

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

高辉*, 丁婷, 李维京

中国气象局国家气候中心开放实验室, 北京 100081

* 联系人, E-mail: gaohui@cma.gov.cn

2017-06-06 收稿, 2017-07-20 修回, 2017-07-20 接受, 2017-09-27 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2013CB430203)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306033)和国家自然科学基金(41205039)资助

摘要 西太平洋副热带高压(副高)是位于对流层中下层的深厚环流系统,其位置和强度的年际差异直接决定着东亚气候的异常。但现有副高参数定义均囿于500 hPa单层及5880 gpm这一特定阈值,造成副高强度指数不能很好表征我国东部雨型特征尤其是长江流域的旱涝。统计结果表明,东亚副热带夏季风强度与同期各层位势高度的显著负相关性随经度自西向东有明显的自高层向低层下传的特征。在西太平洋暖池区,最显著的负相关区位于对流层中低层,且500 hPa的相关系数明显弱于700和850 hPa,表明东亚副热带夏季风的强度更容易受到低层副高强度异常的影响。因此本文分析了不同季节西太平洋副热带地区该阈值在各格点的代表性,发现基于该阈值定义有很大的局限性和季节差异,由此从副高空间结构特征重新定义了一个新的三维副高强度指数,即(10°~30°N, 110°~150°E)区域1000~500 hPa各层位势高度标准化值累积值,并和两种传统的副高强度指数对比,发现新的三维副高强度指数无论是对副热带夏季风还是对长江中下游降水异常的特征均有明显提高。虽然3种副高强度指数都能反映出和东部降水最强正相关位于长江中下游这一基本特征,但仅有本文定义的三维强度指数与之相关性可通过显著性检验,这主要是因为三维副高强度指数比其他两种指数能更好反映东亚热带和副热带地区经、纬向水汽输送的异常。

关键词 西太平洋副热带高压, 三维副高强度指数, 东亚夏季风, 降水

我国地处亚澳季风区,夏季风活动对天气气候的影响不言而喻。这其中,西太平洋副热带高压(简称副高)的作用尤为明显,它是东亚夏季风体系结构中最关键的两个基本成员之一^[1]。早在建国之初,以叶笃正、陶诗言等为代表的老一辈气象学家们就深入分析了副高和我国天气的密切关系,并取得了诸多开创性成果^[2,3],为我国的天气预报和早期的季节预测业务奠定了坚实基础,并成为该领域的理论指南。之后对副高本身结构和变率特征、副高的影响因子及其与我国天气气候关系的研究不断增多。

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位势高度场定义了5种最常用的副高参数^[4],即副高面积、强度、脊线、北界和西伸脊点指数。副高特征参数的定义有助于更好定量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。因此该套指数资料在科研中有着广泛的使用,例如副高面积^[5,6]、强度^[7]、西伸脊点^[8]等。副高的特征参数亦被应用于我国短期气候预测业务之中,并取得了较好的预测和服务效果,如1998年对夏季副高和长江流域特大洪涝的预测^[9]。这一定义是用10°N以北,110°E~180°范围内5°×10°的菱形网格点上位势高度值是否达到指

引用格式: 高辉, 丁婷, 李维京. 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. 科学通报, 2017, 62: 3643–3654

Gao H, Ding T, Li W J. The three-dimension intensity index for western Pacific subtropical high and its link to the anomaly of rain belt in eastern China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3643–3654, doi: 10.1360/N972017-00280

定阈值为依据. 以副高强度为例, 该参数定义为上述范围内各格点位势高度值超过588 dagpm(位势什米)的格点上位势高度值与587 dagpm的累计差值(该方法定义的强度指数简称WPSHI1). 虽然这一指数在2010年之前一直在业务中应用, 但考虑到这一定义使用的网格点过于粗疏, 刘芸芸等人^[10]改用 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格点重新定义了副高强度指数(简称WPSHI2), 但方法与第一种类似. 这一新指数已在业务中取代旧指数. 然而无论是科研还是业务工作也发现, 这一定义完全基于500 hPa层的5880 gpm等值线, 这在副高强度较强时是可行的. 但当副高较弱时, 在实际天气图上有时分析不出这一等高线, 描述副高活动时会出现不连续现象^[11]. 而在分析动力模式的数值模拟时, 由于模式结果和实况存在系统偏差, 使用这一定义亦不合适^[12]. 近年来的科研中, 850 hPa位势高度异常已被广泛用以表征副高强度. 例如, Xiang等人^[13]基于850 hPa层($15^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$, $115^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$)平均位势高度定义副高强度, 并揭示出局地环流的反馈作用要强于ENSO对其影响. Lu等人^[14,15]用该层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. Lee等人^[16]揭示了夏季850 hPa副高强度对东亚夏季风和印度洋夏季降水的影响. 王启等人^[17,18]分析了该层副高强度的年际和年代际变化特征. 研究中亦有针对副高其他特定参数的定义, 如用纬向风速及其经向切变为零定义脊线位置^[19,20].

早期大量的研究揭示, 当夏季副高偏强偏西时往往对应于长江中下游多雨, 这一关系亦成为现阶段短期气候预测统计模型的直接判据^[4]或是间接因子. 例如, 范可等人^[21]基于年际增量法建立的长江中下游夏季降水预测模型中, 就选择了与副高密切相关的冬季南太平洋环流指数作为前兆预测信号之一. 从长江流域夏季降水和西太平洋暖池上空多数格点500 hPa位势高度值的显著相关也可得出这一结论. 大量的诊断事实也揭示, 副高不仅在ENSO影响东亚夏季风过程中起到关键作用, 也是其他海域如印度洋海温^[22]或是其他地区大气环流如南半球环流影响东亚夏季降水的重要纽带^[23~26]. 但无论是前述哪种副高强度指数, 其与夏季长江流域降水相关性达不到95%的置信水平. 这主要是因为两种强度指数的定义方法一致, 均是基于500 hPa层的同一阈值. 这一相关性不够显著一方面受到20世纪80年代以来

副高明显的西伸增强线性趋势影响^[27,28], 但此时段我国东部雨型却呈现年代际变化规律; 另一方面也表明现有的两种副高强度指数定义均存在局限性, 而这一局限性源于阈值和层次的限定, 导致之前指数在表征副高强度方面不够全面客观. 因此本文将从副高三维结构特征出发, 不单纯依赖于某一特定阈值, 重新定义副高强度指数, 并将其和之前两种指数在表征夏季风环流和东部雨带异常方面开展比较.

1 资料简介

文中所用逐日降水资料取自中国气象局国家气象信息中心发布的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)》^[29], 时段为1981~2016年. 该数据集集中解决基础气象资料质量和国家级-省级存档资料不一致的问题, 数据质量和空间分辨率(测站数)比之前观测降水资料均有明显提高, 已在业务和科研中得到广泛应用. 同时段的大气环流资料为NCEP/NCAR逐月再分析资料集中的1000~100 hPa位势高度场、850 hPa水平风场和比湿场. 该资料水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ^[30,31]. 业务中常用5880 gpm作为500 hPa层副高的特征等值线, 而在其他层次无明确规定特征等高线具体值. 考虑到西太平洋副高出现在对流层中下层, 且在副热带地区呈明显的波状分布, 因此用格点位势高度值除以该格点所在纬圈位势高度平均值以消除垂直差异且显示其中心位置.

