我国夏季雨带的变化更匹配，各指数之间也有较好的对应关系。因此，全球大气环流三型分解模型中的水平型环流的流函数 R 不仅能够表征整个北半球环流场的演变特征，它也有望成为研究西太平洋副高的形态及结构特征的新工具。

4.2 西太平洋副高指数与我国降水的相关性分析

我们知道，西太平洋副高的演变特征与我国东部地区的降水关系密切，我们常常会根据西太平洋副高的形态变化与空间位置移动来预测我国夏季的主雨带位置（陶诗言和徐淑英，1962；陶诗言等，

1962；陶诗言，1963；吴国雄等，2002；丁瑞强和李建平，2009）。因此，本小节将通过分析副高的短期结构特征与我国主雨带的位置关系，来进一步说明本文新定义的副高指数的客观性与合理性。

图3表示2018年夏季500 hPa西太平洋副高形态及雨带分布情况，这里的雨带指的是2018年夏季的4个阶段（6月1日至18日、6月19日至7月10日、7月11日至8月7日以及8月8日至31日）的平均降水量与整个夏季降水量的差值。图3a表明，6月1日至18日西太平洋副高的位置比较偏东，雨带的位置紧贴着高度场5880 gpm等值线的西北侧分布，而水平型环流流函数 R 的零值线所包含的范围显得略小。通过逐日的演变分析