本文用到的东亚副热带夏季风强度指数取自张庆云等人^[32], 即东亚热带季风槽区($10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $100^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$)与东亚副热带地区($25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$, $100^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$)的850 hPa纬向风距平差.

2 传统副高强度指数定义的局限性和三维副高强度指数定义

副高是存在于对流层中下层的深厚环流系统. 研究表明, 副高脊线纬度位置随高度有很大变化. 在冬季其脊线随高度南倾, 而在夏季则向北倾斜^[33]. 副高脊线的季节性变化还表现为春季后期的脊线断裂过程, 而这种断裂和孟加拉湾夏季风爆发密切相关^[34]. 但从前文可知, 目前定义副高各特征参数均基于500 hPa层位势高度(也即对流层中层), 且无论冬夏所参考阈值固定为5880 gpm. 这样的定义是否具有局限性? 图1给出了1981~2010年平均的1, 4, 7和

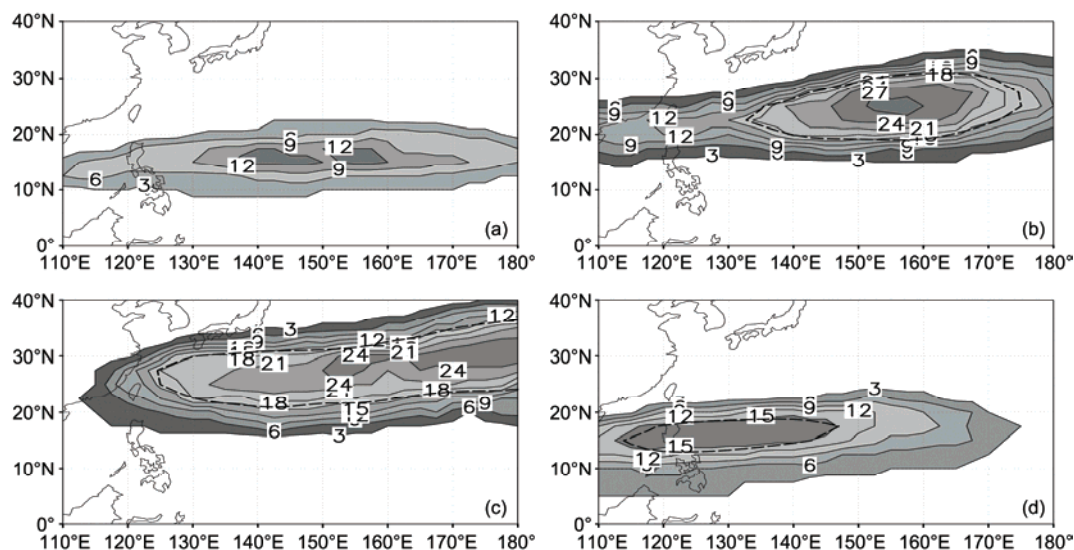


图 1 1981–2010 年 1 月(a), 4 月(b), 7 月(c)和 10 月(d)500 hPa 格点位势高度值超过 5880 gpm 的累计年份(阴影和实等值线, 单位: a)及 30 年平均的 5880 gpm 特征等值线(虚线)

Figure 1 The total years of geopotential height exceeding 5880 gpm of 500 hPa at each grid in January (a), April (b), July (c) and October (d) for 1981–2010 (shaded area and solid line, unit: a), and the 5880 gpm contour for 30-year mean (dashed line)

10 月西北太平洋地区逐一 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点位势高度值超过 5880 gpm 的累计年份值。很显然, 由于副高位置和强度本身存在很强的季节变化, 使得图 1 所显示累计年份数也有很大的季节差异。在 1 月(冬季, 如图 1(a)所示), 南北方向副高主要位于 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ 之间, 东西向则位于 $140^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$ 。30 年中超过 5880 gpm 的累计年份最大为 12–14 a, 这也表明即使在副高主体区域, 冬季大部分年份的位势高度值仍达不到 5880 gpm, 这从气候平均的特征等值线也可以看出。在 1 月的图上并未能够绘制 5880 gpm 值。这也意味着用这一数值作为定义副高强度的阈值将会出现部分年份冬季副高强度均为零, 即使这些年份副高强弱有明显差异也无法体现。4 月(春季)副高强度有所增强(图 1(b))。从累计年份看, 中心最大值为 15–17 a, 这一中心值所在区域和气候平均图上 5880 gpm 等值线位置一致。相比于冬季, 虽然春季副高中心南北位置没有大的变化, 仍位于 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ 之间, 但明显向西延伸, 中心位于 $120^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{E}$ 。7 月(夏季)是副高最强的季节, 其主体位置更偏北偏东(图 1(c))。经向脊线位置位于 $20^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$ 之间, 从 5880 gpm 等值线看其范围比冬、春季有了明显的扩大。在夏季, 超过 5880 gpm 格点的累计年份最大值可达 21–24 a, 同样表明副高强度在夏季达到其最强值。10 月(秋季)副高减弱, 但强度仍强于冬、春季, 这从副高的 5880 gpm 特征等值线和超过

该阈值的累计年份也可以看出(图 1(d))。近年来, 中国气象局在气候监测业务中已开展对副高的逐日实时滚动监测, 所用的监测标准在各季节均基于该阈值。而从图 1 可知 5880 gpm 这一等高线有很大的季节差异, 将其作为阈值定义副高强度指数(也包括其他副高参数)有一定的局限性。

由于位势高度值随高度上升很快, 各层间数值有很大差异。为更好看出副高的三维结构特征, 图 2(a)给出了全年气候平均的各层逐一格点纬圈平均位势高度比值(各层次均在图上标注)。比值大于 1 的中心对应于高压中心, 小于 1 的中心对应于低压中心。可以看出, 就全年平均而言在对流层低层的 1000~850 hPa, 高压中心主要位于中太平洋上空。但随着高度增高, 位势高度值相对中心明显偏北偏西。这一垂直变化在夏季(图 2(b))表现得尤为清楚, 这是因为在夏季, 对流层高层的南亚高压从海上移动到青藏高原或伊朗高原上空, 而中低层的副热带高压受气温升高影响出现季节性增强, 无论是南北方向或是东西方向范围扩大, 并明显偏西偏北。对比每一层位势高度中心, 可见有明显的垂直差异。在 400 hPa 层以上, 中西太平洋上空的高值中心消失, 对应的是高原上空高值中心的迅速增强。而在对流层低层, 高压中心位置比中层偏东。从春、夏、秋三季 500 hPa 层上 5880 gpm 特征等值线位置(图略)亦可知, 夏季 600 hPa