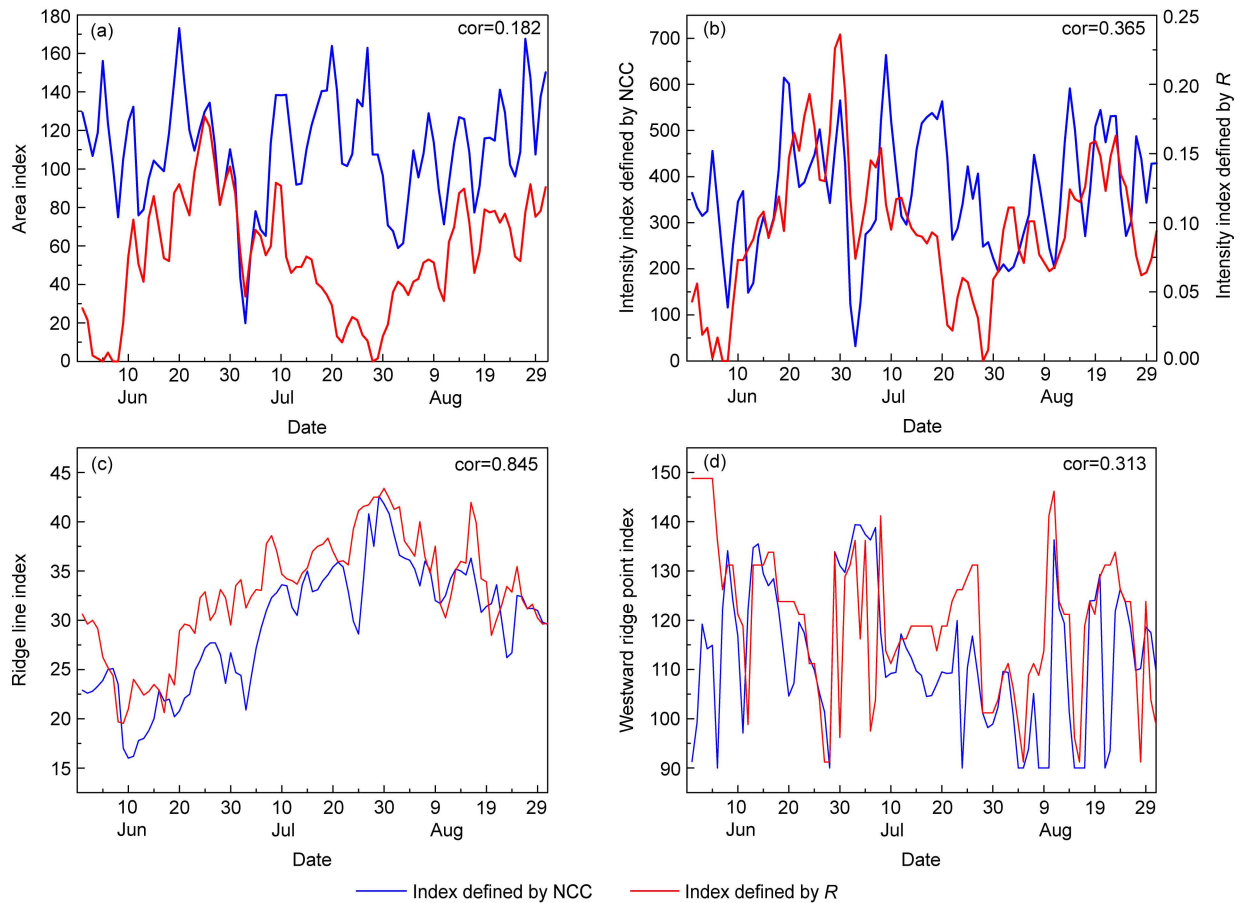


图2 2018年夏季西太平洋副热带高压 (a) 面积指数、(b) 强度指数、(c) 脊线指数和 (d) 西伸脊点指数的演变特征。红线表示流函数 R 所定义的副高新指数, 蓝线为国家气候中心(NCC)公布的副高的高度场指数, 右上角为两种指数的相关系数; 图(a)通过了0.1显著性检验, 图(b、c、d)通过0.01显著性检验

Fig. 2 (a) Area, (b) intensity, (c) ridge line, and (d) westward ridge point index of the western Pacific subtropical high in summer 2018. The red line represents the index defined by the stream function R , while the blue line is the index published by the National Climate Center (NCC). The upper right corner of the figure shows the correlation coefficient of the two indexes, in which the correlation is statistically significant at 0.1 level in (a) and 0.01 level in figure (b), (c), and (d)

发现, 位势高度场在5月份就开始增强抬升(图略), 使得位势高度场5880 gpm等值线所表示的副高在6月初就已增强到较强的程度, 在此后的6月1~18日的阶段内, 5880 gpm等值线所包含的范围反而呈现减小的趋势; 与此相反, 水平型环流流函数 R 的零值线所包含的范围在这一阶段则是逐渐增大的过程, 但由于在6月6日之前, 流函数 R 的零值线包含的范围位置位于 180°E 以东(图略), 之后才移动到 180°E 以西的位置, 这也就造成流函数 R 的零值线包含的范围在夏季第一个阶段平均面积偏小。到了图3b所示的第二阶段, 我国的主雨带位于长江中下游地区, 与此同时, 位势高度场5880 gpm等值线与流函数 R 的零值线所表示的副高均表现为向北、向西移动, 其中流函

数 R 的零值线所包含的面积大幅扩大, 而5880 gpm等值线所表示的副高面积在这一阶段并没有明显变化; 到了第三个阶段, 如图3c所示, 两种方法表示的副高都分裂为两个副高单体, 我国的华北雨季开始, 雨带位于流函数 R 的零值线所表示的副高单体的西侧, 而5880 gpm等值线所表示的副高单体面积偏大, 几乎覆盖了华北雨带的主要范围。图3d所示的第四阶段, 主雨带仍然分布在副高的西北侧以及南侧的位置。

综合图3的分析, 在2018年夏季, 位势高度场5880 gpm等值线与流函数 R 的零值线所表示的副高特征均能与主雨带位置变化较好地相匹配。两种方法显著的不同在于它们所表示的副高面积有较大差异, 在图3a、3c、3d所表示的3个阶段中,

位势高度场 5880 gpm 等值线内均包含了一定的雨带面积，而流函数 R 的零值线所表示的副高范围与雨带位置有着更好的对应关系。

为了更进一步说明流函数 R 的零值线所表示

的副高与降水的匹配程度，我们给出了如图 4 所示的 2018 年夏季副高指数与降水的相关系数分布图，其中图 4a、4b、4c、4d 分别表示流函数 R 的零值线新定义的副高面积指数、强度指数、脊线指数及

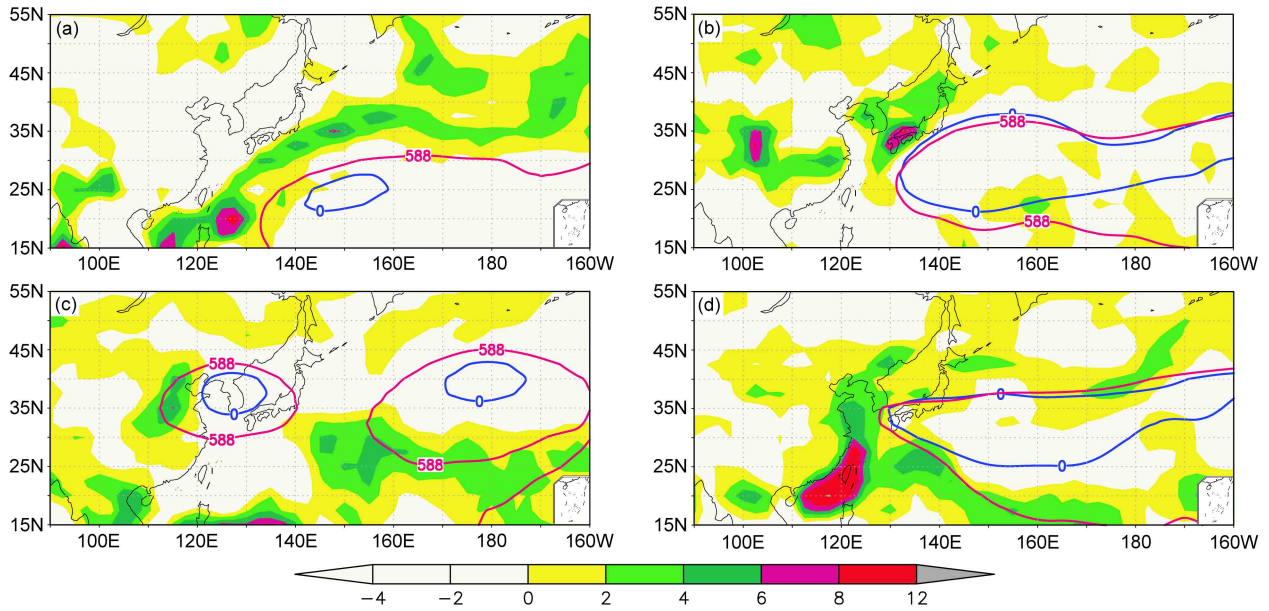


图 3 2018 年夏季 4 个阶段 500 hPa 西太平洋副热带高压形态及雨带分布：(a) 2018 年 6 月 1 日至 18 日；(b) 2018 年 6 月 19 日至 7 月 10 日；(c) 2018 年 7 月 11 日至 8 月 7 日；(d) 2018 年 8 月 8 日至 31 日。填色表示雨带分布（单位：mm），红线表示 500 hPa 位势高度场 5880 gpm 等值线，蓝线为 500 hPa 水平型环流流函数 R 的 0 值线

Fig. 3 The distribution characteristics of rain bands and western Pacific subtropical high at 500 hPa isobaric surface in summer 2018 for four time stages; (a) 1–18 June 2018; (b) 19 June to 10 July 2018; (c) 11 July to 7 August 2018; (d) 8–31 August 2018. The shading represents the distribution of rain bands. The red line is the 5880 gpm isoline of geopotential height field, and the blue line is the zero isoline of the horizontal circulation stream function R