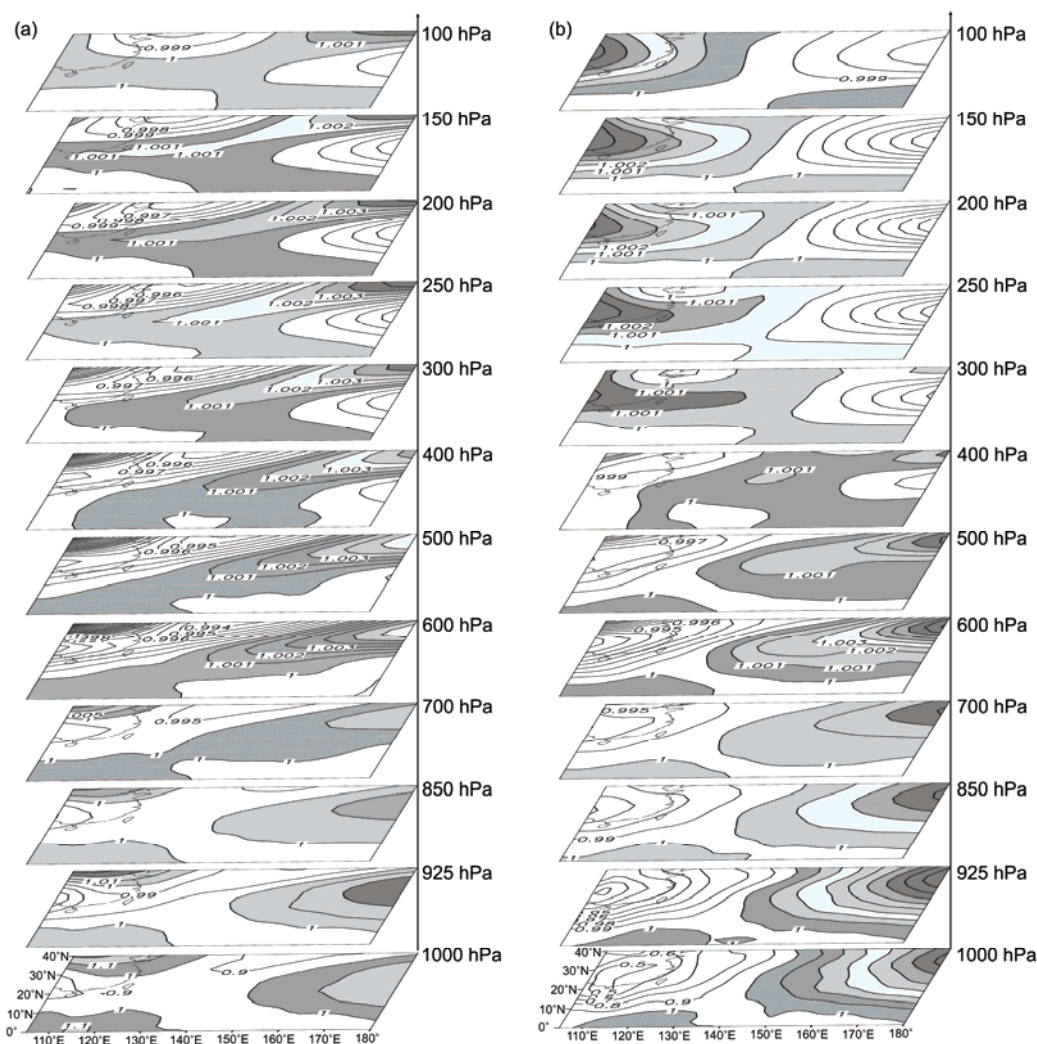


图2 1981~2010年平均的各层纬圈平均位势高度比值, 阴影区表示比值大于1. (a) 全年; (b) 夏季

Figure 2 The ratio of the geopotential height to the zonal mean at each level for the period 1981–2010. The shaded area means the ratio exceeding 1. (a) Annual mean; (b) summer

高压中心分布与该阈值较为接近, 但在低层则呈现出经向差异, 同样表明500 hPa特征等高线在反映三维副高中心结构时有不足之处。

3 三维副高强度指数对东亚夏季风和我国东部雨带异常表征的改进

不仅副高的东西或南北位置可以影响到夏季风的北界以及水汽输送路径, 其强度异常同样会改变夏季风的强弱。现有的东亚副热带夏季风指数定义大多与副高南北两侧的环流有关。例如, 张庆云等人^[32]发现东亚热带季风槽区(10°~20°N, 100°~150°E)与东亚副热带地区(25°~35°N, 100°~150°E)的850 hPa

纬向风呈反位相变化趋势, 由此将这两个地区平均的纬向风距平差作为副热带夏季风指数。这一指数异常实际是副高形态异常的反映。赵平和周自江^[35]基于副高和蒙古低压的差异来突出这两个系统对副热带夏季风的影响并以此来定义副热带夏季风指数。梁萍等人^[36]采用东亚副热带地区南北两侧经向水汽输送的差异来表征副热带地区的水汽辐合并定义副热带夏季风指数。上述指数都可较好表征副热带夏季风环流, 并与长江流域夏季降水有显著正相关。而夏季风与长江流域夏季降水的正相关亦是副高与中国东部降水关系的体现。但现有的两种副高强度指数均不能很好表征其与长江流域夏季降水的密切关

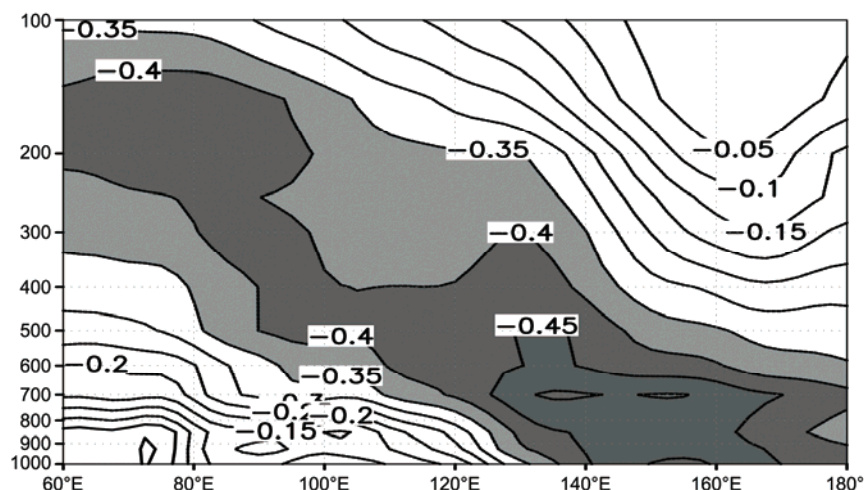


图3 东亚副热带夏季风指数与同期各层位势高度线性相关(10°~35°N平均), 阴影区通过 95%的置信水平

Figure 3 The linear correlation between the East Asian subtropical summer monsoon index and the geopotential height at each level (averaged in 10°~35°N). The shaded area denotes the correlation pass the 95% confidence t -test level