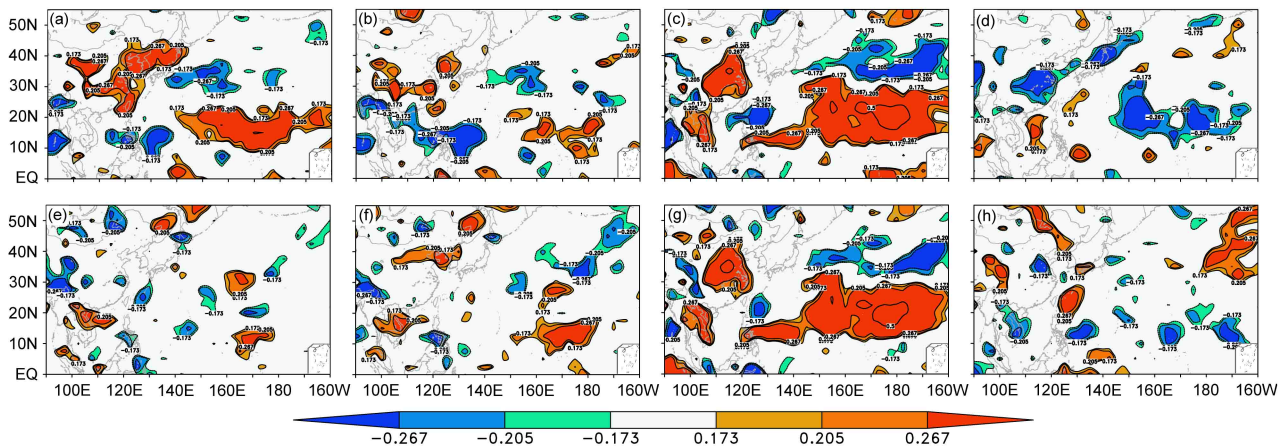


图 4 2018 年夏季西太平洋副热带高压指数 (a、e) 面积指数、(b、f) 强度指数、(c、g) 脊线指数及 (d、h) 西伸脊点指数与降水的相关系数分布：(a–d) 500 hPa 流函数 R 的零值线新定义的副高指数；(e–h) 500 hPa 位势高度场 5880 gpm 等值线定义的副高指数。填色部分由浅至深分别表示通过了 0.1、0.05 及 0.01 的显著性检验，其中冷色代表负相关，暖色表示正相关

Fig. 4 Correlation coefficient distributions between precipitation and the western Pacific subtropical high indexes (a–d) that are newly defined by the zero isoline of the stream function R and (e–h) defined by geopotential height field in summer 2018: (a, e) Area index; (b, f) intensity index; (c, g) ridge line index; (d, h) westward ridge point index. From dark to light, the shadings represent the correlation is statistically significant at 0.1, 0.05, and 0.01 levels, respectively. The cold colors represent the negative correlation while the warm colors represent the positive correlation

西伸脊点指数与降水的相关关系, 图 4e、4f、4h、4i 分别表示位势高度场 5880 gpm 等值线定义的副高面积指数、强度指数、脊线指数、西伸脊点指数与降水的相关关系。由图 4 可以看出, 脊线指数与降水的相关性最好, 其次是强度指数和面积指数, 西伸脊点与降水的相关性较差。依次对比图 4 中的上下两行发现, 流函数 R 的零值线新定义的副高指数与降水的相关关系明显好于 5880 gpm 等值线定义的副高指数, 且新指数与降水的相关关系通过显著性检验的区域面积要远大于传统高度场指数。图 4 还表明, 在我国 25°N 以北区域, 新定义的副高面积指数和强度指数与降水呈现的都是正相关, 以南范围则为负相关, 这说明当夏季副高强度偏强、面积偏大时, 我国北方地区对应降水偏多。对比图 4c 和 4h 发现, 在我国长江中下游以北以及华南地区, 脊线指数与降水呈正相关, 在江南地区则呈负相关, 这说明当副高脊线偏北时, 我国的华北和华南地区降水都偏多, 江南地区降水则偏少。图 4d 和 4i 表明本文新定义西伸脊点指数与降水的相关关系较好, 其次图 4d 还表明, 在我国长江中下游地区, 新定义西伸脊点指数与降水存在明显的负相关, 这说明当副高偏东时, 我国长江中下游地区降水会相应减少。

综上所述, 流函数 R 的零值线能够客观、合理地描述 2018 年夏季西太平洋副高的短期结构特征, 新定义的各项指数均能够较好地反映副高与我国降水的相关关系。

5 结论与讨论

西太平洋副高是东亚夏季风系统的重要成员, 其异常活动往往与我国夏季降水异常密切相关。在现有科学研究及短期气候预测业务中, 常使用 500 hPa 位势高度场 5880 gpm 等值线来量化地表征西太平洋副高的面积、强度及位置等特征参数。然而, 自 20 世纪 70 年代末以来的全球变暖, 使得等压面抬升, 高度场整体性升高膨胀, 500 hPa 等高线逐渐西进的趋势使得基于位势高度场的副高指数呈现出虚假的年代际演变特征。为克服全球变暖对副高特征指数描述的影响, 本文充分利用副热带地区相对涡度场和气压场之间存在着很好的配合关系这一基本事实, 构建了基于全球大气环流三型分解模型的副高指数的新定义方法。该方法利用全球

大气环流三型分解中的水平型环流流函数 R 与相对涡度场之间的等价关系, 以 500 hPa 流函数 R 的零值线为客观标准, 给出了副高的面积、强度、脊线位置及西伸脊点指数的新定义。并以 2018 年夏季西太平洋副高的短期结构演变特征及其与我国东部地区降水之间的关系研究为例, 验证了本文新定义的副高指数的客观性与合理性。结果表明, 与 500 hPa 位势高度场 5880 gpm 等值线所定义的副高指数相比较, 利用流函数 R 的零值线新定义的副高指数与我国夏季雨带的变化更匹配, 各指数之间的对应关系也较合理; 同时, 流函数 R 新定义的副高指数与降水的相关关系明显好于传统的高度场指数, 且新指数通过显著性检验的相关性区域面积要远大于高度场指数。此外, 通过分析 2018 年夏季整个北半球环流形势发现, 全球大气环流三型分解中的水平型环流流函数 R 不仅能够表征西太平洋副高的形态与结构特征, 它还可能成为表征整个北半球环流场演变特征的新工具。

本文利用全球大气环流三型分解模型中的水平型环流的流函数定义新的副高特征指数, 具有非常明显的理论优势。例如, 由于流函数明确的几何意义和物理意义, 使得它既能像位势高度那样形象地刻画副高的大尺度形态特征, 又能通过风场的直接作用来揭示副高内部发展的动力和热力因子作用; 同时, 全球大气环流三型分解理论中有关流函数的动力学、热力学方程组不仅能够用来诊断分析副高指数异常演变的动力学机理, 还可用来构建副高新指数的动力学模型, 开展新指数的动力学研究。此外, 由于全球大气环流三型分解模型能够将副高环流分解成为水平型、经圈型以及纬圈型环流的叠加, 若从水平方向、经圈方向以及纬圈方向来研究副高这一空间深厚的环流系统, 将是一种研究问题的新视角。本文下一步的工作计划是先利用全球大气环流三型分解理论中的动力学、热力学方程组开展 2018 年夏季西太平洋副高异常演变的机理研究, 再利用本文新定义的指数开展副高的年代际演变特征及其机理问题研究。事实上, 为了能够全面系统的揭示基于全大气环流三型分解理论进行副高新指数定义的优越性, 我们需要利用较长时间的天气、气候资料, 通过建立不同等压面上的按日、月或者季节变化的三维副高指数序列, 从时间序列分析的角度研究新指数序列与东亚夏季风之间的关系, 分析它们对我国东部地区主雨带异常的表征情况, 并

与传统高度场指数的研究结果进行深入的对比分析, 揭示副高新指数在我国夏季降水预报及诊断分析中的适用性等。仍有许多新的科学问题需要进一步地深入开展。

参考文献 (References)