系. 我们分析了东亚副热带夏季风指数[32]与同期各层位势高度线性相关(图3). 可以看出, 一方面, 显著的负相关区随经度自西向东有明显的自高层向低层下传的特征. 在亚洲大陆上空, 最显著的负相关区位于100~200 hPa, 也即南亚高压主体位置所在的层次, 表明南亚高压偏强(弱), 对应东亚夏季风弱(强). 另一方面, 图3也说明当南亚高压东侧偏强即中心偏东时, 夏季风往往偏弱. 而在西太平洋暖池区, 最显著的负相关区则位于对流层中低层, 尤其是700 hPa及以下. 由于上述夏季风指数是基于850 hPa风场定义, 且夏季

风主要盛行于低层, 因此图3也表明低层的副高强度和风场异常有更好的一致性. 在500 hPa层负相关也很显著, 体现为副高弱(强)夏季风强(弱)的特点, 但就相关系数值而言弱于低层. 由此可以认为东亚副热带夏季风的强度更容易受到低层副高强度异常的影响.

长江流域夏季降水同样表现出和低层副高关系更为密切的特点. 图4给出了110°E以东, 28°~34°N平均降水与夏季副高所在纬度各层位势高度线性相关. 可见在暖池上空, 500 hPa以下均为显著的正相关区, 亦即反映为副高强(弱)对应夏季长江多雨(少雨)这一

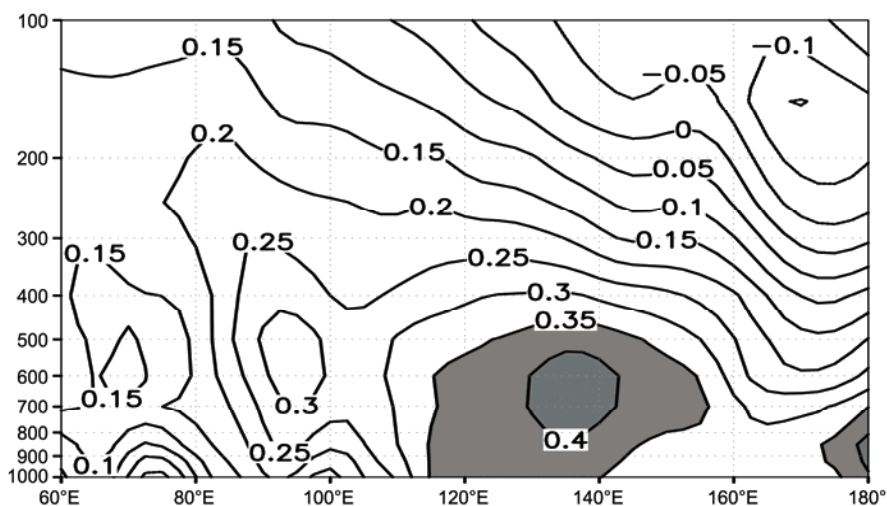


图4 (28°~34°N, 110°~122°E)平均降水与同期各层位势高度线性相关(10°~35°N平均), 阴影区通过 95%的置信水平

Figure 4 The linear correlation between summer precipitation averaged at (28°~34°N, 110°~122°E) and the geopotential height at each level (averaged in 10°~35°N). The shaded area denotes the correlation pass the 95% confidence t -test level

基本关系,而这一关系也是传统物理统计预测的基础^[4].但和图3类似,700和850 hPa的相关性要强于500 hPa,这主要是因为对流层低层的水汽输送尤其是850 hPa层更能代表整层水汽输送的异常^[37],副热带夏季风的强度决定着水汽输送的强度.而从图3可知夏季风更多受低层副高强度的影响.研究也发现,虽然850 hPa层副高和该层水汽输送配合更好,但部分月份该层和500 hPa层位势高度距平存在相异之处,且这样的月份并不鲜见(例如1992年1月850 hPa副高区为正位势高度距平,但在500 hPa层则为较强的负位势高度距平,图略).因此,我们基于副高体的垂直结构特征以及夏季风、降水与位势高度相关,重新定义了一个新的三维副高强度指数,即($10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)区域平均的1000~500 hPa各层位势高度值标准化值之和,此处作标准化处理是为了去除位势高度值的垂直差异.

从各月各层所选区域内位势高度的线性相关可以发现(表略),各层副高强度变化一致性很高.以7月为例,最弱的相关层出现在1000和500 hPa,但相关系数值也高达0.81,这主要是副高在夏季强度达到最强.在1月,最弱的相关层也出现在1000和500 hPa.虽然1月为副高季节性最弱的时期,但这两层相关值也达到0.43(通过95%置信水平检验).这表明本文的三维副高强度定义是可行的.

前已指出,东亚副热带夏季风^[32]的强度更容易受到低层副高强度异常的影响(图3).为分析三维副高强度指数与其他东亚夏季风的关系及表征能力,本文选取另外4种夏季风指数,分别为:(1)在($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)范围内平均的850 hPa经向风^[38];(2) $20^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 范围内 110°E 与 160°E 之间的海平面气压差^[39];(3)基于东亚大气环流EAP遥相关型,用(40°N , 125°E)和(20°N , 125°E)及(60°N , 125°E)这三点的500 hPa位势高度差定义^[40];(4)基于东亚夏季风的热力特性,用($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)面积平均对外长波辐射(outgoing longwave radiation, OLR)距平来表示季风强度^[41].这4种夏季风指数分别从季风的不同角度出发,具有较好的代表性.分析表明(图略),和中央气象台长期预报组定义的副高强度^[4]相比,三维副高强度指数和4种夏季风指数的相关性均更高,且均通过95%置信水平检验.和刘芸芸等人^[10]定义相比,三维副高强度与第1种及第4种夏季风指数的相关性更高,与第3种指数的相关接近,与第2种夏季

风指数相关略弱,可能原因是本文定义范围的东界更偏西(东界为 150°E ,而海陆气压差指数选用 160°E 的气压值).综合比较副高强度和4种夏季风指数的相关性,三维副高强度指数具有更好的表征能力.

图5更清楚表明了三维副高强度指数对长江中下游降水有更好的表征.这里给出了3种副高指数与 110°E 以东地区各纬圈平均降水线性相关.从图5可以看出,三种指数都很好反映出最强正相关位于长江中下游这一根本特征,但仅有三维副高强度指数与 $27^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 之间的降水通过95%的置信水平.在华南地区,三种指数和降水的相关性有一定差异.WPSHI1表现为较弱的正相关,而WPSHI2和三维副高强度指数均表现为弱的负相关.很显然,后两种指数与华南降水的关系更接近我国东部雨型的分布.