- 邓北胜, 刘海涛, 丑纪范. 2010. ENSO 事件期间热带印度洋和太平洋地区大尺度海气相互作用联系的研究 [J]. *热带气象学报*, 26(3): 357–363. Deng Beisheng, Liu Haitao, Chou Jifan. 2010. Analysis of the linkages of large-scale air–sea interaction between the tropical Indian ocean and the pacific ocean during El Niño events [J]. *J. Trop Meteor. (in Chinese)*, 26(3): 357–363. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.03.013
- 丁瑞强, 李建平. 2009. 天气可预报性的时空分布 [J]. *气象学报*, 67(3): 343–354. Ding Ruiqiang, Li Jianping. 2009. The temporal–spatial distributions of weather predictability of different variables [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67(3): 343–354. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.03.001
- 高辉, 丁婷, 李维京. 2017. 三维副热带高压强度指数及对中国东部雨带异常表征的改进 [J]. *科学通报*, 62(31): 3643–3654. Gao Hui, Ding Ting, Li Weijing. 2017. The three-dimension intensity index for western Pacific subtropical high and its link to the anomaly of rain belt in eastern China [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 62(31): 3643–3654. doi:10.1360/N972017-00280
- 顾薇, 陈丽娟. 2019. 2018 年夏季海洋大气特征及对我国气候的影响 [J]. *气象*, 45(1): 126–134. Gu Wei, Chen Lijuan. 2019. Characteristics of atmospheric and oceanic condition and their influences on summer climate of China in 2018 [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 45(1): 126–134. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.01.011
- He C, Zhou T J, Lin A L, et al. 2015. Enhanced or weakened western North Pacific subtropical high under global warming? [J]. *Sci. Rep.*, 5(1): 16771. doi:10.1038/srep16771
- 胡淑娟. 2006. 全球大气运动的三维环流分解及大气垂直运动特征的分析 [D]. 兰州大学博士学位论文. Hu Shujuan. 2006. The three-dimensional expansion of global atmospheric circumfluence and characteristic analyze of atmospheric vertical motion [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University.
- 胡淑娟. 2008. 1998 年 7 月副热带高压短期结构演变特征与垂直运动的关系 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 44(3): 28–32. Hu Shujuan. 2008. Connection between the short period evolution structure and vertical motion of the subtropical high pressure in July 1998 [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 44(3): 28–32. doi:10.3321/j.issn:0455-2059.2008.03.006
- Hu S J, Cheng J B, Chou J F. 2017. Novel three-pattern decomposition of global atmospheric circulation: Generalization of traditional two-dimensional decomposition [J]. *Climatic Dyn.*, 49(9–10): 3573–3586. doi:10.1007/s00382-017-3530-3
- Hu S J, Chou J F, Cheng J B. 2018a. Three-pattern decomposition of global atmospheric circulation: Part I—decomposition model and theorems [J]. *Climatic Dyn.*, 50(7–8): 2355–2368. doi:10.1007/s00382-015-2818-4
- Hu S J, Cheng J B, Xu M, et al. 2018b. Three-pattern decomposition of global atmospheric circulation: Part II—dynamical equations of horizontal, meridional and zonal circulations [J]. *Climatic Dyn.*, 50(7–8): 2673–2686. doi:10.1007/s00382-017-3763-1
- 黄士松. 1963. 副热带高压的东西向移动及其预报的研究 [J]. *气象学报*, 33(3): 320–332. Huang Shisong. 1963. A study of the longitudinal movement and its forecasting of subtropical anticyclones [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 33(3): 320–332. doi:10.11676/qxb1963.030
- 黄士松, 余志豪. 1962. 副热带高压结构及其同大气环流有关若干问题的研究 [J]. *气象学报*, 31(4): 339–359. Huang Shisong, Yu Zhihao. 1962. On the structure of the sub-tropical highs and some associated aspects of the general circulation of atmosphere [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 31(4): 339–359.
- Huang Y Y, Wang H J, Fan K, et al. 2015. The western Pacific subtropical high after the 1970s: Westward or eastward shift? [J]. *Climatic Dyn.*, 44(7–8): 2035–2047. doi:10.1007/s00382-014-2194-5
- 刘海涛, 胡淑娟, 徐明, 等. 2007. 全球大气环流三维分解 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37(12): 1679–1692.
- Liu Haitao, Hu Shujuan, Xu Ming, et al. 2008. Three-dimensional decomposition method of global atmospheric circulation [J]. *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, 51(3): 386–402. doi:10.1007/s11430-008-0020-9
- 刘屹岷, 吴国雄, 宇如聪, 等. 2001. 热力适应、过流、频散和副高 II. 水平非均匀加热与能量频散 [J]. *大气科学*, 25(3): 317–328. Liu Yimin, Wu Guoxiong, Yu Rucong, et al. 2001. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone part II: Horizontal inhomogeneous heating and energy dispersion [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25(3): 317–328. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.03
- 刘芸芸, 李维京, 艾(子兑)秀, 等. 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用 [J]. *应用气象学报*, 23(4): 414–423. Liu Yunyun, Li Weijing, Ai Wanxiu, et al. 2012. Reconstruction and application of the monthly western Pacific subtropical high indices [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 23(4): 414–423. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.04.004
- Lu R U. 2002. Indices of the summertime western north pacific subtropical high [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19(6): 1004–1028. doi:10.1007/s00376-002-0061-5
- Lu R Y, Li Y, Ryu C S. 2008. Relationship between the zonal displacement of the western Pacific subtropical high and the dominant modes of low-tropospheric circulation in summer [J]. *Prog. Nat. Sci.*, 18(2): 161–165. doi:10.1016/j.pnsc.2007.07.009
- 吕美仲, 侯志明, 周毅. 2004. 动力气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 249–275. Lv Meizhong, Hou Zhiming, Zhou Yi. 2004. Dynamic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 249–275.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征 [J]. *气象学报*, 32(1): 1–10. Tao Shiyan, Xu Shuying. 1962. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yantze and Hwaihe valleys in summer [J]. *Acta*

- Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 32(1): 1–10. doi:10.11676/qxxb1962.001
- 陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 1962. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征 [J]. *气象学报*, 32(2): 91–103. Tao Shiyan, Xu Shuying, Guo Qiyun. 1962. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia in summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 32(2): 91–103. doi:10.11676/qxxb1962.009
- 陶诗言. 1963. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1–146. Tao Shiyan. 1963. Some Studies on Subtropical Synoptic Systems over China in Summer (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–146.
- 王靖, 张玲. 2018. 2018 年 8 月大气环流和天气分析 [J]. *气象*, 44(11): 1501–1508. Wang Qian, Zhang Lin. 2018. Analysis of the August 2018 atmosphere circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 44(11): 1501–1508. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.013
- 吴国雄, 刘还珠. 1999. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展 [J]. *气象学报*, 57(1): 1–15. Wu Guoxiong, Liu Huanzhu. 1999. Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57(1): 1–15. doi:10.11676/qxxb1999.001
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1–104. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclones (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–104.
- Wu L G, Wang C. 2015. Has the western Pacific subtropical high extended westward since the late 1970s? [J]. *J. Climate*, 28(13): 5406–5413. doi:10.1175/JCLI-D-14-00618.1
- 徐明. 2001. 大尺度环流的三维分解及其动力特征的研究 [D]. 兰州大学博士学位论文. Xu Ming. 2001. Study on the three dimensional decomposition of large scale circulation and its dynamical feature [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University
- Yang H, Sun S Q. 2003. Longitudinal displacement of the subtropical high in the western Pacific in summer and its influence [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20(6): 921–933. doi:10.1007/BF02915515
- 杨辉, 孙淑清. 2014. 夏季西太平洋副热带高压东西向活动特征 [C]// 第六届海峡论坛暨 2014 年两岸民生气象论坛论文集. 厦门: 中国气象学会, 台湾大学, 台湾中央大学, 278–290. Yang Hui, Sun Shuqing. 2014. Characteristics of west-Pacific Subtropical high east-west activities in summer [C]// Proceedings of the 6th Cross-strait People's Livelihood Meteorological Forum 2014. Xiamen: Chinese Meteorological Society, National Taiwan University, National Central University, 278–290.
- Yang R W, Xie Z A, Cao J. 2017. A dynamic index for the westward ridge point variability of the western pacific subtropical high during summer [J]. *J. Climate*, 30(9): 3325–3341. doi:10.1175/JCLI-D-16-0434.1
- 张芳, 何立富. 2018. 2018 年 6 月大气环流和天气分析 [J]. *气象*, 44(9): 1237–1244. Zhang Fang, He Lifu. 2018. Analysis of the June 2018 atmospheric circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 44(9): 1237–1244. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.012
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 45–55. Zhao Zhenguo. 1999. The Precipitation Anomaly over China and Its Environmental Fields in Summer (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 45–55.
- 中国气象局国家气候中心. 1998. 98 中国大洪水与气候异常 [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 1998. Floods and Climate Anomalies in China in 98 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.