与传统的两种副高强度定义^[4,10]类似,三维副高强度自20世纪80年代开始有明显的年代际增强趋势,此外亦有较强的年际变率,例如副高最强的1998年.1998年夏季,长江中下游发生了历史罕见的大洪水.而在该年,受前期强厄尔尼诺事件影响,副高强度突破1951年以来历史极值^[9].因此,该年的副高强度与降水的同位相关性在图5的线性相关计算中占有较为重要贡献.为此我们在统计分析中排除了1998年的影响(图5中对应虚线).可见,对于本文定义的三维副高强度指数,虽然在去除1998年之后和降水相关性有所下降,但相关系数最大值仍可达0.40左右,也即最强相关仍能通过95%的置信水平.但对于其他两个指数,很明显相关值在长江中下游地区有了很大程度地下降.这也表明,本文定义的三维副高强度指数能比前两种指数更好刻画长江中下游降水异常.

图3的结果表明东亚副热带夏季风的强度更容易受到低层副高强度异常的影响,而副热带夏季风又和低层水汽输送密切相关.因此分析了夏季3种副高指数与850 hPa纬向和经向水汽输送的相关如图6.可见无论是经向还是纬向水汽输送,三维副高强度指数都有更高的相关性.以纬向水汽输送为例,如图6(a)所示,整个东亚副热带地区的相关性都在0.4以上,尤其是华南至长江中下游,可达0.6左右,而在热带地区则为显著的负相关,中心值甚至可达-0.8.这样一种相关型实际上反映了副高南北两侧的东风和西风异常.当副高强时,其北侧易为西风距平而南侧为东风距平.相比之下,虽然其他两种指数在热带和副热带地区也为显著的负相关和正相关,但相关

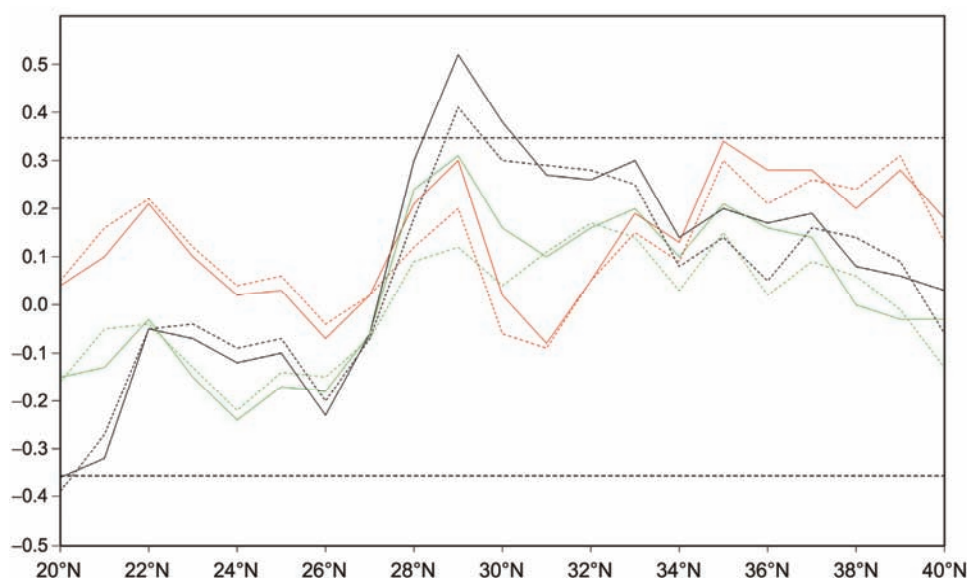


图 5 夏季 3 种副高指数与 110°E 以东地区各纬圈平均降水线性相关(黑色, 三维副高强度指数; 红色, 中央气象台长期预报组定义; 绿色, 刘芸芸等人^[10]定义. 实线为所有年份, 点线为去掉 1998 年). 图中两条水平长虚线对应数值分别为 ± 0.36 , 表示 95% 的置信水平检验线

Figure 5 The linear correlation between the three subtropical indices in summer and the zonal mean precipitation in the east of 110°E (black, three-dimension subtropical high index; red, WPSHI1; green, WPSHI2. Solid lines mean all years and dashed lines mean the years without 1998). The horizontal dashed lines mean the 95% confidence t -test level

值要明显弱于三维副高强度指数(图6(b), (c)). 和纬向水汽输送相匹配, 副高强度和经向水汽输送最强的相关区位于我国华南南部沿海至长江中游地区, 也即副高西界的最大南风位置. 但同样, 图6(d)的相关性明显强于图6(e)和(f), 这同样表明本文定义的三

维副高强度指数比之前指数能更好反映经向水汽输送的异常. 这也解释了图5的差异.

初步的分析表明, 在其他季节三维副高强度指数对东部降水亦有更好的表征. 图7给出了逐月3种副高指数与110°E 以东各纬度带平均降水的同期线性

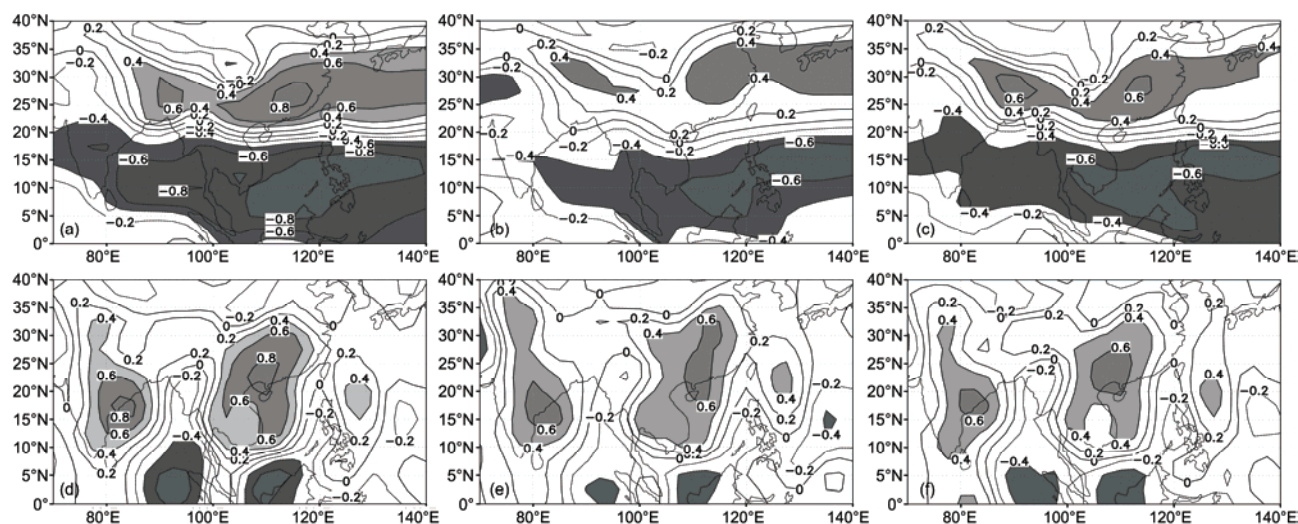


图 6 夏季 3 种副高指数与 850-hPa 纬向((a)~(c))和经向((d)~(f))水汽输送通量相关性. (a), (d) 三维副高强度指数; (b), (e) 中央气象台长期预报组定义; (c), (f) 刘芸芸等人^[10]定义. 阴影区通过 95% 的置信水平

Figure 6 Correlations between three WPSH intensity indices and the zonal ((a)~(c)) and meridional ((d)~(f)) moisture flux at 850 hPa in summer. (a), (d) Three-dimension subtropical high index; (b), (e) WPSHI1; (c), (f) WPSHI2. The shaded area denotes the correlation pass the 95% confidence t -test level

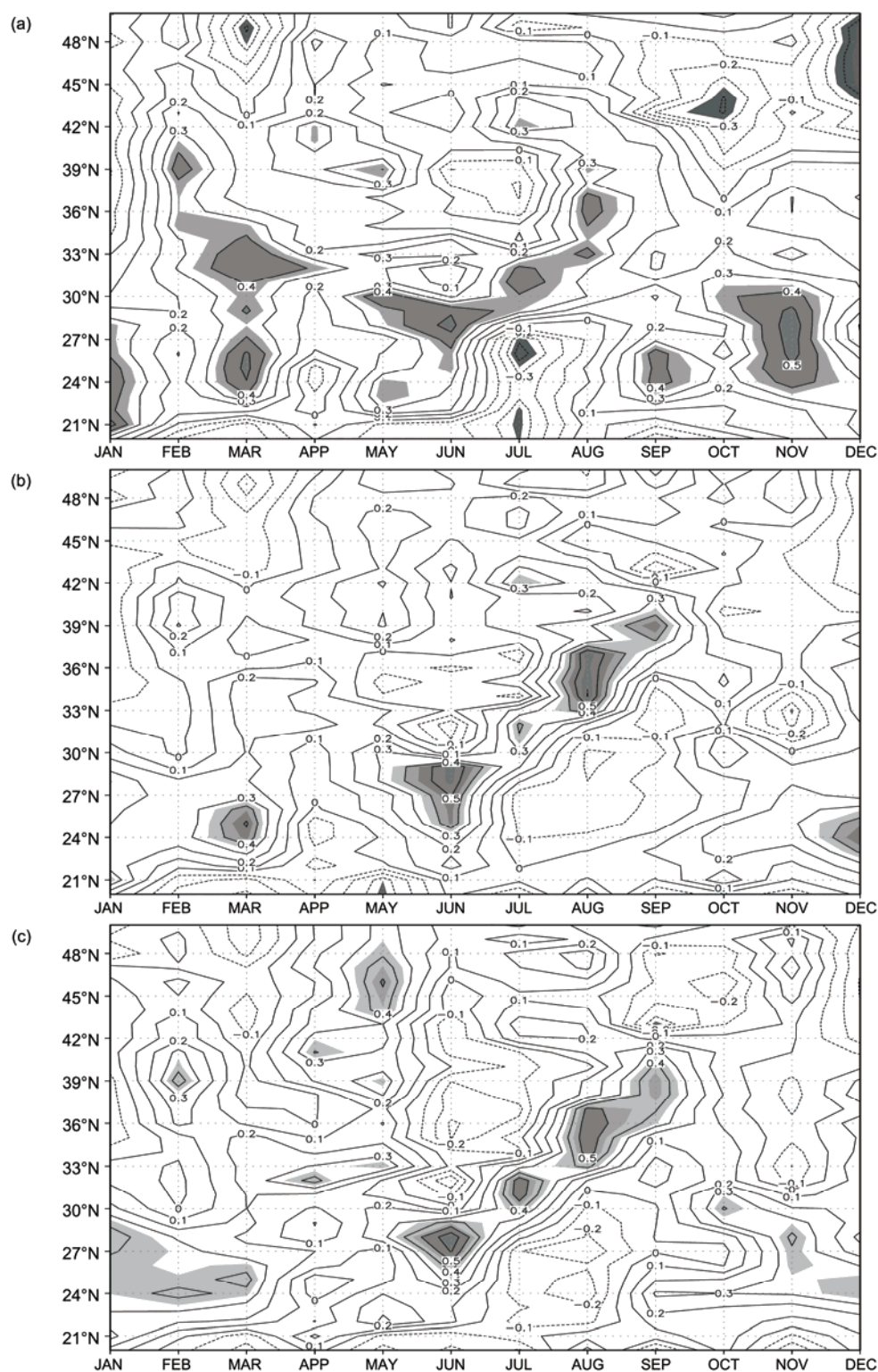


图 7 逐月 3 种副高指数与 110°E 以东各纬度带平均降水的同期线性相关, 阴影区通过 95% 置信水平检验. (a) 三维副高强度指数; (b) 中央气象台长期预报组定义; (c) 刘芸芸等人^[10]定义. 横坐标为月份, 纵坐标为降水纬度

Figure 7 Monthly correlations between three WPSH intensity indices and the zonal mean precipitation in the east of 110°E. (a), (d) Three-dimension subtropical high index; (b), (e) WPSHI1; (c), (f) WPSHI2. The shaded area denotes the correlation pass the 95% confidence t -test level. The X-axis means months, and the Y-axis means the latitudes of precipitation

相关. 可以看出, 在春季三维副高强度指数和中国江南-华南北部地区均存在一个较为显著的正相关区, 中心值在0.4以上(图7(a)), 而春季中国多雨中心位置恰位于该地区. 这和预测业务中使用的统计参考模型较为一致. 而其他两种副高指数与春季南方降水关系明显偏弱(图7(b)和(c)). 在秋季亦是如此, 尤其是11月, 长江中下游-江南等地降水和三维副高强度的高相关中心值可超过0.5以上(图7(a)), 但其他两种副高指数均未能反映出这一高相关性(图7(b)和(c)). 由于春季和秋季均处于季节转换的过渡期, 其降水成因更复杂, 和夏季风降水有明显不同, 后面将会进一步加以研究.

4 讨论与结论

副高为存在于对流层中下层的深厚环流系统, 其位置和强度异常对东亚夏季气候有极为重要的影响. 而目前业务和科研所用副高各特征参数均只基于500 hPa层5880 gpm阈值所定义. 本文首先分析了不同季节西太平洋副热带地区该阈值在各格点的代表性, 发现在冬季使用该阈值定义有很大的局限性, 1981~2010年的30年中超过该阈值的累计年份不及一半. 即使在一年之中副高最强的夏季, 亦有部分年份位势高度值小于该阈值. 分析发现, 东亚副热带夏季风指数与同期各层位势高度的显著负相关性随经度自西向东有明显的自高层向低层下传的特征. 在亚洲大陆上空, 最显著的负相关区位于南亚高压主体位置所在的层次, 表明南亚高压偏强(弱), 对应东亚夏季风弱(强). 在西太平洋暖池区, 最显著的负相关区则位于对流层中低层, 即副高弱(强)夏季风强(弱). 但500 hPa的相

关系数明显弱于700和850 hPa, 表明东亚副热带夏季风的强度更容易受到低层副高强度异常的影响. 与夏季风强度类似, 长江流域降水同样表现出和低层副高关系更为密切的特点. 因此本文定义了一个新的三维副高强度指数, 即考虑(10°~30°N, 110°~150°E)区域1000~500 hPa各层位势高度强度综合异常, 并作标准化处理以去除位势高度值的垂直差异.

与传统的副高强度指数对比分析显示, 新的三维副高强度指数对长江中下游降水有更好的表征. 相关结果表明, 三种指数都能很好反映出和东部降水最强正相关位于长江中下游这一根本特点, 但仅有三维强度指数与27°~31°N之间的降水通过95%的置信水平. 新指数亦能更好反映我国东部雨型异常分布特征. 排除1998年影响后, 三维副高强度与长江中下游降水关系略有下降, 但相关系数仍可通过同一置信水平, 而其他两个指数相关值下降明显, 这也表明本文定义的三维副高强度指数比之前指数可以更好刻画长江中下游降水异常. 这是因为本文定义的三维副高强度指数比其他两种指数能更好反映东亚热带和副热带地区经、纬向水汽输送的异常.

本文仅仅从副高的强弱角度定义了新的三维强度指数. 前已指出, 大量的科研成果揭示了副高其他特征量如主体南北位置(脊线)、北界位置和西伸脊点等的重要性. 初步分析表明, 各层副高东西和南北位置异常在大多数年份基本一致, 但个别年份仍有明显差异. 这也从另一个方面表明, 和副高强度一样, 对于副高位置的定义仍需要考虑其三维结构特征, 但其复杂性要比强度定义更大, 需要在逐年逐月的大量个例分析总结基础上加以开展.

参考文献

- 1 Huang S S, Tang M M. On the structure of the summer monsoon regime of East Asia (in Chinese). *Sci Meteorol Sin*, 1987, 3: 4-17 [黄士松, 汤明敏. 论东亚夏季风体系的结构. *气象科学*, 1987, 3: 4-17]
- 2 Ye D Z, Zhu B Z. Some Fundamental Problems of the General Circulation of the Atmosphere (in Chinese). Beijing: Science Press, 1958 [叶笃正, 朱抱真. 大气环流的若干基本问题. 北京: 科学出版社, 1958]
- 3 Tao S Y, Chen L X. The structure of general circulation over continent of Asia in summer (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1957, 28: 234-247 [陶诗言, 陈隆勋. 夏季亚洲大陆上空大气环流的结构. *气象学报*, 1957, 28: 234-247]
- 4 Zhao Z G. Summer Drought and Flood in China and the Circulation Patterns (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 45-46 [赵振国. 中国夏季旱涝及环境场. 北京: 气象出版社, 1999. 45-46]
- 5 Chen X F. A preliminary discussion of the transition of subtropical high in autumn (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 1980, 4: 81-85 [陈兴芳. 副高秋季转换的初步讨论. *大气科学*, 1980, 4: 81-85]
- 6 Chen L T. Seasonal variation of the relationship between the indices of 500-mb subtropical high and the SSTs over the equatorial Pacific (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1983, 28: 990-995 [陈烈庭. 太平洋赤道海温与 500 mb 副高特征指数联系的季节变化. *科学通报*, 1983,

28: 990–995]

- 7 Fang Z F. Interaction between North Hemisphere subtropical high and polar sea ice (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1986, 31: 286–289 [方之芳. 北半球副热带高压与极地海冰的相互作用. 科学通报, 1986, 31: 286–289]
- 8 Zhao J H, Feng G L, Yang J, et al. Analysis of the distribution of the large-scale drought/flood of summer in China under different types of the western Pacific subtropical high (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2012, 70: 1021–1031 [赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 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分布. 气象学报, 2012, 70: 1021–1031]
- 9 National Climate Center (NCC). *China's 1998 Severe Flood and Climate Extremes* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1998 [国家气候中心. 98 中国大洪水与气候异常. 北京: 气象出版社, 1998]
- 10 Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al. Reconstruction and application of the monthly western Pacific subtropical high indices (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2012, 23: 414–423 [刘芸芸, 李维京, 艾婉秀, 等. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用. 应用气象学报, 2012, 23: 414–423]
- 11 Zhang Q Y, Tao S Y. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1999, 57: 539–548 [张庆云, 陶诗言. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究. 气象学报, 1999, 57: 539–548]
- 12 Mu Q Z, Wang S W, Cai J N, et al. Modeling studies on the changes of the subtropical high over the Western Pacific during the last 100 years. *Chin Sci Bull*, 2002, 47: 945–948 [慕巧珍, 王绍武, 蔡静宁, 等. 近百年西太平洋副热带高压变化的模拟研究. 科学通报, 2002, 47: 550–556]
- 13 Xiang B, Wang B, Yu W, et al. How can anomalous western North Pacific subtropical high intensify in late summer? *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 2349–2354
- 14 Lu R Y. Indices of the summertime western North Pacific subtropical high. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19: 1004–1028
- 15 Lu R Y, Li Y, Ryu C S. Relationship between the zonal displacement of the western Pacific subtropical high and the dominant modes of low-tropospheric circulation in summer. *Prog Nat Sci*, 2008, 18: 161–165
- 16 Lee S S, Seo Y W, Ha K J, et al. Impact of the western north Pacific subtropical high on the East Asian monsoon precipitation and the Indian Ocean precipitation in the boreal summertime. *J Atmos Sci*, 2013, 49: 171–182
- 17 Wang Q, Han Y Q. The interannual variability of the 850 hPa summer western Pacific subtropical high (in Chinese). *Period Ocean Univ Chin*, 2010, 40: 1–7 [王启, 韩永清. 850 hPa 夏季西太平洋副热带高压的年际变化特征. 中国海洋大学学报, 2010, 40: 1–7]
- 18 Wang Q, Zhao Y Q, Gong X Q. The Interannual variabilities and decadal variations of 850 and 500 hPa summer north Pacific subtropical high (in Chinese). *Period Ocean Univ Chin*, 2014, 44: 1–7 [王启, 赵娅琴, 宫晓庆. 北太平洋 850 和 500 hPa 夏季副热带高压的年际和年代变化. 中国海洋大学学报, 2014, 44: 1–7]
- 19 Li J P, Chou J F. Dynamical analysis on splitting of subtropical high-pressure zone-Geostrophic effect. *Chin Sci Bull*, 1998, 43: 1285–1289 [李建平, 丑纪范. 副热带高压带断裂的动力学分析—地转作用. 科学通报, 1998, 43: 434–437]
- 20 Zhan R F, Li J P, He J H. Statistical characteristics of the double ridges of subtropical high in the Northern Hemisphere. *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 2336–2341 [占瑞芬, 李建平, 何金海. 北半球副热带高压双脊线的统计特征. 科学通报, 2005, 50: 2022–2026]
- 21 Fan K, Wang H J, Choi Y J. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River Valley summer rainfall. *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 602–609 [范可, 王会军, Choi Y J. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型. 科学通报, 2007, 52: 2900–2905]
- 22 Xu Z Q, Fan K. Possible process for influences of winter and spring Indian Ocean SST anomalies interannual variability mode on summer rainfall over eastern China (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2012, 36: 879–888 [徐志清, 范可. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程. 大气科学, 2012, 36: 879–888]
- 23 Xue F. Influence of the southern circulation on East Asian summer monsoon (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2003, 10: 401–408 [薛峰. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响. 气候与环境研究, 2005, 10: 401–408]
- 24 Xue F, Wang H J, He J H. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 492–497 [薛峰, 王会军, 何金海. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季风降水的影响. 科学通报, 2003, 48: 287–291]
- 25 Fan K. Atmospheric circulation in Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River Valley. *Chin J Geophys*, 2006, 49: 599–606 [范可. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系. 地球物理学报, 2006, 49: 672–679]
- 26 Fan K, Wang H J. Studies of the relationship between Southern Hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2006, 30: 402–412 [范可, 王会军. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展. 大气科学, 2006, 30: 402–412]
- 27 Zhou T J, Yu R C, Zhang J. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s. *J Clim*, 2009, 22: 2199–2215
- 28 Wu L G, Wang C. Has the western Pacific subtropical high extended westward since the late 1970s? *J Clim*, 2015, 28: 5406–5413

- 29 Ren Z H, Yu Y, Zou F L, et al. Quality detection of surface historical basic meteorological data (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2012, 23: 739–747 [任芝花, 余予, 邹凤玲. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测. *应用气象学报*, 2012, 23: 739–747]
- 30 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc*, 1996, 77: 437–471
- 31 Kistler R, Collins W, Saha S, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull Am Meteorol Soc*, 2001, 82: 247–268
- 32 Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2003, 61: 559–568 [张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. *气象学报*, 2003, 61: 559–568]
- 33 Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. *Principles and Methods of Weather* (in Chinese). 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 2010 [朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. *天气学原理和方法*. 第4版. 北京: 气象出版社, 2010]
- 34 Mao J Y, Wu G X. Interannual variability in the onset of the summer monsoon over the Eastern Bay of Bengal. *Theor Appl Climatol*, 2007, 89: 155–170
- 35 Zhao P, Zhou Z J. East Asian subtropical summer monsoon index and its relationships to rainfall (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2005, 63: 933–941 [赵平, 周自江. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系. *气象学报*, 2005, 63: 933–941]
- 36 Liang P, Tang X, He J H, et al. An East Asian sub-tropic summer monsoon index defined by moisture transport (in Chinese). *J Trop Meteorol*, 2007, 23: 467–473 [梁萍, 汤绪, 何金海, 等. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系. *热带气象学报*, 2007, 23: 467–473]
- 37 Xie A, Song Y Y, Mao J Y, et al. Climatological characteristics of moisture transport during summer monsoon over South China Sea (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2001, 6: 425–434 [谢安, 宋焱云, 毛江玉, 等. 南海夏季风期间水汽输送的气候特征. *气候与环境研究*, 2001, 6: 425–434]
- 38 Wu A M, Ni Y Q. The influence of Tibetan Plateau on the interannual variability of Asian monsoon. *Adv Atmos Sci*, 1997, 14: 491–504
- 39 Shi N, Zhu Q G, Wu B G. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 1996, 20: 575–583 [施能, 朱乾根, 吴彬贵. 近四十年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常. *大气科学*, 1996, 20: 575–583]
- 40 Huang G, Yan Z W. The East Asian summer monsoon circulation anomaly index and its interannual variations. *Chin Sci Bull*, 1999, 44: 1325–1329 [黄刚, 严中伟. 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化. *科学通报*, 1999, 44: 421–424]
- 41 Wang B, Fan Z. Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bull Am Meteorol Soc*, 1999, 80: 629–638

Summary for “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”

The three-dimension intensity index for western Pacific subtropical high and its link to the anomaly of rain belt in eastern China

GAO Hui*, DING Ting & LI WeiJing

Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

* Corresponding author, E-mail: gaohui@cma.gov.cn

Western Pacific subtropical high (WPSH) is a deep circulation system located at middle-lower troposphere over the East Asia. The anomalies of its position and intensity determine the shift of climates in eastern China, especially the summer rainfall belt. However, previous definitions of WPSH intensity index were limited mainly by a single threshold of 5880-gpm geopotential height contour at 500-hPa, which cannot denote the rain pattern in eastern China reasonably, in particular the floods and droughts along the Yangtze River valley. In this paper, the link between the intensity of East Asian summer monsoon (EASM) and the geopotential heights at each level were analyzed by correlation analyses. The results indicate that the significant negative correlations spread obviously from the upper to lower levels with longitude changed from west to east. At the upper levels over the Asian continent, the most significant negative correlation was found at the central region of the South Asia High (SAH). This implies that the EASM would be weaker if the SAH was stronger, and vice versa. Over the western Pacific warm pool, the most significant negative correlation was found in the middle-lower troposphere. The correlation coefficients at 500-hPa were much weaker than those at 700-hPa and 850-hPa, indicating that the EASM was easier influenced by the subtropical high at lower levels. Similar, the relationship between the WPSH and the precipitation along the Yangtze River valley was more significant at lower levels indicated by the correlation coefficient. In this study, the representativeness of the threshold of 5880 gpm at 500-hPa level over the western Pacific subtropical regions was analyzed at different grids and seasons, and the limitations of previous definitions were also discussed. Considering the three-dimension (3D) structures of the subtropical high, a new WPSH intensity index was defined by integrated the standardized geopotential heights from 500-hPa to 1000-hPa levels over the region (10°–30°N, 110°–150°E). Compared with the two traditional WPSH indices, the new 3D WPSH intensity index can better represent the subtropical summer monsoon and the precipitation along the middle and lower reaches of the Yangtze River. Although all the three indices could reflect the primary correlation patterns between WPSH and the precipitation in eastern China, only the correlation coefficient between the 3D intensity index and precipitation is significant at the 95% confidence level to pass the student *t*-test. Compared to the other two indices, the 3D WPSH index can better reflect the anomalous of both meridional and zonal water vapor transportation between the tropical and subtropical regions of East Asia. During the transition seasons of boreal spring and autumn, the mechanisms of anomalous precipitation are more complicated, which are obviously different from EASM. Preliminary analysis shows that even in these two transition seasons, the 3D WPSH index defined in this paper also has better link with the precipitation anomalies in eastern China. As mentioned before, the WPSH is a deep circulation system over the western Pacific. Besides its intensity, the position also impacts on the climates over East Asia, especially its west boundary and meridional axis. In the future study, the definitions of other parameters of WPSH need to be studied from its 3D structure.

western Pacific subtropical high, three-dimension intensity index, East Asian summer monsoon, precipitation

doi: 10.1360/N972017-00280